Théorie et pratique des modèles d'erreur humaine dans la sécurité des barrages hydroélectriques : le cas des études de dangers de barrages d'EDF

Justin Larouzée

▶ **To cite this version:**

Justin Larouzée. Théorie et pratique des modèles d'erreur humaine dans la sécurité des barrages hydroélectriques : le cas des études de dangers de barrages d'EDF. Risques. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2015. Français. NNT : 2015ENMP0067 . tel-01310768

HAL Id: tel-01310768

https://pastel.hal.science/tel-01310768

Submitted on 3 May 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

MINES ParisTech

École doctorale n° 432 : Sciences et Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité "Science et Génie des Activités à Risques"

présentée et soutenue publiquement par

Justin LAROUZEE

le 16 décembre 2015

THEORIE ET PRATIQUE DES MODELES D'ERREUR HUMAINE DANS LA SECURITE DES BARRAGES HYDROELECTRIQUES :

LE CAS DES ETUDES DE DANGERS DE BARRAGES D'EDF

Directeur de thèse : **Franck GUARNIERI**

Jury

Didier VAN CAILLIE, Professeur, Université de Liège	Président / Rapporteur
Enrico ZIO, Professeur, Ecole Centrale Supelec	Rapporteur
Jean-Christophe LE COZE, PhD, Responsable Etudes et Recherches, INERIS	Examinateur
Christophe MARTIN, Titulaire de la Chaire Résilience et Sécurité, Mines ParisTech	Examinateur
Patrick CODRON, Ingénieur Maîtrise des Risques, EDF-CIH	Membre invité
Benoît DELPRAT, Chef de Projet Etudes de Dangers, EDF-CIH	Membre invité
Franck GUARNIERI, Directeur de Recherche, Mines ParisTech	Directeur de thèse

T H È S E

MINES ParisTech
Centre de Recherche sur les Risques et les Crises (CRC)
Rue Claude Daunesse, B.P. 207
06904 Sophia Antipolis Cedex

REMERCIEMENTS

Henri Laborit, l'un des très grands esprits scientifiques du XX^{ème} siècle, affirmait « *Je suis les Autres* ». Cette formule suffirait à remercier, sans en omettre, tous ces *autres* sans qui le travail présenté ici n'aurait jamais été. Reconnaître que « *je suis les autres* », c'est reconnaître l'influence de toutes les personnes rencontrées, de la naissance à la soutenance, à travers des conversations ou des lectures, dans la communion ou l'opposition, la conviction ou le doute. C'est – avec modestie et sincérité – partager la joie du travail accompli avec toutes celles et tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, le sachant ou non, y ont contribué.

Je tiens tout d'abord à remercier Franck Guarnieri, mon directeur de thèse. Franck m'a accordé sa confiance et a su me guider sur les chemins de nouvelles connaissances. Il a été une source d'inspiration dans sa capacité à dire ou à faire et je lui en suis très largement reconnaissant. Je souhaite un avenir où nous pourrons continuer à travailler ensemble : il y a encore tant à faire !

Je remercie le Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF de m'avoir accueilli et d'avoir contribué à créer les conditions idéales pour ce travail de recherche. Une pensée particulière pour Patrick Codron et Benoît Delprat qui ont encadré, accompagné et attentivement relu mes travaux ; Joel Planès pour m'avoir initié aux subtilités de la sûreté hydraulique via sa contribution active aux développements d'ECHO ; Emmanuel Desmares et Hervé Bathomeuf pour leurs conseils et leurs participations aux Comités de Pilotage ; Guillaume Mantes et l'ensemble du personnel de la Mission Maîtrise des Risques du CIH ; Célestin avec qui l'aventure s'est étendue jusque dans le désert du Sahara ; et enfin, toutes les personnes qui par leurs suggestions ou leurs requêtes ont témoigné un intérêt pour ce travail (la liste serait bien trop longue). J'ai trouvé dans « l'hydraulique » un milieu de gens passionnés, dévoués et d'une exceptionnelle ouverture d'esprit. Ces trois années passées à vos côtés ont été une réelle source d'inspiration et de développement personnel.

Je voudrais remercier James Reason qui a accepté de relire mes articles, qui m'a accordé une correspondance précieuse et qui nous a reçus, avec Franck Guarnieri, à son domicile. Cher Jim, le thé que vous nous avez offert restera longtemps gravé dans ma mémoire. Merci également à John Wreathall d'avoir fait le déplacement jusqu'au Centre de recherche sur les Risques et les Crises pour témoigner sur ses contributions au *Swiss cheese model.* Messieurs, j'admire votre travail et j'espère lui rendre justice, non seulement dans cette thèse, mais aussi dans la suite de ma carrière.

Merci à Enrico Zio et Didier Van Caillie d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Merci également à Christophe Martin et Jean-Christophe Le Coze d'en être les examinateurs. Je souhaite que vous trouviez dans ce travail un intérêt à la hauteur du temps précieux que vous acceptez de lui consacrer.

J'adresse une pensée chaleureuse au personnel du Centre de recherche sur les Risques et les Crises. Sans la moindre exception, les périodes au « labo » ont été la source d'un grand épanouissement intellectuel. Merci aux enseignants chercheurs et chercheurs associés (Christophe, Aldo, Eric, Emmanuel, Valérie, Sébastien, Aurélien, Wim) ainsi qu'aux doctorants que j'ai côtoyés, pour votre accueil irréprochable, votre sympathie et votre dynamisme intellectuel. Une pensée particulière pour

Raphael, Aissame, Thomas et Amaury. Enfin, je tiens à mentionner et remercier Sandrine, Brigitte et Sylvie : mesdames, j'espère que les futures générations de doctorants mesureront à quel point votre contribution est essentielle !

J'ai une pensée particulièrement émue pour Pierre Duffaut. Pierre a été un guide, tant sur le plan intellectuel qu'humain. C'est lui qui m'a « présenté au monde des barrages », lors d'une conférence qu'il donnait sur Malpasset à la Société de Géographie en 2009 – j'étudiais alors la géologie de l'ingénieur. Pierre a également été, pour moi, un exemple de vertu, de grandeur, de modestie et de sagesse. J'aimerais te dédier ces travaux Pierre. Puisse la sécurité des barrages demeurer un *combat* où la technique et l'humain s'allient pour *vaincre* et ne jamais devenir une *course* où ils s'opposeraient comme rivaux, au détriment de tous.

J'aimerais adresser des remerciements aux différents enseignants qui m'ont donné le goût d'apprendre, de questionner et de dépasser les évidences. Merci Eric Bertrand pour ce talent pédagogique sans faille, cet humour et cette grandeur d'esprit. Merci Loïc Larboulette et Daniel Nizery d'avoir su rendre les lettres attirantes pour le jeune scientifique que j'étais. Merci Clément Crastes pour ce dynamisme, cette gentillesse et cette disponibilité ; qualités qui ont fait des années « prépa » des années si épanouissantes. Merci enfin Sébastien Laurent-Charvet et Bassam Barakat d'avoir aussi vite cru en mon projet de thèse, atypique (pour un ingénieur géologue) et de l'avoir soutenu jusqu'au bout !

Je voudrais également remercier Philippe Vigier pour son temps et son attention ; le Général Goupil, les Colonels Laval et Mercury pour leur amitié et les passionnants échanges que nous avons pu avoir sur l'Homme et l'action ; Pierre, Sacha, Remi, Jul, Louis-Marc et Simon pour leur amitié, si précieuse.

Je ne remercierai jamais assez mes parents qui m'ont toujours soutenu, poussé, encouragé, conseillé et stimulé. Ce travail est en grande partie le vôtre : vous avez su me donner le goût d'apprendre, de questionner, de remettre en cause les évidences, d'apprécier la complexité et enfin, celui de transmettre. « Merci pour tout » est bien peu de choses.

J'ai enfin une pensée particulière pour Maéva. Je tiens à saluer ta présence réconfortante, ton investissement à mes côtés et ta joie de vivre qui ont été de véritables atouts pour moi. Merci d'être la personne que tu es.

A toutes, à tous, merci d'*être* – ou d'avoir été - ; sans quoi, je ne *serais* pas.

Justin Larouzée

« *We cannot change the human condition, but we can change the conditions under which humans work* »

(James Reason)

« *Il n'est pas besoin d'un esprit créatif pour déceler une mauvaise solution ; mais il en faut un pour déceler une mauvaise question* »

(Anthony Jay)

SOMMAIRE

INTRODUCTION **1**

CHAPITRE 1 – DES BARRAGES ET DES HOMMES **9**

1.1. Barrages : types, fonctions, répartition et enjeux 11

1.1.1. Enjeux techniques, enjeux sociaux et fonctionnement des barrages 11

1.1.2. Les barrages dans le monde et en France 19

1.1.3. Accidentologie de barrages, les ouvrages à l'épreuve de la nature, de la technique et des hommes 28

1.2. Etudes de dangers : le facteur humain en question 48

1.2.1. Comprendre la relation de contrôle 48

1.2.2. Présentation des études de dangers de barrages 54

1.2.3. Facteur humain : des situations d'exploitation aux nœuds papillon 64

1.3. Facteur humain : état de l'art, des pratiques et des dispositions industrielles 71

1.3.1. Revue bibliographique 71

1.3.2. Revue des dispositions industrielles : le cas d'EDF-DPIH 78

1.3.3. Le facteur humain avec un nœud papillon 81

CHAPITRE 2 – LES MODELES EN GESTION DE LA SECURITE **91**

2.1. Courants et modèles des facteurs organisationnels et humains 92

2.1.1. Considérations historiques sur les facteurs organisationnels et humains 92

2.1.2. Considérations générales sur la nature et les utilisations des modèles 103

2.1.3. Proposition d'un cadre pour l'étude des modèles d'accidents 108

2.2. Les modèles d'accidents organisationnels de James Reason 110

2.2.1. Naissance d'une théorie de l'accident organisationnel 113

2.2.2. Evolution des modèles d'accidents organisationnels, genèse du Swiss cheese model 125

2.2.3. Vers une « théorie unifiée » de l'accident organisationnel 135

2.3. La popularité en question : usages, limites et critiques du Swiss cheese model 140

2.3.1. Revue des usages, méthodes et outils adossés au Swiss cheese model 140

2.3.2. Discussion des limites et des critiques du Swiss cheese model 145

2.3.3. De la contemporanéité des modèles de Reason 152

CHAPITRE 3 – NAISSANCE ET VIE D'UN MODELE FOH DEDIE AUX EDD **155**

3.1. A la croisée des sciences humaines et de l'ingénierie : démarche de conception d'un modèle du facteur humain dédié aux EDD de barrages d'EDF 156
3.1.1. Cadre et modalités de conception 156
3.1.2. Etude comparative et adaptation : proposition d'un modèle FOH dédié aux EDD168
3.1.3. Conception de la méthode et de l'outil ECHO 176
3.2. Première validation : une expérimentation contrôlée 190
3.2.1. Choix du site, mise en place du test 190
3.2.2. Déroulement et résultats 192
3.2.3. Limites, biais et perspectives 195
3.3. Deuxième validation : la sanction du réel 200
3.3.1. Communications associées au dispositif ECHO et formation des pilotes-EDD 200
3.3.2. Observation du déploiement d'ECHO dans les premières mises-à-jour d'EDD 202
3.3.3. Axes de progrès, perspectives 206
CHAPITRE 4 – DISCUSSION ET PERSPECTIVES 209
4.1. Perspectives industrielles : les échos d'ECHO 210
4.1.1. Aller au-delà de l'EDD 210
4.1.2. Construire une « stratégie » de communication 213
4.2. Discussion sur l'objet « modèle » 215
4.2.1. Classifications générales des modèles : diversité et complexité de l'exercice 215
4.2.2. Revue de classifications dédiées aux modèles d'accidents 219
4.2.3. Vers une alternative à la classification des modèles d'accidents 228
4.3. Débat académique sur la valeur des modèles : bilan et perspectives 230
4.3.1. Les (nouveaux) modèles systémiques d'accident 230
4.3.2. Deux écoles incompatibles pour « penser l'accident » 238
4.3.3. Double-collaboration : l'émergence d'une troisième voie ? 248
CONCLUSION ET PERSPECTIVES 255
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 267
GLOSSAIRE 284
INDEX DES FIGURES 286
INDEX DES TABLEAUX 290

INTRODUCTION
DE L'IDEE DE LA THESE

Les travaux présentés dans cette thèse abordent la (très vaste) question du rôle et de la valeur des modèles d'erreur humaine ou d'accidents, dans la gestion de sécurité d'organisations industrielles. La réflexion que nous proposons est en partie étayée sur l'intégration, dans les études de risques de barrages hydroélectriques, du « facteur humain ». La notion de « facteur humain », qui se rapporte globalement au comportement des hommes au travail, est souvent convoquée dans l'étude des catastrophes industrielles ou des accidents du travail ; pourtant, le comportement des hommes au travail peut également être considéré comme une source de maintien du niveau de sécurité des hommes. Un dualisme se profile.

De l'idée de la thèse

Considéré de façon épistémologique, le facteur humain relève à la fois, des *sciences fondamentales* (qui cherchent à produire des connaissances, sans se préoccuper de leur utilité *pratique*), et des *sciences appliquées* (qui ont pour objet l'« action », dans une perspective pratique, économique ou industrielle). Cette dualité épistémique explique une dérégulation entre les productions théoriques relatives aux facteurs humains, l'application normative de certaines de ces théories faite par des professionnels empreints de rationalité instrumentale (ou techniciste) et les réalités quotidiennes d'exploitation (Dejours, 2014). En plaçant les conditions concrètes d'exploitation au centre de la réflexion, on identifie alors une contradiction entre la vision « négative », théorique, du facteur humain et la réalité des interventions d'exploitation. Pour Dejours, la représentation négative du rôle de l'homme dans le système repose sur un excès de confiance dans la technique, ainsi qu'une difficulté de faire percoler les apports des sciences humaines dans les organisations productives.

De la montée en puissance des facteurs organisationnels et humains dans la sécurité…

Depuis le milieu du XX^{ème} siècle, les ingénieurs, les ergonomes et les psychologues étudient les facteurs humains avec pour but d'améliorer la sécurité industrielle, notamment en développant des théories et des modèles des mécanismes de l'erreur humaine. Dans les années 1980, 1990, les travaux de la communauté de recherche en gestion de la sécurité et particulièrement ceux du psychologue James Reason montrent que l'erreur de l'opérateur ne peut se comprendre qu'en relation avec des éléments de contexte, liés à l'organisation et la gestion du système. Ces éléments de contexte, ou « latents », peuvent avoir une origine très éloignée dans le temps et l'espace, des lieux de travail où « l'erreur » est observée (Reason, 1990b). En conséquence, le modèle de l'homme comme source d'erreur est relégué au second plan dans le débat scientifique (Guarnieri *et al.*, 2008). En considérant que l'erreur humaine est un symptôme plutôt qu'une cause, de nombreux travaux vont alors s'intéresser aux systèmes sociotechniques pour tenter d'améliorer le cadre théorique de l'accident. Les travaux pionniers du sociologue Charles Perrow sur les *accidents normaux* (1984), la théorie des *organisations hautement fiables* (Laporte & Consolini, 1991) puis le cadre organisationnel

proposé par Rasmussen (1997) ont ouvert la voie à une nouvelle génération de modèles d'accidents. Ces modèles convoquent les concepts de la science des systèmes (Bertalanffy, 1973 ; Walliser, 1977), ils considèrent l'accident comme un phénomène émergeant et tentent d'en représenter (ou du moins, d'en étudier) le caractère dynamique.

Les théories et donc les modèles de la recherche en gestion de la sécurité ont connu de grandes évolutions ces dernières décennies. Les modèles de l'erreur humaine, centrés sur l'individu et ses actions, sont devenus des modèles systémiques d'accidents qui étudient un système sociotechnique dans son ensemble voire même, dans son environnement (société). Après l'appel lancé par Reason (2008), certains auteurs s'interrogent sur la tendance qui consiste à chercher des facteurs causaux de plus en plus profonds dans les organisations et les structures, en se détournant de l'individu. Le risque est donc de créer un écart entre la recherche d'une théorie « vraie » et celle de théories « utiles », or comme l'indique Hopkins (2001, p.72) « *this is not just a theoretical debate. There are practical consequences for the way we go about accident prevention* ».

… A l'apparition d'un écart entre la recherche et les pratiques

Existe-t-il un « gap » entre les productions scientifiques et les pratiques en matière de gestion de la sécurité ? Cette question est explicitement soulevée et traitée par Peter Underwood (2013). Sa recherche montre que les pratiques sont encore largement influencées par la théorie de l'accident organisationnel et les modèles ou méthodes liés au *Swiss Cheese Model* (SCM) popularisé par Reason (2000). Or, le SCM est vivement critiqué par un ensemble de chercheurs qui lui reprochent de porter une vision, obsolète, de l'accident comme un phénomène à causalité linéaire. Underwood et Waterson (2014) montrent que les méthodes dérivées du SCM permettent bien une approche systémique et que les modèles les plus récents représentent une évolution plutôt qu'une révolution. Mais ils précisent également que la qualité de l'analyse dépend largement de l'utilisation faite de la méthode. Or justement, il semble que les représentations et les pratiques relatives à la gestion de la sécurité soient encore, en ce qui concerne les Facteurs Organisationnels et Humains (FOH), à « l'ère de l'erreur humaine » (Dekker, 2007). Différentes raisons ont été avancées pour expliquer ce fait, entre autres, considérer l'erreur comme une cause principale des accidents évite d'orienter les recommandations des analyses vers les structures ou les institutions, hors de portée des personnes en charge de la sécurité dans les industries ou nécessitant des efforts longs et coûteux (Reason, 1997). Il est également difficile pour le corps des ingénieurs, très majoritairement représenté chez les « praticiens de la sécurité », de résoudre des questions appartenant aux champs des sciences humaines. La situation est telle qu'« *en construisant nos outils, nous résolvons des problèmes* […]*, mais nous en créons d'autres* » or, « *résoudre ces problèmes, c'est d'abord les identifier et pour cela les sciences sociales sont incontournables. Malheureusement, la plupart des chercheurs spécialisés dans les sciences sociales se considèrent* [incapables] *de comprendre* [la] *technique et donc évitent de rentrer dans ce qu'ils ont appelé les boîtes noires.* » (Ruffier, 2001).

Ce constat indique clairement, sinon la nécessité, au moins l'intérêt de réfléchir à la convergence, la collaboration entre domaines (recherche, industrie) et les disciplines (sciences humaines, sciences de l'ingénieur).

Le facteur humain dans la sécurité des barrages hydroélectriques : état de la question

On peut considérer que la gestion de la sécurité regroupe, dans le milieu industriel, deux approches distinctes (De Terssac, 2011) :

- la sécurité réglée, qui consiste à éviter toutes défaillances prévisibles par des formalismes, des règles, des formations et un management assurant le respect de ces dernières,
- la sécurité gérée, qui consiste à anticiper l'imprévu via l'expertise humaine, la faculté (capacité) d'initiative, le fonctionnement des collectifs et des organisations et un management attentif à la réalité des situations.

Notre recherche-action[1] est réalisée en collaboration avec la Division Production et Ingénierie Hydraulique (DPIH) d'EDF. Le décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques, modifiant le Code de l'Environnement, fixe aux concessionnaires de nouvelles obligations, dont la production d'une Etude de Dangers (EDD) pour certains ouvrages. Cette étude explicite les niveaux de risques pris en compte par l'industriel sous la forme d'une « démonstration de sûreté[2] », puis détaille des mesures de maintien ou d'amélioration du niveau de maîtrise des risques (article R. 214-116-I). Une fois achevée, l'EDD est transmise aux services de l'Etat chargés du contrôle des installations industrielles, qui adresse en retour ses remarques.

Un dialogue institutionnel s'installe alors. Au départ de nos travaux, l'étude de ce dialogue a été utilisée comme un *baromètre* pour l'observation des représentations relatives au facteur humain. Un travail préliminaire a été conduit en développant un outil de gestion et d'analyse d'un important corpus d'échanges (Larouzée, 2012a). Il est ressorti de l'analyse la récurrence des remarques de l'organisme de contrôle au sujet des notions d'« *erreur humaine* » et de « *défaillance humaine* »[3]. Cette mise en discussion, au sein de la relation contrôleur-contrôlé, du facteur humain s'est trouvée combinée avec un contexte de volonté de développer la *culture sécurité*, à la DPIH.

Les observations (participantes et non-participantes) conduites dans l'entreprise[4], ont confirmé l'hypothèse de freins, dans la mise en débat et l'analyse des FOH, liés aux différences de culture (représentations) et de pratiques entre les sciences de l'ingénieur et les sciences humaines ; nécessairement rapprochées dans une EDD *pluridisciplinaire* et dans un contexte d'attentes relatives aux FOH de la part des services de l'Etat.

Le projet de thèse a ainsi été construit à partir de la nécessité, exprimée par le projet-EDD, de renforcer le cadre et les outils d'étude des FOH. Notre démarche de recherche-action a donc débuté

[1] Recherche-action est entendu comme le processus de « *recherches dans lesquelles il y a une action délibérée de transformation de la réalité ; recherches ayant un double objectif : transformer la réalité et produire des connaissances concernant ces transformations* », définition admise par le colloque de l'Institut national de recherche pédagogique (1986).

[2] La *Sûreté Hydraulique* à EDF est constituée de l'ensemble des dispositions prises lors de la conception, de la gestion et de la maintenance des aménagements hydroélectriques pour assurer la protection des personnes, des biens et de l'environnement contre les dangers liés à la présence ou au fonctionnement des ouvrages. EDF a formalisé une politique de sûreté hydraulique qui définit les principes de conception, d'exploitation et de maintenance applicable par toutes les entités intervenant sur le parc hydraulique EDF SA. Par commodité, le terme « sûreté » sera employé comme contraction de « sûreté hydraulique ».

[3] 80% des EDD faisaient alors l'objet d'au moins une remarque mentionnant l'un de ces deux termes.

[4] Nous avons identifié différentes cibles d'observations et sommes intervenus à deux niveaux : la réalisation des EDD et la formation/sensibilisation aux FOH.

par la conception d'un dispositif d'analyses FOH, dédié aux EDD. Ce dispositif (construit autour d'un modèle original des activités d'exploitation) a été déployé dans différents Groupes de Travail d'EDD (GT-EDD).

L'émergence d'une question de recherche

L'absence d'état de l'art sur la prise en compte des FOH dans la sécurité des barrages peut être considérée comme une opportunité dans le cadre de notre démarche. En effet, l'organisation DPIH pouvait être considérée comme un terrain relativement *vierge* de trace de construction de références instituées sur la question des FOH. La prédominance d'une culture technique, très marquée dans l'hydraulique, ne signifie pas que les professionnels du secteur sont dénués de représentations au sujet des FOH ; mais plutôt que ces représentations ont émergé au fil du temps, au gré de retours d'expériences sur la sinistralité du secteur, de discours managériaux, de la relation de contrôle et, comme nous le suggérons, de la nature des outils de gestion mobilisés pour se saisir des FOH.

De façon assez immédiate, on peut donc affirmer que la DPIH s'inscrit largement en écart avec le débat scientifique contemporain sur les modèles « classiques » et « systémiques ». Toutefois, ce « terrain » présentait l'opportunité formidable de pouvoir, dans un même mouvement, questionner expérimentalement (1) le rôle des modèles d'erreur ou d'accident dans la constitution ou l'évolution de représentations et de pratiques ; et (2) le caractère contemporain du SCM et des théories de l'accident de Reason. Nous avons donc formulé une question de recherche volontairement large : « *quel est le rôle des modèles d'erreur humaine dans l'innovation organisationnelle en sécurité ?* »

Cette question recherche appelle au moins deux remarques. Premièrement, le choix de retenir les modèles « d'erreur humaine » dans la formulation de la question a été maintenu, bien que les travaux de recherche avançant, la distinction avec les « modèles d'accidents » soit devenue de plus en plus claire. Certains accidents peuvent survenir sans « erreur active », c'est-à-dire, erreur d'un opérateur concomitante avec la séquence accidentelle ; rendre compte de cela est notamment l'un des enjeux de modèles comme STAMP, FRAM et, dans un certain sens, du SCM[5]. Dans notre cas, l'EDD cherche bien à produire un modèle de l'« erreur humaine » et non d'accident, puisqu'elle étudie les gestes d'exploitations qui pourraient présenter des risques pour l'ouvrage, dans le cadre d'une « démonstration de sûreté ». De plus, il convient d'expliciter ici que derrière la volonté de généralité dans la formulation de la question de recherche, nos travaux reposent essentiellement sur la Théorie de l'Accident Organisationnel (TAO) qui explique (dans sa version la plus populaire) l'accident par une combinaison d'erreurs latentes et patentes. Deuxièmement, la question de l'*innovation* est soulevée de façon très générale et, finalement, assez peu cadrée. Par *innovation organisationnelle en sécurité*, nous englobons l'ensemble des processus de changement, encadrés ou non, qui reposent sur la capacité d'une *nouveauté* à présenter suffisamment de *valeur* pour être adoptée et apporter des modifications durables et tangibles dans les représentations ou les pratiques liées à la sécurité.

[5] Déterminer si le SCM est un modèle systémique d'accident ou, fondamentalement, un modèle d'erreur humaine, est un des sujets majeurs du débat académique sur les modèles. Nous reviendrons très largement sur cette question tout au long des chapitres 2 et 4.

Les deux pans d'une recherche-action

Notre recherche a progressé en tissant des liens entre des travaux de deux natures différentes : une étude approfondie des travaux de James Reason et la conception d'un dispositif FOH pour les EDD de barrages.

L'étude des travaux de Reason vise à déterminer comment le SCM, modèle paradigmatique[6], a été conçu et utilisé pour tenter de mettre en avant les facteurs clefs de son succès. Cette étude a été menée sur la base d'une revue bibliographique exhaustive (Larouzée & Guarnieri, 2015a), puis complétée par une correspondance avec James Reason qui a conduit à une rencontre et un entretien en janvier 2014. A travers ces travaux, nous avons réuni des éléments historiques, épistémologiques et méthodologiques, sinon originaux, largement peu documentés, à même de faire progresser le débat académique sur la valeur des modèles mais aussi les pratiques industrielles en matière de gestion de la sécurité.

La conception du dispositif FOH dédié aux EDD à trois objectifs principaux, (1) améliorer la qualité des EDD, (2) permettre une évolution des représentations sur les FOH et (3) répondre à une injonction des services de contrôle de l'Etat. Pour répondre à ces objectifs, nous nous sommes inspirés des travaux de développement du SCM, sur le plan conceptuel (avec la TAO) mais également méthodologique (avec une collaboration entre domaines et disciplines, inscrite dans la durée).

Ces deux pans de la recherche-action peuvent être conçus comme deux versants d'une montagne. Ils sont constitutifs d'une seule et même « masse », le sommet les connecte mais l'expérience vécue par l'alpiniste varie singulièrement en fonction de la voie choisie. « Notre » montagne est la question du rôle des modèles d'erreur humaine dans l'innovation organisationnelle en sécurité ; nous pensons que si une démarche aussi ambitieuse demande une grande modestie, une patience et une détermination qui dépasse de loin le cadre « d'une thèse », l'idée d'explorer des voies diverses ne peut qu'enrichir l'expérience du sommet ; point dont « l'unicité » n'est qu'illusion !

Structure du manuscrit

Construire un plan de thèse pourrait sembler une chose aisée, dans un premier temps il convient de présenter une revue bibliographique, le plus souvent en entonnoir : présentation générale du sujet qui se resserre progressivement sur un aspect bien précis que l'on souhaite étudier ; après avoir identifié un « problème » (lorsqu'une question, clairement posée, demeure sans réponse dans la littérature), l'auteur présente ses hypothèses puis la méthodologie qu'il va appliquer pour les éprouver. Dans un second temps, les travaux réalisés sont présentés, commentés et l'auteur expose ses résultats ; enfin, il en discute les limites, les biais et les perspectives.

Voilà la vision qu'avait l'auteur de ce manuscrit en commençant ses travaux de recherche. Tous les ingrédients étaient réunis : une demande industrielle claire, offrant l'opportunité d'un travail de terrain dans la durée ; une étude bibliographie générale d'abord, puis largement centrée sur les travaux d'un auteur prolifique et influent dans le domaine ; une question de recherche portant sur le rôle des modèles d'accidents dans l'innovation organisationnelle en sécurité et trois années à consacrer à la thèse. Dans ces conditions optimales, à peine le temps de boire un café qu'il fallait commencer à rédiger, la thèse touchant à sa fin. Elle avait initié le déploiement d'un dispositif

[6] Ou « sur-modèle », nous proposons, explicitons et défendons ces appellations nouvelles du SCM (voir 2.2).

d'analyse du facteur humain dans les études de dangers de barrages et la relecture détaillée des publications sur un modèle d'accident très répandu ; il restait à en « *tirer profit* »[7]. Armé de la « structure type » d'une thèse, il suffirait de « remplir le plan ».

Malheureusement, la vision *idéale* du plan est rapidement apparue problématique. Comment rendre compte de manière structurée, mais surtout linéaire, de trois années de « recherche-action » faites d'allers-retours permanents entre la réalité opérationnelle du terrain et le niveau d'abstraction théorique de la recherche ? Ou encore d'idées qui se sont progressivement formées, déformées, alliées ou opposées ? Assurément, la difficulté dans ce cas n'est pas d'avoir « des choses à dire », mais plutôt d'en avoir une telle quantité à structurer dans l'écriture.

S'il est vrai qu'« *écrire est une façon de parler sans être interrompu* »[8], la difficulté de l'exercice a été de rendre compte de travaux, de deux natures très différentes (recherche/action), qui ne se sont pas rigoureusement précédés ou succédés[9]. Puisqu'ils ont été conduits en parallèle, ces travaux se sont littéralement *connectés* : l'étude approfondie des travaux de Reason a largement influencé la démarche de conception du dispositif FOH pour les EDD et la conception, puis le déploiement du dispositif industriel, a offert une perspective particulièrement intéressante pour la recherche (à base d'indices[10]) des facteurs clefs de succès des travaux de Reason. Comme le détective, reconstitue un crime, tente de le mimer, se projette dans l'action pour mieux l'élucider, la posture d'*acteur* peut renforcer celle du *chercheur*.

Nos travaux, articulés autour de l'objet « modèle », alternent entre des démarches de théorisation sur la base d'observations empiriques et de déclinaisons opérationnelles de concepts théoriques. Ces deux démarches sont résolument *tissés* ce qui rend donc nos travaux « complexes » ; du moins étymologiquement car, comme le rappelle Edgar Morin, le mot provient du latin « *complexus* », qui signifie « *ce qui est tissé ensemble* »[11]. On peut donc, comme d'autres avant nous (e.g. Le Coze, 2011 ; Blazsin, 2014), défendre une approche ouverte, interactive et itérative pour la recherche en gestion de la sécurité, mais cela ne facilite pas l'exercice de présentation académique des travaux.

Comment rendre compte des hésitations, des renoncements, des trébuchements, des errements, des ratés ? En somme, de ces *aspérités* du réel qui génèrent une véritable *friction*[12] entre théories et pratiques, qu'il nous semble impératif de restituer et discuter. La tâche est peut-être plus délicate encore que de chercher à s'en affranchir ; il est possible de présenter les choses de telle ou telle manière, de tordre les faits par le récit, d'intervertir l'*a priori* et l'*a posteriori*, de limer les pièces du puzzle pour qu'elles s'emboitent et présentent l'image d'une structure de thèse « *idéale* ». Après tout, comme le notait Alain, « *l'idéal est toujours nettoyé d'un peu de réalité qui ferait tache* » (Alain, 1953 ; p. 66). Mais il nous semble, alors, que l'auteur priverait le lecteur de l'intérêt principal de son

[7] « *Lire*, *c'est emprunter ; en tirer profit*, *c'est rembourser sa dette*. » (Georg Christoph Lichtenberg, *Pensées*).
[8] Jules Renard, *Journal*.
[9] Or, l'auteur a constaté à ses dépens que, même dans le plus ingénieux des plans, le chapitre *n* précède inexorablement le chapitre *n+1* !
[10] Nous développons l'idée d'une démarche *indiciaire* dans le deuxième chapitre (voir 2.1.3).
[11] « *Quand je parle de complexité, je me réfère au sens latin élémentaire du mot "complexus", "ce qui est tissé ensemble". Les constituants sont différents, mais il faut voir comme dans une tapisserie la figure d'ensemble. Le vrai problème (de réforme de pensée) c'est que nous avons trop bien appris à séparer. Il vaut mieux apprendre à relier. Relier, c'est-à-dire pas seulement établir bout à bout une connexion, mais établir une connexion qui se fasse en boucle.* » (Morin, 1995).
[12] Cette expression est empruntée à Clausewitz – *De la guerre*, première édition en 1832.

action : témoigner du processus de collaboration entre recherche et industrie, sans l'embellir, puis tenter d'en étudier les effets.

Le rêve, évidemment inaccessible lors de la « mise en plan » du manuscrit, aurait été d'offrir au lecteur l'opportunité concrète, physique, sensible, de « lire » simultanément toutes les composantes de notre recherche. Ainsi, de la combinaison réelle des différents éléments, un message (autrement rendu invisible par la décomposition) aurait pu apparaître. Comme le personnage d'Hergé qui découvre le *Secret de la Licorne* en superposant trois parchemins, chacun énigmatique individuellement, mais dont la réunion par transparence fait apparaître un message caché.

Ce travail n'est finalement pas présenté sous forme de trois parchemins superposables mais structuré en quatre chapitres, qui se succèdent et « dialoguent » :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation des barrages. Nous décrivons ces systèmes sous des angles techniques, économiques, sociaux, législatifs, institutionnels et organisationnels, avant de passer en revue la sinistralité particulière de ce secteur industriel. Dans un second temps, nous présentons l'EDD, l'un des dispositifs principaux de la relation de contrôle qui existe entre l'Etat et les exploitants hydrauliques. La mise en place des EDD a notamment porté l'injonction d'intégrer l'étude du facteur humain dans les analyses de risques. Nous achevons ce chapitre en passant en revue, le faible état de l'art en la matière dans le secteur hydraulique, les dispositions de la DPIH relatives aux facteurs organisationnels et humains et quelques limites qu'impose l'EDD à l'étude de ces facteurs. C'est dans ce contexte qu'une collaboration entre le CIH et le CRC a été engagée pour concevoir, puis déployer un dispositif d'analyse des gestes d'exploitation.
- La « commande industrielle » mobilise au moins deux aspects des safety sciences : les théories des facteurs organisationnels et humains de la sécurité et les travaux sur les modèles. Le deuxième chapitre présente une revue générale des travaux sur les FOH puis, plus spécifiquement, de ceux consacrés aux modèles (d'erreur ou d'accident). Le *Swiss Cheese Model* (SCM) fait l'objet d'une analyse approfondie puisqu'il s'est imposé dans les pratiques autant que le débat académique, depuis bientôt vingt ans, et a fait l'objet de nombreuses adaptations. Nous l'étudions sur la base d'une approche *compréhensive* passant en revue, le parcours de recherche de son auteur, ses collaborations, la naissance puis l'évolution du modèles et enfin, ses nombreuses utilisations. Cette approche nous permet d'apporter un regard nouveau sur les critiques (mais aussi les usages) du SCM et d'en discuter le caractère contemporain.
- L'étude des travaux sur le SCM a été réalisée en parallèle du processus de conception d'un modèle, d'une méthode et d'un outil[13] pour l'analyse du facteur humain dans les EDD de barrages d'EDF. Le troisième chapitre présente ces travaux opérationnels qui n'ont de subordination temporelle avec l'étude des modèles de Reason que celle, illusoire, induite par la succession des chapitres. Nous avons toutefois jugé pertinent de partager ce que l'on peut considérer comme notre cadre théorique dans un premier temps, afin de pouvoir s'appuyer dessus pour commenter nos choix et nos réalisations. La création et le fonctionnement du dispositif sont détaillés avant d'en discuter les effets. Testé puis déployé, nous avons observé

[13] Dans ce manuscrit, nous qualifierons l'articulation *modèle-méthode-outil* de « dispositif », afin d'éviter le recours abusif au terme « modèle », réducteur à celui d'outil.

le rôle de ce dispositif FOH et avons cherché à en mesurer les impacts ; tant du point de vue normatif de la rationalité instrumentale que de celui, plus subjectif, des représentations et des pratiques.

- Dans le quatrième chapitre, nous proposons des pistes qui permettraient à l'industriel de poursuivre et amplifier l'évolution des représentations des FOH initiée par nos travaux. Nous affirmons (avec Dekker, 2007) qu'un tel processus est nécessaire et vertueux pour une organisation industrielle cherchant à développer une *culture de sécurité.* En prenant du recul sur nos travaux, nous revenons sur l'objet « modèle » pour en discuter le rôle, le statut et la place dans une organisation. D'un point de vue théorique, d'abord, nous nous intéressons à la manière de *classer* ou de *comparer* les modèles. Dans un dernier temps, au gré d'une prise de recul supplémentaire, nous questionnons le débat académique sur la valeur et la validité des modèles d'accidents. Nos travaux sur le SCM et pour EDF nous amènent à penser que, le développement de modèles à même de produire des effets ne peut s'effectuer qu'à la « croisée des chemins » entre domaines (industrie, recherche) et disciplines (sciences humaines, sciences de l'ingénieur). Nous proposons donc des axes de réflexion et de travail qui pourraient être à même de stimuler, à l'avenir, de telles convergences.

CHAPITRE 1 – DES BARRAGES ET DES HOMMES

DE LA CONSTRUCTION A L'ACCIDENT DE BARRAGE. FORMALISATION DU CONCEPT DE SURETE HYRAULIQUE ET PLACE DU FACTEUR HUMAIN

Dans ce chapitre, nous définissons dans un premier temps ce qu'est un barrage. Ces objets industriels présentent certaines constantes (ils retiennent l'eau) mais aussi et surtout une grande diversité. Dans la première section, nous présentons différents *types* d'ouvrages qui sont autant de réponses *techniques* à un besoin universel de l'Homme : exploiter l'eau. Cette exploitation peut avoir des fins d'approvisionnement en eau (irrigation, consommation), de production d'électricité, de protection contre les crues, etc. On parle de *fonctions* des ouvrages. Ces *types* et *fonctions* permettent de présenter la diversité des barrages dans le monde, en Europe et en France.

Les aménagements hydrauliques (les barrages, leurs ouvrages et matériels associés) présentent un certain nombre de *risques* : le principal est la rupture totale d'un ouvrage, libérant soudainement une grande quantité d'eau que l'on nomme *onde de submersion*. Pour illustrer ces risques, nous passons plusieurs *grandes catastrophes* de barrages en revue. Les enseignements de ces accidents montrent à la fois le rôle d'éléments *techniques* mais aussi *pratiques.* En effet, les barrages ne font pas exceptions à la quasi permanence du rôle des facteurs organisationnel et humain (FOH) dans la dégradation (et/ou la maîtrise) des fonctions de sûreté des installations industrielles. Ainsi, comme tout site industriel *à risques*, les barrages font l'objet en France d'autorisations ou de concessions et de contrôle de l'Etat. Dans la deuxième section, nous nous intéressons au développement en Europe et en France des réglementations et des structures administratives ou industrielles (depuis le XIX^{ème} siècle) sur l'ensemble de ces installations. Les barrages présentent toutefois un certain nombre de particularités que nous exposons et qui permettent de comprendre les raisons historiques ou techniques de la relation contrôleur-contrôlé existant entre l'Etat et les industriels. Malgré ces différences, les années 2000 ont représenté une période d'harmonisation des démarches de prévention, en 2007 une évolution réglementaire impose aux responsables d'ouvrages hydrauliques la réalisation d'*études de dangers*. Ces études introduisent de nouvelles pratiques liées aux risques (approche pluridisciplinaire, information, intégration des FOH) mais comportent un certain nombre de limites et biais (limites techniques, culturelles, réglementaires). Nous mettons ces forces et faiblesses en évidence en éprouvant le cadre institué à la lumière d'évènements (incidents, accidents) survenus sur le parc hydraulique français.

Ces éléments intéressent notre démarche de thèse (son aspect opérationnel) : développer et mettre en place un outil permettant, dans le cadre des EDD, d'étudier les FOH (une des injonctions portées par le cadre réglementaire de l'EDD). La troisième section détaille le cadre dans lequel cette injonction a été reçue : un « état de l'art » académique et industriel relativement pauvre et des pratiques FOH internes à EDF inadaptées à l'exercice EDD. Enfin, nous présentons deux démarches

successives de prise en compte des FOH dans les EDD de barrages d'EDF, entre 2008 et 2012 puis de 2012 au déploiement de l'outil ECHO[14], conçu dans le cadre de cette thèse.

[14] Evaluation et Cotation des dimensions Humaines et Organisationnelles, le sigle ECHO est utilisé indifféremment pour désigner les différents éléments du dispositif FOH (modèle, méthode et outil) que nous avons conçu et mis en place dans le cadre de cette recherche-action.

1.1. Barrages : types, fonctions, répartition et enjeux

Cette section présente de manière globale ce qu'est un barrage, quels enjeux sont liés à ces ouvrages et les risques qui leur sont associés. Dans un premier temps, nous définissons et présentons les barrages et leurs variétés sur différents plans. Ces variétés sont nombreuses et importantes aux échelles *micro*- et *mésoscopiques.* Dans un second temps, nous proposons une cartographie *fonctionnelle* des barrages dans le monde, en Europe puis en France. Cette cartographie implique autant les ouvrages et aménagements que les différents acteurs de ces *systèmes.* L'accent est graduellement porté sur la question de la sécurité des barrages. Les principaux risques sont évoqués puis détaillés dans un troisième temps à travers l'accidentologie du domaine. De la *perception sociale des risques* aux considérations techniques et réglementaires nous nous attachons à préciser l'état actuel des connaissances et pratiques de *sûreté hydraulique*, notamment chez EDF. Ces considérations se concluent sur l'intérêt de prendre en compte les dimensions humaines et organisationnelles dans les démarches de sûreté, poursuivant et développant des démarches récemment mises en place par les différents acteurs et leurs organisations (administratives et privées).

1.1.1. Enjeux techniques, enjeux sociaux et fonctionnement des barrages

Cette première section est consacrée à définir et présenter les barrages sur le plan technique, structurel et fonctionnel. Ces éléments normatifs mettent en avant une diversité importante des types d'ouvrages, de leurs procédés de construction et de leurs fonctions. En intégrant la Division Production et Ingénierie Hydraulique (DPIH) d'EDF, j'ai très tôt entendu dire *« chaque barrage est un cas particuli*er ». A une échelle *mésoscopique* il faut admettre que c'est une vérité. La standardisation, pour un ensemble de raisons qu'il ne nous appartient pas d'approfondir ici, ne fait pas partie de l'histoire (sinon très récente) de l'hydraulique[15]. Nous allons donc nous attacher à décrire des grandes familles d'objets techniques – les considérations humaines et organisationnelles s'y grefferont progressivement dans la suite de cette thèse.

Le lecteur qui serait familier avec le *monde des barrages,* s'il n'est pas à la recherche de quelques statistiques *actuelles*, se reportera directement à la section 0 sur les accidents.

Barrages, digues : une première distinction

On peut définir un *barrage* comme un ouvrage artificiel qui s'oppose au cours naturel de l'eau afin d'en réguler le débit et/ou de créer un stock d'eau exploitable, appelé *retenue*. Le Décret 2007-1735 du 11 décembre 2007 définit, en droit français, les barrages comme des ouvrages permettant de former un plan d'eau et les distingue des digues, des ouvrages permettant de protéger une population ou des biens contre les submersions :

[15] Des raisons techniques, économiques et historiques contribuent à expliquer ce fait. Elles sont exposées de manière détaillée et documentée par Pierre Gérard dans *L'épopée hydroélectrique d'EDF* (Gérard, 1996).

- les barrages sont les ouvrages pour lesquels il est possible de déterminer deux critères, la hauteur de l'ouvrage, et le volume de l'eau stockée à l'amont de l'ouvrage ;
- les digues sont les ouvrages pour lesquels il est possible de déterminer deux critères, la hauteur de l'ouvrage et en l'absence de volume d'eau stockée à l'amont de l'ouvrage, la population protégée à l'aval. (MEDAD, 2007)

Dans cette thèse, nous nous attacherons à la première famille d'ouvrages s'opposant à l'eau : les barrages.

La définition du décret, très ouverte, englobe des barrages de différents *types*, assurant différentes *fonctions*. Cette première forme de diversité tient notamment au fait que les barrages constituent l'une des plus anciennes *réponses techniques* au besoin humain de *domestication* de l'eau (pour les besoins de consommation et de protection puis d'exploitation).

Quelques considérations historiques

Le plus vieux barrage connu a été édifié dans l'actuelle Jordanie, près de Jawa, vers la fin du 4^{e} millénaire avant J.-C. En Egypte, les pharaons font construire des barrages pour l'alimentation en eau des villes (un barrage de 115 mètres de long fut construit en Égypte dans le Garawi vers 3000 av. J.-C.). Les connaissances techniques hydrologiques et météorologiques de l'époque ne permettaient pas à ces ouvrages de résister efficacement contre des phénomènes comme les crues des cours d'eaux sur lesquels ils étaient établis. Les travaux d'histoire et d'archéologie situent la première rupture référencée d'un barrage entre 2650 et 2465 av. J.-C. dans la région du Caire (voir les travaux de l'ingénieur suisse Schnitter-Reinhardt ; cités par Le Delliou, 2003). Ces ruptures et leurs impacts pourraient expliquer la longue période sans développement notable de barrages qui marque le début du premier millénaire. Le Moyen Âge Européen voit un regain d'intérêt pour ces ouvrages qui sont alors utilisés pour assurer l'alimentation des moulins hydrauliques.

Au XVII^{ème} siècle s'opère un développement conséquent des techniques de construction de barrages. En France, dans la région Midi-Pyrénées, le barrage de Saint-Ferréol (construit entre 1667 et 1675) qui assure l'alimentation en eau du Canal Royal du Languedoc (aujourd'hui le Canal du Midi) était, pour son époque le plus grand barrage du monde. En 1843, la France construit le premier barrage-voûte « moderne » pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Aix-en-Provence : le barrage de Zola (Goblot, 1967). Ce barrage, réalisé en maçonnerie, sert toujours aujourd'hui à réguler les crues mais il n'est plus exploité.

Le XX^{ème} siècle marque le développement significatif des barrages. Près de 800 000 barrages ont été construits, notamment entre 1930 et 1990, pour répondre à l'augmentation et la diversification des besoins en eau. Aujourd'hui, la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) recense plus de 58 000 grands barrages[16] dans le monde. Ces ouvrages correspondent à différents procédés de construction et ont différents usages.

[16] Ouvrages dont la structure dépasse d'au moins 15 mètres les fondations (CIGB, Lettre circulaire 1 443).

Principaux usages des barrages dans le monde

Nous avons défini un barrage comme un ouvrage permettant d'utiliser de l'eau. Le stock d'eau exploitable, constitué par interruption du cours naturel est appelé *capacité*. Cette capacité permet d'assurer une ou plusieurs *fonctions* : l'alimentation en eau potable, l'irrigation de cultures, la régulation des crues naturelles, le soutien d'étiage ou encore la production d'électricité. Il existe également des usages *secondaires* comme l'élevage piscicole, la pêche, les activités touristiques, la lutte contre les incendies, ou la création de polders[17].

Dans le monde, près d'un barrage sur deux (48%[18]) est destiné à l'irrigation (contre 17% pour l'hydro-électricité, figure 1). En France, environ 80% des barrages sont destinés (exclusivement ou non) à la production d'électricité. Dans cette thèse, il sera employé le terme *barrage* pour désigner les barrages hydroélectriques (sauf mention contraire).

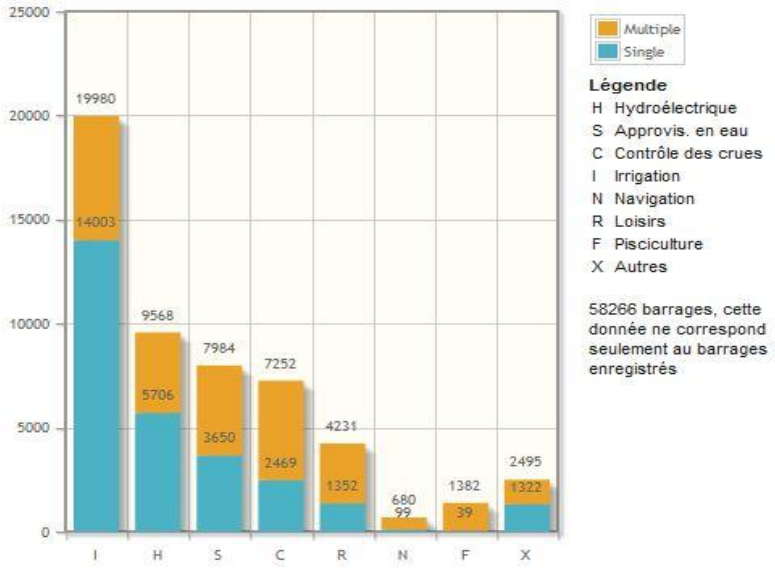

Figure 1 : Fonctions des grands barrages dans le monde. En bleu les barrages à fonction unique, en orange ceux à fonctions multiples. Les trois usages principaux des barrages sont l'irrigation des cultures, la production d'hydroélectricité et l'approvisionnement en eau (CIGB, 2015a).

Différents types de barrages et spécificités respectives

Il existe différents *types* de barrages, le choix dépend de décisions (*techniques* et *pratiques*) qui considèrent des critères comme le site d'implantation, les matériaux disponibles ou les fonctions que l'ouvrage devra assurer. Ces types sont caractérisés par leurs *techniques de construction,* réparties en deux catégories principales : les barrages *poids* (Figure 2a. et 2b.) et les barrages *voûte* (Figure 2c.). Afin de s'opposer au cours naturel, les ouvrages poids opposent leur masse aux forces de l'eau alors que les voûtes, elles, en reportent les efforts sur leurs appuis (latéraux et fondation).

[17] Avancées de terres artificielles permettant de construire sur des zones normalement immergées.
[18] Les statistiques utilisées dans cette section proviennent, sauf mention contraire, de la CIGB (2015a.) pour le *monde* et du CFBR (2015) pour la *France*.

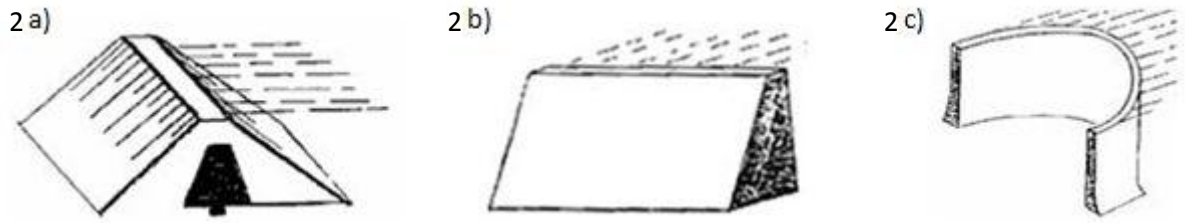

Figure 2 : Les trois principaux types de barrages. A gauche, le barrage poids-remblai (a), en son cœur, en noir sur le schéma, est représenté le noyau étanche. Au centre, le barrage poids-béton (b), possède une emprise au sol plus limitée du fait de la densité de ses matériaux plus élevée que les poids-remblai. A droite, le barrage voûte (c) est une technique de construction plus récente, économique et souvent considérée élégante ; il est toutefois réservé aux canyons ou aux vallées encaissées.

Les barrages poids sont caractérisés par leurs matériaux de construction qui distinguent les *poids-remblai* des *poids-béton*. Les poids-remblai (aussi appelés « *barrages (en) remblai* ») sont constitués de matériaux naturels meubles, souvent disponibles à proximité du chantier, plus ou moins fins (terre, enrochements). Relativement simples de conception, ils représentent les plus anciens et nombreux ouvrages avec 70% des barrages existant dans le monde. D'un point de vue structurel, ils peuvent être *homogènes* (constitués de matériaux suffisamment étanches comme des argiles, marnes ou limons) ou bien posséder un *noyau étanche,* épaulé par des *recharges* plus perméables. Les barrages poids-béton (aussi appelés « *barrages poids* » par abus de langage) peuvent être construits en enrochements (maçonnerie), en béton conventionnel ou, pour les plus récents, en béton compacté. Ces derniers ont une masse plus importante que les barrages en remblai ce qui implique des contraintes géotechniques sur le sol de fondation. Ils présentent toutefois une emprise au sol plus faible en raison de leur profil asymétrique (voir Figure 2b). Qu'ils soient en remblai ou en béton, la construction de barrages poids nécessite une grande quantité de matériaux de construction (plus ou moins onéreux), de plus ces barrages occupent une surface au sol plus importante que les barrages voûte. Ils présentent l'avantage de pouvoir être construits sur de grands linéaires et sont donc généralement implantés dans de larges vallées ou lorsque les matériaux de construction sont abondants et facilement accessibles localement. En 2015, le record du plus haut barrage du monde est détenu par le barrage en remblai de Nourek[19] (culminant à 304 mètres au-dessus du terrain naturel).

Les barrages voûtes sont généralement construits en béton armé (les plus anciens sont en maçonnerie) mais ils n'opposent pas leurs poids, trop faible, à la force de poussée de l'eau. Ils utilisent leur courbure en voûte, mono ou bidimensionnelle suivant les axes horizontaux et verticaux, toujours orientée vers l'amont. Une voûte reporte en effet mécaniquement la pression qu'elle reçoit sur ses appuis latéraux. Ce fonctionnement permet, moyennant des calculs complexes et un dimensionnement précis, de construire des ouvrages plus fins (ce qui permet notamment d'économiser matériaux de construction et coûts associés). Ce type de barrage induit des contraintes géologiques et géotechniques strictes pour la construction (vallée étroite, appuis rocheux et fondation de *qualité*).

Il faut enfin mentionner l'existence de barrages à *voûtes-multiples* et des barrages à *contreforts*. Ces ouvrages, peu représentés (environ 5% des barrages dans le monde), permettent de combiner différentes propriétés physiques et donc de bénéficier des économies de matériaux des voûtes avec la capacité d'implantation dans des larges vallées. Les barrages de Daniel-Johnson au Québec

[19] Barrage construit au Tadjikistan, travaux achevés en 1980.

(voûtes-multiples) ou de Roselend en France (mur à contreforts associés à une voûte dans la gorge latérale) en sont l'illustration de ces ouvrages (regroupés dans la catégorie des barrages *mixtes*) implantés en large vallée (Figure 3).

Figure 3 : Le barrage de Daniel-Johnson (à gauche) mesure 1 314 mètres de long et présente 13 voûtes, une principale au centre et 6 secondaires de chaque côté. Le barrage de Roselend (à droite) combine une voûte centrale et une série de contreforts pour une longueur de 804 mètres (libre de droit).

Le Tableau 1 propose la synthèse des différents types de barrages que nous avons évoqués. Il met en regard leurs matériaux constitutifs et leurs avantages et inconvénients respectifs. Ces premiers éléments étant intéressants pour éclairer (en partie, nous le verrons) les choix faits dans les différents projets et les cas de catastrophes et d'accidents.

Tableau 1 : Synthèse : principaux types de barrages, matériaux constitutifs, avantages et inconvénients (techniques, structurels et économiques).

Type	Matériaux	Avantages	Inconvénients
Poids-remblai	Terre compactée avec présence ou non d'un noyau étanche, enrochements.	Simple de conception, matériaux économiques, convient aux larges vallées.	Sensible aux séismes et aux débordements, large emprise au sol.
Poids-béton	Béton, maçonnerie.	Plus robuste que les poids-remblai et emprise au sol réduite.	Exige une très grande quantité de matériaux souvent coûteux.
Voûte	Béton (maçonnerie pour les plus anciens)	Résistant à la charge et à la sur verse. Economique en matériaux de construction.	Exige d'excellents matériaux de fondation et d'appui. Calculs complexes.

Les barrages étant principalement voués à des fonctions plus *complexes* que la simple rétention d'eau, sont constitués en plus du *mur* (en terre ou en béton) d'organes et d'ouvrages annexes, fait particulièrement vérifié dans le cas des barrages hydroélectriques.

De la retenue à la turbine : les ouvrages annexes

Au barrage (composante génie-civil) sont généralement associés des organes nécessaires à sa sécurité et à son fonctionnement productif. On trouve, en premier lieu, les ouvrages qui permettent d'assurer l'évacuation des crues, le contrôle du niveau de la retenue et de sa sédimentation (par les alluvions).

Le passage des crues peut-être assuré par des évacuateurs de surface, par des vannes de demi-fond ou de fond. Les évacuateurs de surface comportent un seuil (libre ou vanné, caractérisé par sa cote exprimée en mètres NGF[20]) suivi d'un coursier (ex : saut de ski) permettant de restituer l'eau à l'aval. Les coursiers ont pour but de protéger l'aval immédiat du barrage d'un creusement par érosion liée à l'eau en dissipant son énergie ou en la déportant.

La disposition, la forme de ces ouvrages varient en fonction du site (géologie, topographie) et du type de barrage[21], ils peuvent se situer à même l'ouvrage ou être séparés de celui-ci. Les évacuateurs de demi-fond ou de fond, vannés, permettent, outre le contrôle des crues, de contrôler le premier remplissage de l'ouvrage, de réaliser des *chasses* périodiques des sédiments de la retenue et de réaliser une vidange exceptionnelle rapide permettant de baisser la charge sur l'ouvrage si sa sécurité est menacée.

Figure 4 : Déversoir libre à crête circulaire de type « tulipe ». Déversoir à seuil libre. Evacuation d'eau par une vanne de vidange de demi-fond. (De gauche à droite ; source CFBR).

Les barrages peuvent être équipés d'autres vannes que celles de vidange de fond ou de celles équipant les seuils des évacuateurs de surface. Ces diverses vannes permettent d'assurer l'exploitation (vannes des conduites d'amenées, voir ci-dessous) et la sécurité des ouvrages. Elles sont qualifiées en fonction de leurs usages (vanne de vidange de fond, vanne de tête, de débit réservé) ou de leurs types (vanne segment, vanne wagon, vanne papillon…).

Directement liés au génie-civil, se trouvent également des ouvrages qui assurent l'intégration du barrage aux autres systèmes (naturels et humains) avec lesquels il interagit. Ces ouvrages autorisent le transit des poissons entre la retenue et le cours d'eau (passes, échelles ou ascenseurs à poissons), la continuité de la navigation (écluses). On trouve enfin les ouvrages nécessaires aux travaux de construction du barrage comme les galeries de dérivations, permettant d'assécher le chantier en dérivant le cours d'eau durant la période de construction (ces galeries sont bouchées lors de la mise en eau du barrage).

Mentionnons enfin les *ouvrages d'amenée* : canaux, galeries ou conduites forcées. Ils assurent la répartition de l'eau entre le barrage et les autres ouvrages d'exploitation (usine(s), circuits d'irrigation, etc…). Lorsque la topographie le permet, les canaux de dérivation sont utilisés (c'est notamment le cas pour les grands fleuves de plaines comme le Rhin ou le Rhône), ce sont des

[20] Le nivellement général de la France (NGF) est le réseau de repères altimétriques (ou *réseau altimétrique*) officiel en France métropolitaine. Abréviation : m NGF.

[21] Les ouvrages en béton offrent une structure porteuse pour le seuil et son coursier, les voûtes minces ont généralement un seuil déversant installé sur le couronnement et ne nécessitent pas de coursier, enfin les ouvrages en terre sont généralement associés à des évacuateurs en puits (raccordés à des galeries situées sous le barrage).

ouvrages à ciel ouvert. Les galeries sont creusées dans les massifs et sont souvent associées aux ouvrages destinés à la production d'hydroélectricité afin d'amener l'eau d'une retenue à une usine où elle sera turbinée. Enfin, les conduites forcées, en acier ou en béton, peuvent être souterraines, de surface ou aériennes en empruntant des ponts pour traverser des gorges ou croiser l'axe d'une route. Elles sont utilisées lorsque la qualité du rocher, la pression ou la topographie n'autorisent pas le recours aux galeries.

Le fonctionnement et types d'aménagements

Dans cette thèse, nous nous intéresserons principalement aux barrages destinés à la production d'hydroélectricité[22]. Le principe de ces installations est relativement simple : pour produire de l'électricité à partir d'une retenue d'eau, on utilise l'énergie potentielle de celle-ci (préalablement stockée). L'énergie potentielle est transformée en énergie cinétique (lors de la *chute* ou en exploitant directement le *débit naturel* d'un cours d'eau) puis en énergie mécanique (par injection dans une *turbine*) avant d'obtenir l'énergie électrique (par couplage *alternateur - transformateur*).

Les barrages destinés à la production électrique sont donc associés à des *centrales* ou *usines* dans lesquelles sont installés les équipements de production. Les usines peuvent être intégrées au barrage ou déportées (localement ou de plusieurs dizaines de kilomètres). Dans certains cas, plusieurs barrages (et retenues) sont associés à une seule usine. Chaque ensemble turbine - alternateur est appelée *groupe.* Une usine possède généralement plusieurs groupes, ils sont caractérisés par leur puissance exprimée en watts. L'ensemble retenue, barrage, ouvrages d'amenée, usine constitue un *aménagement* (voir Figure 5).

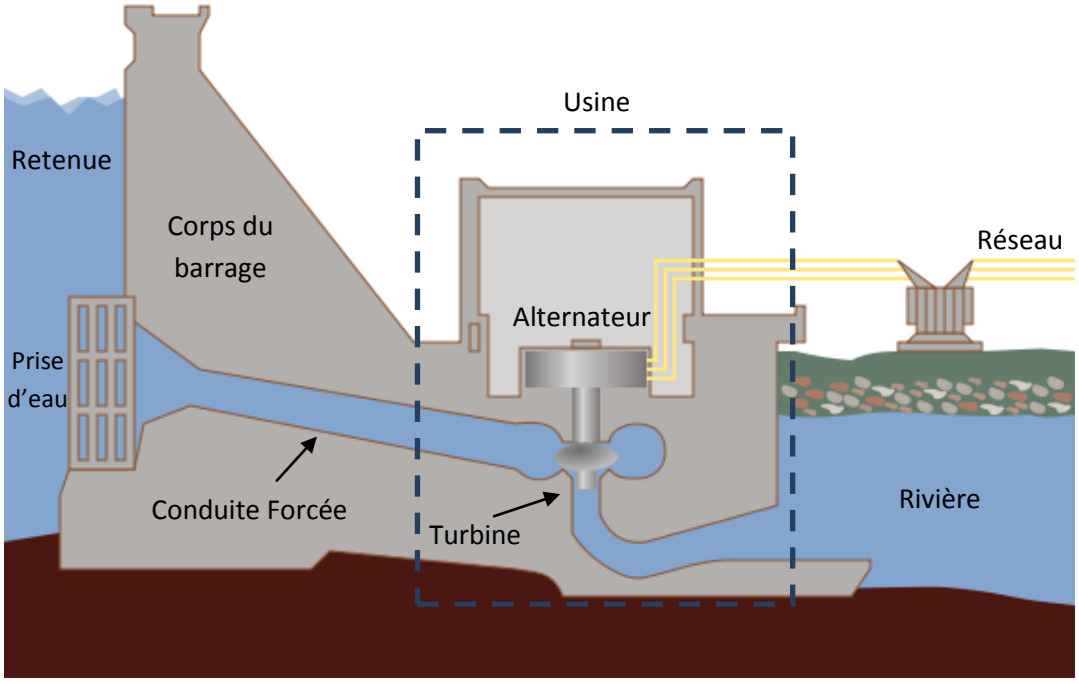

Figure 5 : Schéma de principe d'un aménagement. Dans cet exemple, l'usine est intégrée au barrage (on parle de barrage usine), ce n'est pas toujours le cas et l'usine peut être située à plusieurs kilomètres de la retenue. Une fois turbinée, l'eau est restituée à l'aval (libre de droit).

[22] Les travaux présentés étant relatifs à la mise en place d'une démarche *facteur humain* dans l'unité en charge de l'hydroélectricité dans l'entreprise EDF.

On distingue trois grands types d'aménagements : les aménagements de chute, les aménagements au fil de l'eau et les aménagements de pompage-turbinage (ou STEP).

Les aménagements de haute chute comportent des barrages *capacitifs* (qui créent une retenue d'eau), on utilise la *chute* (caractérisée par sa hauteur) de l'eau via l'ouvrage d'amenée (généralement une *conduite forcée*) vers l'*usine* où l'électricité est produite. Les aménagements *au fil de l'eau* ne possèdent pratiquement pas de retenue, ils exploitent (turbinent) le débit du cours d'eau sur lesquels ils sont implantés, ce débit doit être assez important et relativement régulier (c'est le cas, par exemple, des usines du Rhin). Enfin, il existe des *stations de transfert d'énergie par pompage* (STEP), ces aménagements fonctionnent à l'aide d'un dispositif réversible *pompe-turbine* qui transfère de l'eau d'un bassin « bas » vers un bassin « haut ». Ce transfert est fait au gré du surplus de production d'autres sources d'électricité (notamment nucléaire) pour la turbiner lors des périodes de forte demande. Nous développons plus loin le fonctionnement et l'intérêt de ces aménagements.

Considérations générales sur les risques associés aux barrages

Quels que soient la fonction ou le type d'un barrage, il s'oppose par définition au cours naturel de l'eau. Or, l'eau poursuit toujours son écoulement soit au travers du barrage, soit autour de lui, en dessous ou au-dessus (surverse). Elle pénètre la terre et à l'échelle microscopique, le béton. Ce phénomène naturel doit être pris en compte pour éviter d'exprimer sa manifestation la plus radicale : la ruine de l'ouvrage. Les mécanismes de ruptures dépendent des types d'ouvrages. Les ouvrages en matériaux meubles subissent des phénomènes d'érosion interne ou externe lorsqu'ils ne sont pas (ou le plus souvent mal) protégés contre la percolation de l'eau ou contre le phénomène de sur-verse. Les ouvrages en poids-béton subissent la pression (orientée amont-aval) de l'eau pouvant menacer leur stabilité (glissement, basculement) et la sous-pression (orientée verticalement, de bas en haut). Enfin, les barrages voûtes qui reportent les efforts de l'eau sur leurs appuis conduisent à la sollicitation de ceux-ci (les appuis latéraux et les fondations). La défaillance des appuis qui peut conduire à la destruction de l'ouvrage, indépendamment de sa fiabilité intrinsèque[23].

La rupture totale et rapide d'un barrage est considérée comme *risque technologique majeur*. La quantité d'eau subséquemment libérée a un potentiel destructeur considérable (fonction du volume de la retenue, du profil de la vallée et d'un ensemble complexe d'autres paramètres). Ce phénomène s'appelle *onde de submersion*. Celle-ci a un impact sur les populations (mort par noyade ou ensevelissement, destruction de l'habitat, des axes de communications), les biens (y compris, d'autres barrages qui seraient situés à l'aval) et l'environnement (destruction de la faune et de la flore par l'eau, pollutions induites par la destruction de sites industriels, …).

Il est également possible que les barrages portent atteinte aux personnes, aux biens ou à l'environnement suivant d'autres mécanismes dont l'intensité est moindre mais la fréquence d'occurrence plus élevée. De manière générale, ces risques sont liés à une non maîtrise de la cote à l'amont de l'ouvrage (exhaussement du plan d'eau de la retenue induisant, par exemple, des inondations ; baisse trop rapide générant des instabilités des versants de la retenue) ou du débit relâché à l'aval (crues artificielles et rapides en dehors des crues naturelles ou aggravation de ces dernières). Ces non-maîtrises peuvent être le fait de problèmes techniques (par exemple, rupture d'une vanne) ou humains (par exemple, ouverture accidentelle d'une vanne).

[23] Voir, par exemple, l'accident du barrage de Malpasset (1.1.3).

Il faut enfin ajouter que de son projet, ses études de faisabilité, sa réalisation, sa mise en eau, son exploitation et sa maintenance, *le barrage* est un objet (ou plutôt, un *système*) d'une grande complexité. La gestion de celle-ci sollicite le facteur humain en permanence qui intègre donc la réflexion sur les risques en tant qu'élément de sécurité et/ou de danger. Les gestionnaires de ces installations devraient donc être en veille permanente quant aux dysfonctionnements *prévisibles* et aux phénomènes *imprévisibles* (qui se divisent en *phénomènes exceptionnels* dont l'occurrence est extrêmement rare ou *phénomènes inconnus* des experts).

La connaissance et l'anticipation des risques liés aux barrages a conduit à la mise en place de normes de sécurité et de contrôle des barrages. Nous évoquerons ces considérations à la lumière des cas de catastrophes ou d'accidents (section 1.1.3).

1.1.2. Les barrages dans le monde et en France

Cette section a pour but de constituer une cartographie fonctionnelle des barrages et de leurs acteurs (publics ou privés). Elle débute par quelques statistiques globales permettant de situer *les barrages* dans *le monde*. Bien vaste entreprise qui n'est qu'abordée, à travers des considérations tant économiques, environnementales ou de sécurité. Nous décrivons ensuite les principaux acteurs industriels de l'hydroélectricité en Europe et plus particulièrement le cas français d'EDF-DPIH. Enfin, les principales dispositions réglementaires de la sécurité des barrages en France (textes, services de contrôle de l'Etat) sont évoquées.

Des barrages largement répartis

La Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) propose un classement des pays en fonction du nombre de barrages dont la structure dépasse le terrain naturel d'au moins quinze mètres[24] qu'ils possèdent (ou qui constituent leur *parc hydraulique*). Les cinq premiers pays de ce classement sont :

- la Chine (23 800)[25],
- les Etats-Unis d'Amérique (9 200),
- l'Inde (5 100),
- le Japon (3 100)
- et le Brésil (1 300).

A titre d'information, la France (713) est douzième dans ce classement. Notons qu'il ne permet pas de dégager de tendance d'ordre économique (ex : barrages dans les pays émergents) ni géomorphologiques (ex : barrages dans les pays de montagne) et renforce donc la diversité « des barrages » que nous avions préalablement établie sur des critères techniques (types et fonctions).

[24] CIGB, Lettre circulaire 1 443.
[25] Selon les critères et la base CIGB mais 87 151 selon le *Nanjing hydraulic research insititute* (Dadan & Lei, 2011).

Avenir de l'hydraulique, irrigation et hydroélectricité au XXI^{ème} siècle

Les statistiques mondiales indiquent toutefois que les barrages les plus représentés sont en remblai et destinés à l'irrigation des cultures, à l'approvisionnement en eau et au contrôle des crues. Selon la CIGB, les terres irriguées produisent aujourd'hui 40 % des récoltes et 30 % des emplois dans les régions rurales. Les données relatives à la croissance démographique amènent à prédire une nécessaire augmentation de la capacité de production agricole, d'irrigation et donc, du nombre ou de la performance des ouvrages permettant la gestion de la ressource eau. La CIGB estime que *« 80 % de la production additionnelle de nourriture en 2025 viendra de terres irriguées. Même avec la diffusion des méthodes de conservation de l'eau et les améliorations des techniques d'irrigations, la construction de réservoirs supplémentaires sera nécessaire »* (CIGB, 2015b). Il existe donc de nombreux projets de développement des barrages dans de nombreux pays.

Si les défis techniques que posent ces projets sont aujourd'hui globalement appréhendés, leurs commanditaires sont de plus en plus avertis[26] d'autres problématiques. Les retenues des barrages génèrent des déplacements de population qui peuvent s'accompagner de modifications profondes dans les dynamiques socioéconomiques des régions concernées : arrivée du barrage et de ses *bienfaits* mais privation de terres arables, par exemple. Les comparaisons internationales mettent en lumière d'importantes hétérogénéités dans les investissements liés à ces aspects.

Le barrage *des Trois Gorges*[27] sur le Yangzi Yang en Chine, avec un lac de retenue d'environ 600 km² est à l'origine du déplacement d'1,2 million de personnes (Terminski, 2013) sans maîtrise particulière des impacts sociaux (ou plus exactement avec une maîtrise *autoritaire*, qui semble la norme en Chine). D'autres pays (notamment d'Europe, d'Amérique du Nord) ont amélioré, au cours du XX^{ème} siècle, l'accompagnement des expropriés des barrages. Ils font aujourd'hui figure d' « *exemple* [comme sur] *le barrage de Nam Theun II, au Laos* [avec] *un plan de modernisation des zones d'accueil (écoles, eau potable, électrification) et l'accompagnement vers de nouvelles activités économiques* » (Faure & Maisonabe, 2012). Ces mesures resteraient à interroger de manière approfondie en termes de *subjectivités* entre culture sociotechnique et cultures traditionnelles, rurales etc. (des vallées montagneuses européennes aux forêts du Brésil ou du Vietnam). Ce n'est néanmoins pas l'objet de cette thèse.

Si certains pays intègrent les problématiques sociales (développement économique, déplacement des populations) et environnementales (constructions de passes à poissons, réalisation de *chasses sédimentaires*, etc.), il s'agit souvent de pays considérés *développés*. Or, le nombre de sites pouvant accueillir[28] des ouvrages est nécessairement limité et tendrait à une relative stabilité dans ces pays. Ils optent donc pour l'exportation de leurs expertises à l'international et pour une *optimisation* des installations existant sur leur territoire (diversité des fonctions, niveau de sécurité à travers la maintenance et les modifications, productivité et rendements, impacts environnementaux, …).

[26] Entre autres travaux sur la question, l'anthropologue Armelle Faure a mené pour le compte de la Banque Mondiale des études dans une vingtaine de pays sur les impacts sociaux des grands barrages.

[27] *Barrage record avec 22 500 MW de puissance installée (soit l'équivalent d'une vingtaine de tranches de centrales nucléaires). Cet aménagement occupe la première place du classement, toutes énergies confondues, des 100 plus importantes centrales énergétiques mondiales (consultable en ligne : www.industcards.com).*

[28] Pour accueillir un barrage, l'éligibilité *technique* n'est pas la seule discriminante. Le choix du site est également lié à des problématiques sociales, environnementales et de rentabilité économique.

La rentabilité économique est une variable importante dans le domaine énergétique et l'hydraulique ne fait pas exception. Cette rentabilité est le fait de la production (génération de profits) et du niveau de sécurité (éviter les coûts des accidents). L'aménagement d'un nouveau site est parfois *techniquement* possible mais *économiquement* impossible (en raison du coût des travaux, de l'exploitation et du rendement espéré, du coût des compensations socio-environnementales, etc.). La qualité de la roche et la morphologie d'une vallée ne suffisent pas, il faut encore que l'hydrométéorologie, les débits, les hauteurs de chute, l'accessibilité, les aménagements, les études environnementales, la politique énergétique, industrielle et une longue liste d'autres facteurs rendent l'implantation non seulement possible mais souhaitable. On peut donc considérer, à la lecture croisée de ces critères, que certains pays ont un parc hydraulique « saturé » (c'est notamment le cas de la France).

Ces pays ont néanmoins à répondre soit à l'évolution de la demande en énergie, soit à une augmentation des attentes socio-environnementales (notamment en matière de dépendance aux énergies fossiles ou d'émission de gaz à effet de serre). Ils peuvent dès lors investir dans l'optimisation des aménagements existants. L'optimisation doit s'entendre au sens le plus large possible incluant le redimensionnement ou l'ajout d'ouvrages annexes permettant la maîtrise des impacts environnementaux (ex : passes à poissons[29]), la modification des modes d'exploitation des ouvrages (débits restitués en aval pour diminuer l'impact du barrage sur l'écosystème du cours d'eau, lâchers de sédiments, etc.) et enfin, modification des matériels de production (optimisation du rendement des usines). La notion d'optimisation s'applique souvent aux centrales des ouvrages hydroélectriques. En effet, ces usines représentent une capacité mondiale combinée de 675 000 mégawatts et produisent 2 300 TWh (soit près d'un quart des besoins mondiaux). Pour de nombreux pays, l'hydroélectricité est la première source d'électricité. En 1998, les usines hydroélectriques de Norvège ou de République Démocratique du Congo ont produit 99% de l'électricité du pays (CIGB, 2015a). L'optimisation du rendement des centrales est dès lors une problématique partagée à grande échelle.

Le parc Français : type et fonction des ouvrages

Les barrages français[30] obéissent à la répartition des types observée dans le monde : les principaux types sont les poids-remblais (33 %), les poids-béton (25 %) puis les barrages voûtes (15 %). L'*épopée*[31] de la construction des barrages français s'étend de la fin de la seconde guerre mondiale (notamment grâce aux plans de relance) jusqu'à la fin des années 1980 (Tableau 2). Le rythme de construction en métropole a fortement diminué depuis la fin des années 1990.

Le dernier grand barrage français a été inauguré par EDF en Corse en 2008, il s'agit du barrage de Rizzanèse.

[29] Ouvrage annexe permettant aux poissons de « franchir » le barrage. Il en existe plusieurs types.

[30] Barrages de plus de 15 mètres de hauteur sur fondations (N = 558). Ce seuil est largement discriminant, il existe en France plusieurs dizaines de milliers de petits barrages (hauteur entre 2 et 15 mètres) dont la majorité est constituée d'ouvrages en terre utilisés pour l'irrigation.

[31] En référence au titre de l'ouvrage « *l'épopée hydroélectrique de l'Electricité de France* » (Gérard, 1996).

Tableau 2: Années de mise en service des barrages français (h > 15m). Plus de 60 % des grands barrages ont été construits et mis en service entre 1945 et 1990 (CFBR, 2015).

Année de mise en service	Pourcentage du parc Français
Antérieure à 1850	1 %
1850 – 1900	5 %
1901 – 1930	8 %
1931 – 1950	11 %
1951 – 1970	30 %
1971 – 1990	29 %
1991 – 2000	10 %
Postérieure à 2000	6 %

Les 558 « grands barrages » du parc Français servent à la production d'hydroélectricité (pour 50 %, exclusivement et 80 % si l'on considère les ouvrages à fonctions multiples) puis à l'irrigation et à l'alimentation en eau (respectivement 19 et 18 %). Le territoire français comporte en réalité plusieurs milliers d'ouvrages hydrauliques (voir carte Figure 6 dont la grande échelle donne à mesurer une forme de saturation) dont certains ne possèdent aucun usage connu[32]. A titre d'exemple et d'ordre de grandeur, en ce qui concerne ces barrages inférieurs à 10 mètres, les Directions départementales de l'agriculture et de la forêt ont recensé plus de 1300 ouvrages non concédés dans le Tarn et près de 3000 dans le Gers (Kert, 2008).

Figure 6 : Territoire saturé. Cette carte représente l'ensemble des barrages répertoriés en France (digues, écluses, et autres « obstacles à l'écoulement ») sans critère de hauteur (consultable en ligne sur le site CARMEN du Ministère de l'Environnement).

Les opportunités de développement de nouveaux aménagements étant très faibles, la France s'oriente vers une optimisation de son parc existant. Ainsi, la modernisation des installations (amélioration des rendements énergétiques des usines, des capacités de stockage des retenues, …) devrait générer une augmentation de 3 TWh de la production annuelle d'hydroélectricité d'ici 2020[33].

[32] Ou plutôt, dont l'usage a été « oublié », ainsi souvent que les données de dimensionnement, les plans de construction, etc… Ce qui pose, évidemment, des questions de sécurité et le cas échéant, de responsabilités.

[33] Engagement du Ministère du Développement Durable en application de la directive européenne 2009/28/CE (23/04/2009) relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, et

En effet, bien que la période de développement soit passée, l'hydraulique et particulièrement l'hydroélectricité demeure une énergie au centre des intérêts économiques, écologiques et stratégiques pour les pays occidentaux et notamment la France.

Réglementation française : le découpage en classes

Les classes de barrages sont créées par décret du 11/12/2007[34], le parc hydroélectrique français est alors divisé en 4 catégories ou *classes de barrages,* en fonction de leur hauteur au-dessus du terrain naturel (H) exprimée en mètres et du volume (V) de leur retenue (exprimée en millions de m^3) et $C = H^2 \times V^{0,5}$ (Tableau 3).

Sur décision du Préfet, le classement dérivant de ces critères objectivés, peut être ajusté si des enjeux de sécurité le justifient.

Tableau 3 : Classes d'ouvrages en France, selon le décret 2007-1735 de 2007.

Classe	Critères	Nombre de barrages[35]
A	H ≥ 20 m	310
B	H ≥ 10 m et C ≥ 200	320
C	H ≥ 5 m et C ≥ 20	1300
D	H ≥ 2 m	Plus de 50 000

Les digues de protection contre les inondations sont également réparties en classes, en fonction de la hauteur H de la digue associée à l'importance de la population P protégée par la digue.

La notion de classes de barrages est, notamment, importante dans le cadre des EDD. Nous reviendrons en détail sur ces études réglementaires qui constituent le cadre des travaux de conception d'un outil d'évaluation du risque lié au facteur humain (ECHO), présentés dans la troisième section du second chapitre.

Caractéristiques notables de l'hydroélectricité

Nous avons établi que les ouvrages hydrauliques constituent un des éléments clefs du développement et de la gestion des ressources en eau d'un pays. Dans le contexte actuel de croissance démographique (moyenne de 90 millions d'individus par an), la demande en eau et en énergie augmente régulièrement à l'échelle mondiale.

L'hydroélectricité présente plusieurs avantages. C'est une énergie renouvelable qui ne génère pas de rejets carbonés lors de l'exploitation, les barrages constituent la principale source d'énergies renouvelables au monde (plus de 90%). C'est une énergie qui peut être produite localement à l'aide de micro installations (petites turbines permettant d'exploiter des cours d'eau à faible débit). Ainsi, on y recourt dans des régions qui ne bénéficient pas de réseaux de transport d'énergie performant (c'est notamment le cas au Népal, dans les contreforts de l'Himalaya).

du Grenelle de l'environnement pour le développement des filières d'énergie renouvelable. Pour un objectif global de 23% d'électricité renouvelable dans la consommation d'électricité en 2020.

[34] Modifié par le décret n° 2015-526 du 12 mai 2015.

[35] Dont 250 (classe A et B) concédés à EDF.

Pour les pays industrialisés, l'hydroélectricité présente l'intérêt d'être une énergie stockable. L'hydroélectricité peut en effet être employée comme variable d'ajustement des pics et des creux de consommation réelle. L'électricité ne se stockant pas, la production électrique doit à chaque instant être exactement égale à la consommation or, celle-ci varie à l'échelle des saisons mais aussi des journées. Lors des pics de consommation, l'apport de puissance est réalisé principalement par l'hydraulique stockable des centrales de lac (Figure 7).

A titre d'exemple, la puissance hydroélectrique française, répartie sur 447 centrales pour un total de 25,4 GW possède 12 GW de *puissance de pointe.* Celle-ci est mobilisable en quelques minutes et s'avère indispensable à la sécurité du système électrique, pouvant permettre d'éviter les *black-out.* Lors de la panne électrique qu'a connue l'Europe de l'Ouest le 4 novembre 2006, une puissance hydroélectrique additionnelle de 5 GW a été produite en France en quelques minutes et a permis de contribuer à éviter une panne européenne majeure.

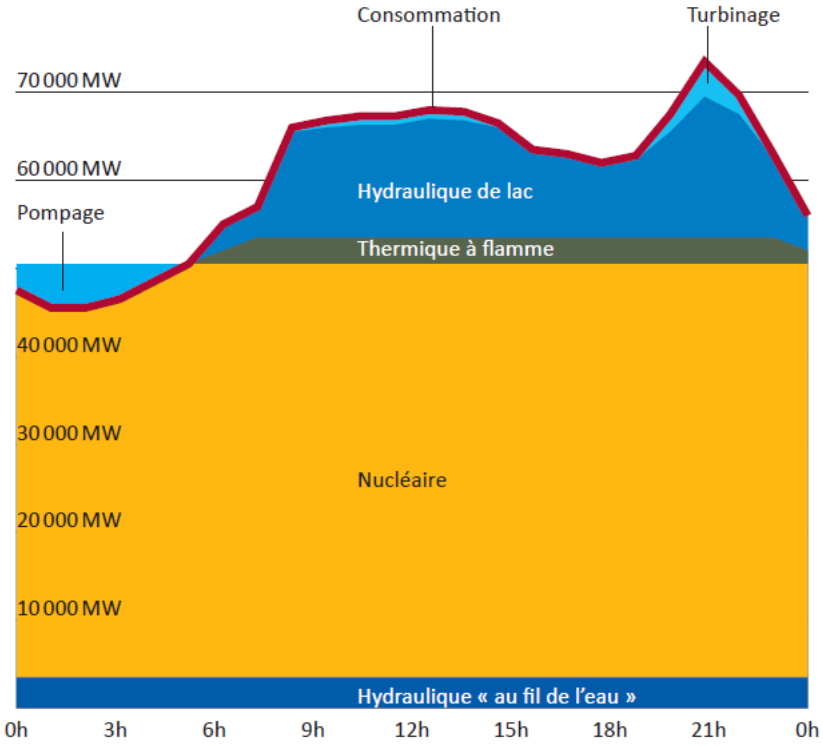

Figure 7 : Courbe et répartition type de la consommation et de la production électrique sur une période de 24 heures en France (en hiver). La production nucléaire est maintenue constante pour des raisons économiques et techniques, elle complète le faible potentiel d'hydraulique « au fil de l'eau ». La variable principale d'ajustement est l'hydraulique de lac. L'ajustement précis de l'offre à la demande est effectué par les installations STEP (pompage-turbinage). Elles permettent de stocker de l'eau dans un lac situé à une altitude supérieur à l'usine (stockage d'énergie potentielle). Lorsque la demande est basse (0h-6h) l'excédent de production nucléaire est utilisé pour pomper l'eau. En période de pics (21h) cette eau est turbinée pour produire de l'électricité. (Syndicat des Energies Renouvelables).

Acteurs politiques, économiques et techniques français et européens

En France, l'essentiel de la production d'hydroélectricité est assurée par trois acteurs : EDF (Electricité De France), la CNR (Compagnie Nationale Du Rhône, filiale du groupe ENGIE) et la SHEM (Société Hydroélectrique du Midi, filiale du groupe ENGIE).

EDF est un opérateur énergétique maîtrisant la production (EDF), la distribution d'électricité (ErDF) ainsi que les services aux clients (EDF Bleu Ciel). L'entreprise naît en 1946 suite à la loi de nationalisation des 1450 entreprises françaises de production, transport et distribution d'électricité et de gaz. D'établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), EDF devient société anonyme (SA) en 2004 avec l'ouverture de 70 % du marché français de l'électricité à la concurrence (l'ouverture totale du marché a suivi en 2007). EDF est aujourd'hui un groupe international avec près de cinquante filiales réunissant 158 500 collaborateurs et une production de 623,5 TWh dans le monde. Le groupe est le premier exploitant nucléaire mondial et le premier producteur d'énergies renouvelables européen. L'hydroélectricité est la première de ces énergies et est considérée comme une *énergie d'avenir* par EDF (Figure 8). A titre d'information, le chiffre d'affaires de l'entreprise s'élève à 73 milliards d'euros en 2014.

La Division hydraulique d'EDF est constituée de cinq Unités de Production (UP) et de deux unités d'ingénierie. EDF exploite ainsi un parc, composé de 239 *grands barrages* (dont 149 de plus de 20 m de haut) et 383 autres barrages. L'âge moyen des ouvrages est supérieur à 70 ans. 436 centrales (construites entre 1896 et 1996), un réseau de 1 131 galeries (soit un linéaire total de 1 480 km) et 604 canaux permettent l'exploitation. Enfin, le *domaine mécanique* est constitué de 500 conduites forcées (267 km) et de plus de 6 000 vannes de différentes tailles et fonctions (Batoufflet, 2014).

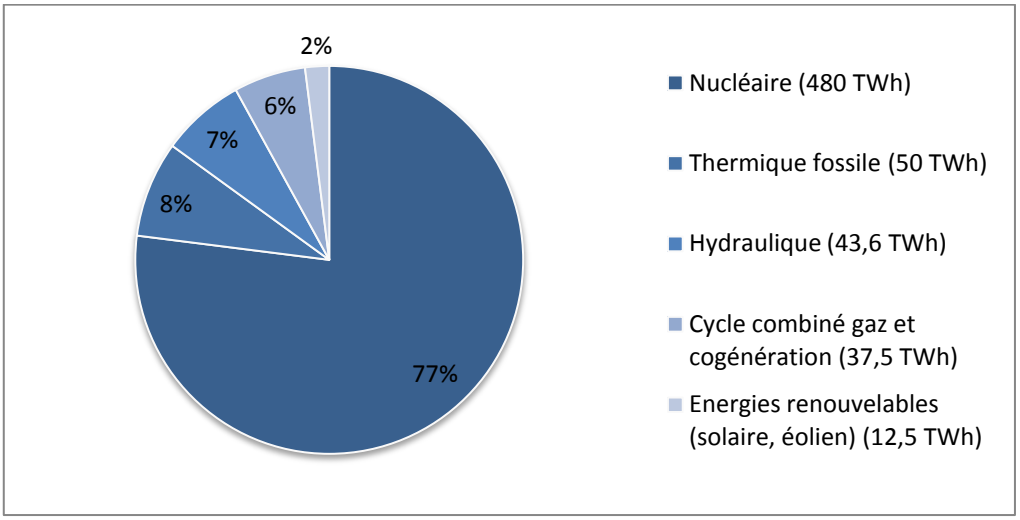

Figure 8 : Mix énergétique du groupe EDF en 2015 (d'après le site internet d'EDF)

Les unités d'ingénierie[36] regroupent des compétences en ingénierie de conception, de construction, de mesure, d'appui à l'exploitation et de conduite de projet. Le Centre d'Ingénierie Hydraulique (CIH) est l'unité d'EDF chargée des aspects hydrauliques de la production d'électricité, tant sur le plan national qu'international. Créé en 2000, il répond aux besoins de conception et de construction d'ouvrages hydroélectriques de production et assure également un appui technique à leur exploitation. Le CIH étudie et réalise également de nombreux aménagements dans le monde entier (Laos, Brésil, …).

Les UP assurent, quant à elles, la maîtrise d'ouvrage ainsi que l'exploitation des ouvrages et des usines. Elles sont réparties en cinq zones géographiques (Alpes, Sud-Ouest, Centre, Est et

[36] Le Centre d'Ingénierie Hydraulique (CIH) et la Division Technique Générale (DTG).

Méditerranée). Sur les 25,4 GW de puissance installée en France pour l'ensemble des producteurs, EDF SA possède 20,4 GW de puissance installée (dont 400 MW en Corse et DOM). EDF est donc leader Français (80 % de la puissance hydraulique totale en exploitation en France) et Européen sur le marché de l'énergie hydroélectrique. Si EDF est l'exploitant historique des concessions françaises, de récentes évolutions réglementaires ouvrent ces concessions à la concurrence européenne.

Afin de répondre à une injonction d'ouverture du marché de l'énergie de l'Union Européenne, la France a ouvert cinquante concessions hydroélectriques à la concurrence (totalisant 5300 MW soit environ 20% de la puissance du parc hydraulique français). Environ 4300 MW sont actuellement exploités par EDF, 750 MW par la SHEM (Société Hydroélectrique du Midi – ENGIE) et 200 MW portent sur de possibles suréquipements d'aménagements existants. D'ici 2020, 25 concessions seront ouvertes à la concurrence. Pour l'Etat, le renouvellement des concessions doit permettre de tirer le meilleur parti des installations sur les plans énergétiques (puissance installée, capacité de modulation), économiques (afin de tirer bénéfice de ces installations amorties) et environnementaux (énergie renouvelable non émettrice de gaz à effet de serre) à condition de limiter l'impact des ouvrages sur les milieux aquatiques. Trois critères de sélection s'imposent dès lors aux futurs concessionnaires : garantir l'efficacité énergétique de l'exploitation, assurer une gestion équilibrée de la ressource en eau, garantir au concédant les meilleures conditions économiques et financières. Les dossiers de consultation pourront en inclure d'autres, comme la sûreté.

Le groupe ENGIE (ex GDF Suez) se positionne sur le marché de l'hydroélectricité et se situe au 2ème rang des producteurs d'hydroélectricité de France avec 3800 MW de puissance installée. ENGIE produit ainsi 25% de l'hydroélectricité du pays à travers ses deux filiales :

- la SHEM exploite 58 usines hydroélectriques associées à 12 barrages (des Pyrénées au Massif Central). L'ouverture des concessions à la concurrence affecte toutefois 70% des installations de la SHEM.

- la CNR compte, elle, 19 aménagements hydroélectriques entre la Suisse et la Méditerranée tout au long du Rhône. Cette filiale a des ambitions de développement liées à l'obtention de concessions ouvertes à la concurrence et se positionne exclusivement sur les énergies « propres » en développant également des productions éoliennes et photovoltaïques.

On peut également mentionner les *entreprises locales de distribution* (ELD) qui peuvent aussi exploiter des moyens de production décentralisés et contribuer au développement des ressources énergétiques locales (centrales thermiques, centrales hydrauliques, éoliennes, etc.). Il existe aujourd'hui environ 160 ELD en France.

EDF a également des concurrents Européens. Le groupe norvégien Statkraft, premier producteur européen d'énergies renouvelables exploitant 225 centrales hydrauliques en Norvège, en Suède, en Allemagne, en Finlande et au Royaume-Uni. L'acteur autrichien Verbund, ayant racheté, en 2008, treize barrages allemands d'une puissance de 312MW. Ce dernier souhaite acquérir des actifs en France. Le groupe Allemand E.ON a pour objectif de produire 36% d'électricité issue de sources renouvelables en 2030. Il compte sur les barrages français pour y parvenir. Enfin, d'autres concurrents restent plus en retrait : l'italien ENEL (Ente Nazionale per l'Energia Elettrica), l'espagnol Iberdrola et le suédois Vattenfall. Il faut noter que la mise en concurrence concerne également l'ensemble des sous-traitants d'EDF qui verront leurs marchés profondément modifiés. Ces mises en

concurrence ne sont pas propres à l'énergie, beaucoup de secteurs (transport, logistique, ...) voient leurs positions historiques modifiées par la politique économique de l'Union Européenne.

Dans ces perspectives de turbulences et de regroupements sur le marché de la production électrique, la sécurité est et sera un avantage concurrentiel durable et le durcissement des normes pourrait profiter à un industriel tel qu'EDF. En effet, celui-là est à même d'intégrer au mieux les attentes administratives et citoyennes, quand il ne les a pas déjà devancées.

Les acteurs de la sécurité des ouvrages en France

Les DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) sont des services déconcentrés relevant du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE). Leurs missions, dont le contrôle des installations industrielles, sont exercées sous l'autorité du préfet de région ou de département. Les directeurs ainsi que les directeurs adjoints de chaque DREAL sont nommés par arrêté conjoint du ministre chargé du MEDDE et du ministre chargé du logement, après avis du préfet de région. Organismes administratifs relativement récents, les DREAL ont été créées par le décret n°2009-235 du 27 février 2009. Elles sont issues de la fusion de la direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement (DRIRE), de la direction régionale de l'environnement (DIREN) et de la direction régionale de l'équipement (DRE). La création des vingt-six DREAL s'échelonne entre le 1er janvier 2009 et le 1er janvier 2011.

Les DREAL ont pour vocation de permettre une approche transversale et intégrée des enjeux environnementaux, d'aménagement et du logement des territoires administratifs et géographiques qu'elles couvrent. Leurs missions sont par exemple, la lutte contre les conséquences du changement climatique, l'utilisation rationnelle de l'énergie et des énergies renouvelables, les risques et les enjeux santé-environnement, le développement durables et l'aménagement des territoires.

Les missions régaliennes des DREAL portent sur le contrôle et la sécurité : des activités industrielles, de la prévention des pollutions, du bruit, des risques naturels et technologiques et des risques liés à l'environnement, de la gestion des déchets. Le contrôle des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) figure au rang de ces missions. Pour le cas des ouvrages hydrauliques, les DREAL sont assistées par le Bureau d'Etudes Techniques et de Contrôle des Grands Barrages (BETCGB). Le BETCGB est une cellule technique centralisée qui se place en appui aux DREAL dans leurs missions d'instance de contrôle du niveau de sûreté des ouvrages hydrauliques en France. A ce titre, le BETCGB a rédigé un *guide de lecture des études de dangers* qui permet aux personnes chargées de l'inspection des barrages de mesurer la conformité et (une forme de) qualité des études de dangers produites par les responsables d'ouvrages hydrauliques (voir partie 1.2.2).

Il convient de noter qu'en tant qu'administrations, les DREAL sont soumises aux exigences d'ordre politique, à même d'influencer les acteurs ou les procédés organisationnels (e.g. Crozier, 1975)[37].

[37] On pourrait opposer à cette référence sa date. Celle-ci ne présuppose pourtant pas de son obsolescence. Il faut la considérer comme une illustration générique de propos sur les effets des organisations sur les hommes, appliquée au cas de « l'administration française ». Les exemples d'accidents illustrent malheureusement, à des époques et dans des pays différents, la pertinence d'une prise en compte de la relation de contrôle et de ses effets positifs et/ou négatifs dans la sécurité des ouvrages hydrauliques. Cette prise en compte suppose, dans sa plus simple expression, de nuancer un discours qui serait par trop *normatif*.

Nous éclairerons notamment ce propos à travers l'histoire de ces services (faite de fusion entre des services aux cultures et compétences très différentes, voir partie 1.2.1).

On peut enfin mentionner le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR), une association créée en 1926 afin de favoriser le progrès dans la conception, la construction, l'entretien et l'exploitation des barrages. Ce comité, composé de plus de 350 membres, remplit sa mission par l'échange entre ceux-ci et l'organisation annuelle de colloques techniques et de groupes de réflexion nationaux.

1.1.3. Accidentologie de barrages, les ouvrages à l'épreuve de la nature, de la technique et des hommes

> « Le barrage est certainement un type d'ouvrage dont la complexité est la plus grande et les risques associés les plus élevés. Son histoire [...] est caractérisée par l'imbrication extrême et les échanges permanents entre de très nombreux champs de la connaissance. [...] Elle est compliquée par les défaillances des organisations humaines. »
>
> (Bordes, 2010)

Nous avons présenté plusieurs caractéristiques des barrages (1.1.1.) ainsi que différentes contingences, exogènes à la dimension technique des ouvrages, qui jouent un rôle dans l'exploitation et la sûreté de ces ouvrages (économie, facteurs politiques, sociaux, environnementaux, etc. ; 1.1.2)

Dans cette partie nous présentons un ensemble choisi de catastrophes survenues sur des barrages. Ces accidents ont été sélectionnés, sans critère d'époque ou de nationalité des ouvrages, pour l'ampleur de leurs conséquences ou des apports de connaissances qu'ils ont tristement permis.

Dans un premier temps, nous abordons la question de la perception sociale des risques liés à ces ouvrages : si les barrages présentent des risques, sont-ils perçus comme dangereux ? Comment et pourquoi ? Il nous paraît fondamental de conduire cette réflexion pratique avant de revenir à des considérations techniques telles que les modes d'action de l'eau ou les vulnérabilités des différents types d'ouvrages, à même de conduire à une défaillance de tout ou partie du barrage. Nous présentons enfin trois catastrophes majeures liées à des barrages qui ont, chacune à leur manière, marqué l'ensemble des professionnels des barrages (de la conception à l'exploitation, en passant par la maintenance ou le contrôle réglementaire de sécurité). Ces grands accidents ne sont pas les seuls dignes d'intérêt, voire, ils sont insuffisants pour cerner l'ensemble des problématiques de ce que nous présenterons comme la sûreté hydraulique. Ainsi, nous complétons ces retours d'expériences par d'autres cas d'accidents ou d'incidents aux conséquences moins importantes mais diversifiant les enseignements.

Puisqu'ils révèlent l'articulation de défaillances techniques, organisationnelles et humaines, ces cas mettent en évidence l'intérêt (sinon le besoin fondamental) d'une approche pluridisciplinaire,

collaborative, des risques liés aux barrages : d'une culture technique des sciences de l'ingénieur vers une nouvelle approche augmentée des sciences humaines et sociales.

Perception des risques liés aux barrages

Les statistiques sont connues : le transport aérien tue moins que le transport routier[38]. Toutefois, certaines caractéristiques des accidents dans les domaines respectifs (nombre de victimes par accident, chances d'en réchapper, médiatisation, …) façonnent des représentations sociales différentes. Dès lors il est, pour beaucoup de personnes, plus « *risqué* » de prendre l'avion que de prendre la voiture. Georges Charpak illustre, non sans un soupçon d'humour noir, ce phénomène de perception *biaisée* (ou *irrationnelle*) des risques dans l'extrait suivant :

> *« Supposons que, contrairement à toutes les données disponibles, nous ayons des cigarettes absolument inoffensives à tout point de vue. Ces cigarettes d'un nouveau type n'ont strictement aucun effet néfaste sur la santé, à part un seul […]. Il se trouve que le procédé de fabrication est tel que, tous les 20 000 paquets de cigarette, il y en a un contenant une cigarette – une seule – un peu spéciale. Malheureusement spéciale. Il s'agit d'une cigarette explosive et sa puissance explosive est telle qu'elle vous arrache la tête.*
>
> *[…] Chaque paquet contient 20 cigarettes et il n'y a qu'un seul paquet sur 20 000 qui pose problème. Les risque est vraiment faible puisque un fumeur n'a donc qu'une chance sur 400 000 de se faire exploser la tête. […] Ce faible risque, mais à transition brusque, devrait amener beaucoup de fumeurs désirant garder leur tête sur les épaules à cesser de fumer.*
>
> *En France, environ 4 millions de paquets de cigarettes sont vendus par jour. Ce qui signifie que, avec cette nouvelle technique de fabrication, nous aurions chaque jour, environ deux cents personnes qui se ferait exploser la tête. Soit un peu plus de soixante-dix mille par an. […] Ce serait nettement moins que le nombre de décès annuels dus à la cigarette puisque en France le tabac fait un peu plus de cent mille morts prématurées par an.*
>
> *En d'autres termes, le risque de la cigarette explosive ne sera pas accepté alors que la perte en vies humaines est inférieure aux décès dus à la cigarette normale. »* (Charpak, 2002).

La perception des risques peut-elle donc avoir autant d'importance que d'autres variables comme la *gravité*, la *probabilité* ou la *fréquence* d'occurrence de ceux-ci ? Selon nous : oui. *A minima,* en ce que la perception influence les comportements. Le risque *est* représentation sociale. A une échelle plus large, sa perception (qui peut être amplifiée par les médias) peut influencer les responsables politiques et donc avoir une incidence sur la réglementation (Le Breton, 1995). Si la remarque introductive sur le domaine des transports semble triviale, notons qu'elle s'applique également au domaine de l'énergie : Three Mile Island, Tchernobyl, Fukushima ; Malpasset, Vajont, Grand Teton. Lequel de ces trios d'accidents évoque le mieux la notion de *risque industriel* ? Si les trois premiers accidents nucléaires sont connus du grand public, les trois accidents de barrages le sont moins. A qui le nom *Shimantan* évoque-il la rupture d'un barrage, le 8 août 1975 en Chine et ses 171 000 victimes estimées ; celui de *Vajont* la sur-verse d'un barrage, le 9 octobre 1963 (2 000 victimes) ? Dans l'imaginaire collectif, les barrages sont des ouvrages rigides et inertes. Liés à l'eau, source de vie et force calme, ils intègrent le paysage des montagnes et créent des plans d'eau permettant des

[38] Le nombre de victimes pour 100 millions de miles est, aux Etats-Unis, de 0,007 pour le transport aérien et 0,73 pour le transport routier (Savage, 2013).

activités de loisir. Ils sont enfin une source d'énergie considérée propre, par un amalgame discutable avec son caractère renouvelable.

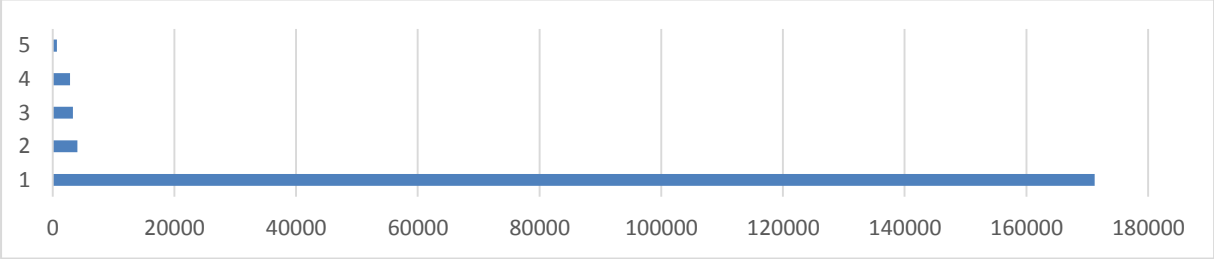

Figure 9 : Nombre de victimes liées à des accidents survenus dans le domaine énergétique de 1907 à 2007 (Sovacool, 2008)

Pourtant, « *de tous les ouvrages faits de main d'homme*, [les grands barrages] *sont parmi les plus meurtriers, lorsqu'ils se retournent contre lui.* » (Coyne, 1943, p. 3). La Figure 9 illustre ces propos. Dans cette section, nous aborderons les différentes leçons de l'expérience, relatives aux risques présentés par les barrages, soucieux d'expliciter les causes et mécanismes.

Bien entendu, l'objet de cette partie n'est pas de verser dans une forme de catastrophisme. De démontrer, à force d'exemples, que les barrages sont dangereux pour justifier la démarche qui motive cette thèse. Précisons toutefois qu'une tendance inverse pourrait être tout autant préjudiciable. A travers les cas d'accidents qui vont suivre, nous tenterons d'établir que la maîtrise des risques liés aux barrages est complexe dans le sens où elle nécessite la mobilisation de nombreux domaines sur le plan technique et que les organisations et les personnes qui exploitent ces ouvrages tiennent un rôle important de maîtrise ou de non-maîtrise. Ce à quoi s'ajoute enfin un public dont la représentation des risques liés à l'eau et aux barrages peut induire l'absence de vigilance[39], le contournement des démarches normatives (ex : interdictions d'accès). Ces faits renforcent l'intérêt d'une approche pluridisciplinaire des risques liés aux barrages : une approche d'ingénierie complétée par les sciences humaines et sociales[40].

Les modes d'action de l'eau

Avant d'aborder, à proprement dit, les grandes leçons de l'expérience, il est utile de partager quelques éléments relatifs aux modes de défaillances des barrages. En effet, les présentations d'accidents qui vont suivre sont relatives à des barrages de types différents, à des époques différentes, des pays et des climats différents, mettant en jeu des entreprises (donc des normes de construction ou de sécurité, des modes de contrôles, des cultures) différentes. La variété se décline ensuite dans les procédés naturels, techniques et humains. Cette variété, pour en saisir la finesse, fait donc appel à des connaissances dans des domaines aussi variés que : la géologie, le génie civil, la géotechnique, l'hydraulique, l'hydrologie, la mécanique, le contrôle commande, les télécommunications, la psychologie, l'ergonomie, la sociologie, la gestion (de la sécurité), la météorologie, la géographie, l'histoire, le droit.

[39] Il se trouve moins de gens enclins à aller pique-niquer aux abords d'une centrale thermique ou d'une raffinerie que sur un îlot asséché (mais submersible !) à l'aval d'une usine hydraulique.
[40] La collaboration et la convergence des disciplines sont deux thèmes développés dans le quatrième chapitre.

A un premier niveau, André Coyne[41] enseignait que *« les barrages sont justiciables des règles de stabilité et de résistance communes à tous les ouvrages, mais doivent aussi satisfaire à des conditions spéciales, tenant à la présence de l'eau. Le plus gros risque est là.* » (Coyne, 1943, p.4). L'eau a deux moyens mécaniques – qui peuvent se combiner - de mener à la ruine d'un barrage : l'un dynamique (vitesse), l'autre statique (pression).

La vitesse produit l'érosion externe ou interne[42] de l'ouvrage, les barrages en remblais sont donc vulnérables à la création de brèches dont la taille s'amplifie exponentiellement. Ils sont protégés, à la conception, par le recours à des zones étanches (noyaux internes ou parements externes) et des systèmes de drains (internes ou infra ouvrage) pour assurer un « guidage » de l'eau traversant le barrage.

La pression (pression interne, sous-pression) concerne les barrages en maçonnerie ou en béton[43]. L'eau sous pression peut faire bouger l'ouvrage d'amont en aval, le faire basculer ou pivoter. Elle peut également, en pénétrant par infiltrations, affecter la roche qui sert d'appui ou de fondation au barrage. La pression statique étant proportionnelle au niveau d'eau dans la retenue, la maîtrise des cotes de la retenue fait l'objet de considérations drastiques, notamment lors des crues, phénomène dont l'intensité peut être brutale et représenter un danger potentiel pour l'ouvrage en ajoutant à la pression statique une pression dynamique.

Ces deux modes d'action de l'eau (vitesse, pression) s'appliquent également à des degrés divers aux ouvrages annexes et matériels d'un barrage : vannes, conduites d'amenée, usine.

Les grandes leçons de l'expérience : des catastrophes qui ont marqué la profession

> « *Il est souvent arrivé que déjouant les prévisions des Ingénieurs ; ou, plus fréquemment tirant parti de leurs erreurs et de leurs négligences, l'eau soit venue à bout de l'obstacle qu'ils avaient dressé devant elle, causant presque toujours un désastre.* » (Coyne, 1943, p.4).

Les accidents de barrage, bien que moins connus du grand public que ceux d'autres domaines industriels, ont fait l'objet de récits et d'analyses (*a minima* techniques) détaillées. On trouvera dans la littérature spécialisée et les documents d'archive des récits de nombreux accidents survenus depuis le XIX^{ème} siècle. Comme le remarque l'ingénieur et historien spécialiste des barrages Jean-Louis Bordes : *«* [l'accident] *représente un cas extrême de pathologie qui traduit une défaillance majeure du savoir-faire des hommes de l'art dans une des étapes de conception ou de construction, ou dans l'exploitation et l'entretien du barrage. Ce peut être aussi la conclusion catastrophique, d'un*

[41] André Coyne est un ingénieur français, diplômé de Polytechnique et des Ponts et Chaussées. En 1928, il entame sa carrière dans l'hydraulique en devenant ingénieur en chef sur l'aménagement de la Haute Dordogne. Il concevra 70 barrages dans le monde (14 pays) et remettra à l'honneur la technique des barrages-voûtes en France. Il est notamment l'inventeur des déversoirs « en saut de ski », de procédés acoustiques d'auscultation ou d'ancrage des ouvrages par des tirants d'acier verticaux (précontrainte des bétons). Entre autres réalisations, il est le concepteur des barrages de Tignes, Roselend et, du barrage de Kariba (au Zimbabwe). Reconnu comme le maître incontesté en ce domaine, il se voit chargé du cours de grands barrages à l'École des Ponts et Chaussées. En 1935 il devient chef du service technique des grands barrages et, en 1946, président de la Commission internationale des grands barrages. Son œuvre globale est distinguée du grand prix d'architecture. En 1947, il fonde un bureau d'études d'ingénieurs-conseils, le Bureau Coyne & Bellier, qui exerce encore aujourd'hui.

[42] Aussi connu comme phénomène de *renard hydraulique*.

[43] Donc, les barrages poids-béton et voûte.

enchaînement de causes souvent mineures dont la conjonction était jusqu'alors inimaginable. Ces accidents rentrent dans la catégorie des risques technologiques majeurs, combinant d'ailleurs par le biais de l'hydrologie, l'effet de phénomènes d'origine naturelle et anthropique. » (Bordes, 2010).

Les études d'accidents de barrages ont, pour des raisons historiques et culturelles, souvent été conduites sous l'angle technique ; elles ont donc été sources de progrès techniques. Pourtant, la relecture des accidents majeurs tendent à montrer le rôle prédominant que jouent les individus et des structures institutionnelles. Les quelques cas décrits ci-après le sont avec un niveau de détail ne permettant pas la mise en lumière précise des aspects humains et organisationnels. Des réflexions préliminaires ont été menées afin de montrer l'intérêt d'une telle analyse pour la communauté de l'hydraulique (Larouzée *et al.*, 2014a). Il se trouve là un champ de recherche assuré.

« *Cette histoire*[44] *est instructive par bien des côtés. L'insignifiance apparente des causes et l'effroyable enchaînement des effets, les avertissements répétés de la nature et l'aveuglement insensé des gens, l'habitude prise pour la sécurité, la soudaineté de l'attaque et le jour venu, l'inconscience du public. Ces traits se retrouvent presque toujours dans les accidents de barrages* ». (Coyne, 1943, p.7). Soixante-dix ans plus tard, cette remarque demeure pertinente et pourrait s'appliquer à de nombreux domaines à risques. Nous verrons, après avoir exposé différents *cas* d'accidents, que les concepts formalisés par les champs des facteurs humains puis organisationnels permettent de reformuler et de préciser ces *traits* invariants pour le domaine des barrages. La formalisation, l'expression, la recherche, la compréhension de ces invariants, doit nous conduire à une réflexion sur l'*imprévisibilité* d'une part et l'*imprévoyance* d'autre part.

Cette étude n'a pas pour but de traiter de philosophie mais en envisageant de promouvoir la convergence des savoirs, elle sera traversée par des questions qui ont été traitées par les *Humanités* et dont les réponses seraient de nature à orienter la prévention. L'une d'elles est le statut de *l'imprévisibilité* et de *l'imprévoyance* (qui se distingue d'autant plus du *probable* et de *l'improbable* que l'on s'efforcera de *quantifier* la probabilité). Si le suffixe privatif « *in- »,* commun, exprime un *défaut,* un *manque,* l'étymologie nous indique que l'imprévu (*ce qui n'est pas prévu*) est ce qui n'est pas « *visible auparavant »* (Académie Française, 2015). La distinction *sémantique* s'opère entre le défaut de *visibilité* (caractère propre à un *phénomène*) et celui de *vision* (> voyance) qui s'applique à l'*observateur* de (ou celui qui *est censé* observer) ce phénomène.

Il est impensable de *prévoir* toutes les formes de l'accident (imprévisibilité) pourtant le jugement de l'Homme (qui sera celui de l'expert, du politique ou du juge) qualifiera *d'imprévoyant* celui qui n'a pas suffisamment cherché, par le travail permanent d'équipes dédiées, de responsables, de services de contrôle, à en empêcher la survenance. A Fukushima, la digue étudiée (*prévue*) pour arrêter la vague d'un éventuel tsunami n'était pas assez haute, la vague était-elle *imprévisible* ? La société nipponne a-t-elle été *imprévoyante* ? Répondre à cette question est pour une société un pré requis à (1) l'établissement de responsabilités qui permettent une *forme* de dédommagement, c'est l'aspect *juridique* et (2) la remise en cause (ou non) d'un état de l'art sur le plan *technique* (ou *pratique*).

La question de l'état de l'art nous apparaît centrale car c'est elle qui souvent discrimine le coupable d'imprévoyance (celui qui n'a pas prévu, en rapport à ce qui était connu) de la victime de

[44] Celle de la rupture du barrage de Johnstown, Pensilvanie en 1889, 2000 victimes.

l'imprévisible (aussi appelé Cygne Noir[45]). Pourtant, cette référence à l'état de l'art ne saurait être plus qu'une (tentative de) rationalisation juridique d'une problématique philosophique (voire métaphysique). L'accident est la rupture avec un état auquel nous nous sommes habitués (2.1.1) : il n'est en rien exceptionnel, il fait partie intégrante du réel sauf que sa fréquence ou son intensité le rendent remarquable. Les volcans d'Auvergne seront un jour en éruption et ce jour ils deviendront un accident. La question est alors de disserter sur l'imprévoyance et l'imprévisibilité. Doit-on aujourd'hui cesser de construire dans un périmètre donné ou doit-on revenir à des questions de destinée, se tourner vers un déterminisme métaphysique pour valider le fait que l'homme est faillible ? Que son contrôle, sur le vaste système qu'est la nature (dont il est un composant comme un autre), est limité ? « *La complexité provient de la quasi impossibilité de maitriser les phénomènes vivants* […] *instables par définition* » (Fiévet, 1992).

Ne doutons pas qu'il est impossible d'en finir avec ce débat sur l'imprévoyance et l'imprévisibilité. Ces réflexions, d'ordre philosophique, en reviennent aux questions de ce qui est probable et improbable ; la mort est probable, la vie éternelle improbable. L'accident est probable, l'éviter systématiquement est improbable. L'accident est là, présent potentiellement autour de tout ouvrage humain. Celui qui a rassemblé l'ensemble des causes qui se mettront en mouvement pour déclencher l'accident (l'individu) est en même temps le seul qui a la capacité de s'adapter à une situation subite et inconnue en développant des improvisations positives (et parfois négatives). Encore faudra-t-il assurer à l'acteur une marge, une zone, un espace[46] dans lequel l'improvisation est possible, tel que conceptualisé par le général Carl Von Clausewitz au début du XIX^{ème} siècle « *toutes les actions doivent dans une certaine mesure être planifiées avec une légère zone d'ombre qui, comme l'effet d'un brouillard ou d'un clair de lune, donne aux choses des dimensions exagérées ou non naturelles.* » (Clausewitz, 1832 [2000]).

En matière de prévention des risques dans les systèmes complexes, il est maintenant établi, près de 200 ans après Clausewitz (et d'autres stratèges), que l'on doit avoir une approche qui permette de créer des situations où l'individu a la capacité d'initiative nécessaire à éviter la catastrophe ; un moyen de palier l'*imprévoyance* et d'intégrer l'*imprévisible*. L'imprévisible n'implique pas de *négligence* par contre l'imprévoyance si. Prendre en compte les moyens d'éviter l'imprévoyance serait la capacité de former les acteurs à réagir face à l'imprévisible. Nous montrons ci-après comme ces réflexions sont prégnantes dans les « *grandes leçons de l'expérience* ».

Malpasset, seule rupture connue d'un barrage voûte liée aux sous-pressions, France, 1959

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, le département du Var doit se reconstruire et s'équiper. Une des problématiques principales étant l'alimentation en eau des villes et des terres agricoles, la décision de construire un barrage fut prise le 3 août 1950 par le Ministère de l'Agriculture. Le barrage de Malpasset est donc construit entre 1952 et 1954 sur le Reyran (un

[45] Dans un ouvrage éponyme, le philosophe Nassim Nicholas Taleb (2008) qualifie de *Cygne noir* un évènement très peu probable dont les conséquences sont pourtant très élevées. L'idée centrale de la théorie des *Cygnes noirs* est que nos biais cognitifs et notre rationalité limitée nous rendent incapables de *prévoir* (prédire) ces évènements. Le nom fait référence à une croyance longtemps répandue chez les Européens, selon laquelle « *tous les cygnes sont blancs* » ; avant qu'elle ne soit remise en cause par la découverte de cygnes noirs.

[46] Entre deux procédures, deux consignes, deux lois, deux ordres, etc.

affluent de l'Argens). Ce barrage avait pour but l'irrigation de terres arables et l'alimentation en eau de la base aéronavale de Fréjus Saint-Raphaël[47].

Un premier projet de barrage poids-béton en amont d'une gorge étroite fait l'objet de reconnaissances géologiques favorables. Lorsque le projet est confié au bureau Coyne & Bélier, André Coyne propose de déplacer l'ouvrage à l'aval de la gorge afin d'y implanter une voûte, ce que le géologue Georges Corroy accepte sans reconnaissances supplémentaires, vu la faible distance de déplacement[48] (Duffaut, 2009). Les barrages voûtes étaient alors reconnus comme économiques, esthétiques et surtout : extrêmement fiables[49]. Le site retenu pour la construction du barrage se situe à moins de 10 kilomètres en amont de la ville de Fréjus. En rive droite la voûte était épaulée au rocher dans un redent de la topographie alors qu'en rive gauche la construction d'une culée artificielle s'est avérée nécessaire. La voûte épaisse de 6,80 mètres à la base et 1,50 mètre en crête était équipée d'une vanne de vidange de fond, organe de sécurité en pied d'ouvrage et d'un évacuateur de crues à seuil libre, fonctionnant sans l'intervention de l'homme (Figure 10).

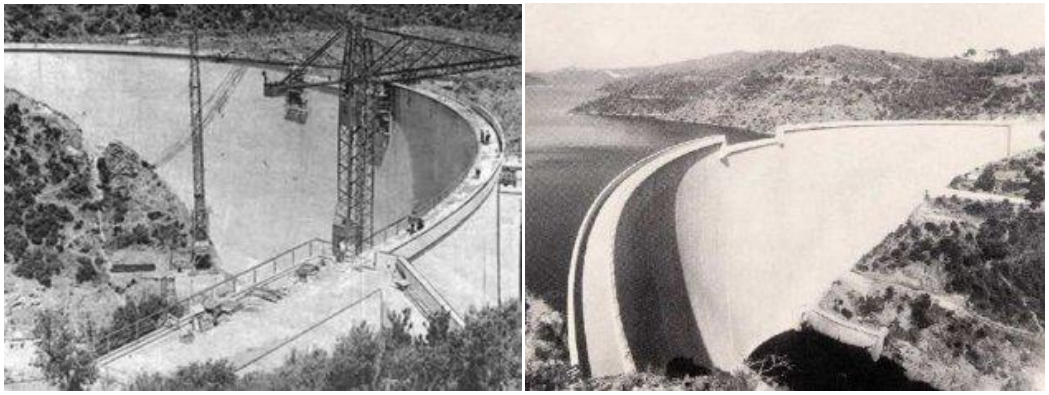

Figure 10 : à gauche, le barrage au printemps 1959, au premier plan on observe la culée en béton constituant l'appui rive gauche de l'ouvrage. A droite, le barrage rempli (1959).

Il est d'usage qu'un barrage soit livré après un premier remplissage. Cette phase est en effet critique avant la réception des travaux. Elle fait normalement l'objet de suivis, de mesures et d'observations du comportement du barrage *en charge.* Dans le cas de Malpasset, les travaux terminés, le remplissage a été retardé en raison de contentieux avec la société exploitant une mine de fluorine située à l'amont (et qui allait être noyée par le lac artificiel). Le niveau est donc resté inférieur de 20 mètres à la côte prévue en 1955, puis a progressivement augmenté jusqu'à 5 mètres sous celle-ci dans les quatre ans qui ont suivi. Les fortes précipitations de l'hiver 1959 achèvent, de manière fortuite, cette première mise en eau. Des sorties d'eau sont observées dans la roche à l'aval du barrage, ainsi que des fissures dans le génie civil. La côte atteint, en quelques jours seulement, le seuil du déversoir. Dès le 1er décembre, le niveau de la retenue dépasse le niveau « normal » pour

[47] Faits intéressants : le ministère de la Défense s'est retiré du projet en cours, annulant ses subventions ; une fois le barrage construit, le réseau d'irrigation n'a pas été livré. L'ouvrage sans *utilité* effective n'a donc pas fait l'objet d'une surveillance rigoureuse.

[48] Si le géologue suggère effectivement des études supplémentaires (en raison de la forte hétérogénéité du terrain) et que seul un tiers du budget alloué aux reconnaissances géologiques est dépensé, celles-ci n'auront jamais lieu. Cela pourrait être lié au fait que l'importante inflation monétaire de l'époque menaçait les crédits attribués au projet, générant ainsi une pression temporelle et l'accélération de son déroulement.

[49] Comme le Titanic a pu être considéré insubmersible, les barrages voûtes étaient réputés indestructibles. La Royal Air Force n'avait d'ailleurs rencontré qu'un très modeste succès en tentant de détruire en 1943, par bombardement spécial et innovant, des voûtes allemandes (e.g. Brickhill, 2009).

atteindre un niveau critique le lendemain (100,40 m NGF au lieu de 98,50 ; Figure 11)[50]. La vanne de vidange est ouverte en fin d'après-midi le 2 décembre, mais dans la nuit, à 21h13, le barrage rompt et libère 50 millions de mètres cubes d'eau dans la vallée. La vague, haute de 40 mètres à l'aval immédiat, atteint la basse ville de Fréjus en vingt et une minutes avec une hauteur de front d'environ 3 mètres. Détruisant routes, voie ferrée, habitations, elle rejoint la mer Méditerranée occasionnant également des dégâts dans la base aéronavale de Fréjus Saint-Raphaël.

Bilan de cette catastrophe qui génèrera un élan de solidarité nationale et internationale : 423 morts, dont 27 non identifiés, un nombre équivalent de personnes blessées ou traumatisées. En outre, de nombreux dommages matériel : *« un autorail a été balayé hors des rails, la voie ferrée Paris-Nice et toutes les routes traversant la vallée sont coupées, leurs ponts emportés, un millier d'immeubles sont endommagés, dont 155 complètement détruits, 3 000 hectares de terres agricoles sont dévastés, un millier de moutons et 80 000 hectolitres de vin sont perdus, comme de nombreux camions et voitures, et jusqu'à des avions de la base aéronavale, elle-même rasée, de même que le poste météorologique. »* (Duffaut, 2009).

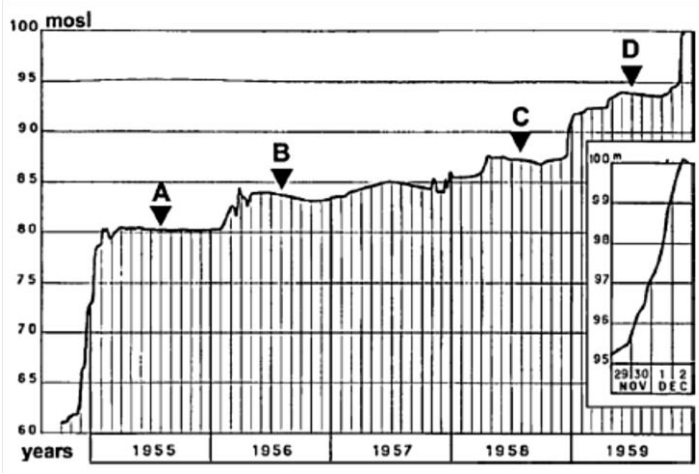

Figure 11 : Graphique représentant le niveau du réservoir de 1955 à 1959. L'encart représente le niveau lors des quatre jours précédant la rupture. Les points A – D, les dates des mesures géodésiques réalisées sur le barrage (Mary, 1968).

Le cas de Malpasset représente la seule rupture connue d'un barrage voûte dans le monde. Il illustre les réflexions précédentes sur l'imprévisibilité[51]. Entrée subitement dans la conscience des professionnels des barrages : la ruine d'une voûte devenait *possible.* Pour espérer s'en prévenir, il

[50] A l'aval de l'ouvrage, un chantier de construction de pont d'autoroute venait d'achever des coffrages de piles qui auraient été ruinés par un lâcher d'eau du barrage. Ainsi, la consigne d'ouvrir la vanne (dès le 1er décembre) n'a pas été appliquée.

[51] L'un des enjeux majeurs du Procès de Malpasset a été de déterminer d'éventuelles responsabilités dans la catastrophe. Le tribunal de grande instance de Draguignan nomme, en 1959, une commission de six experts afin de déterminer les responsabilités. En raison de difficultés d'accord entre ces experts et à la demande de l'ingénieur du Génie Rural inculpé, une commission de contre-expertise est nommée en 1962. Après huit années de procédures, l'arrêt de la Cour de Cassation (07/12/1967) stipule qu' « *aucune faute, à aucun stade n'a été commise* » et aucune responsabilité n'est retenue. L'accident est dès lors considéré comme ayant été imprévisible. Dans le même temps, il devient *prévisible,* puisqu'il entre (comme les cygnes noirs d'Australie) dans le champ de la connaissance générale.

fallait l'expliquer : « *certains accidents et non des moindres ont mis en évidence des mécanismes jusque-là inconnus, ou des combinaisons impossibles jusqu'alors à imaginer, de mécanismes élémentaires déjà plus ou moins bien identifiés. L'analyse* […] *devrait aider à trouver une voie pour rester toujours à la recherche de l'impensable ou de l'inimaginable dans les scénarios de destruction possible.* » (Bordes, 2010)

Les nombreuses études techniques et la longue instruction judiciaire ont montré, comme c'est souvent le cas, que cette catastrophe n'est pas imputable à une cause unique mais à un ensemble de facteurs, ou « pièges » naturels et techniques (Duffaut, 2013) qui se sont combinés pour conduire à la ruine de l'ouvrage. Sur le plan géologique, la qualité du rocher n'était pas insuffisante pour la construction d'un barrage – à l'échelle macroscopique du moins. Toutefois, deux détails structuraux étaient restés inaperçus : la présence d'une faille[52] et une foliation[53], parallèle à la voûte sur une partie de sa rive gauche. Or, la faille recoupant la foliation, leurs plans délimitaient un *coin rocheux* (un *dièdre*) que la pression de l'eau a littéralement éjecté. Cette éjection est plus exactement liée au phénomène de *sous-pressions.* Ce phénomène était connu depuis la rupture du barrage de Bouzey[54] en 1895, il correspond à la pression de soulèvement exercée par l'eau présente sous un barrage. Dans le cas des barrages poids, les sous-pressions étaient rendues négligeables par l'utilisation de drains. Mais cette pratique était jugée inutile sous les barrages voûtes dont la surface au sol est faible[55]. Or, les sous-pressions s'exercent aussi au sein du terrain de fondation. Si celui-ci présente une résistance à l'eau (imperméabilité), l'eau lui oppose sa force. C'est précisément ce qui s'est produit dans le cas de Malpasset. Le barrage était construit sur un dièdre rocheux, le poids de l'ouvrage comprimant ce dernier il l'a rendu moins perméable[56], et l'a transformé en rideau d'étanchéité (ou barrage souterrain). Les sous-pressions augmentant avec le niveau de la retenue, elles ont fini par expulser le *dièdre* (à la façon, diront les experts des commissions, d'un *bouchon de champagne*) privant ainsi le barrage et sa culée rive gauche de fondation (Figure 12). Sous la pression de l'eau, la voûte a pivoté autour de son appui rive droite avant de céder.

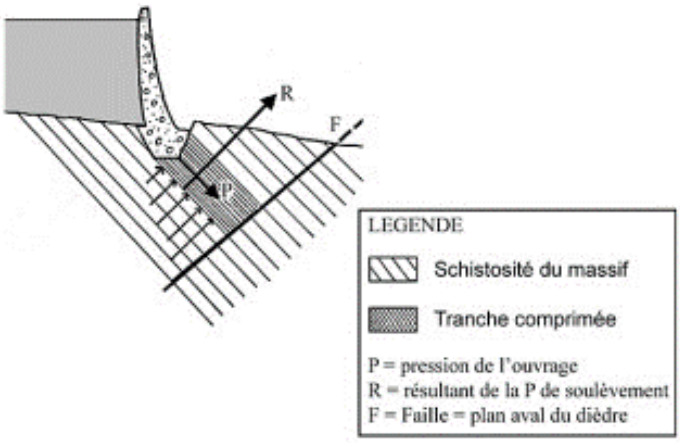

Figure 12 : Schéma des sous-pressions des fondations de Malpasset (source : Lithothèque Académie Aix-Marseille)

[52] Dont la direction, si on l'avait connue, aurait été jugée inoffensive.
[53] Orientation préférentielle des minéraux composant la roche.
[54] France, 1895. Pour certains, les sous-pressions identifiées après la rupture de Bouzey seraient de nature à reposer la question d'imprévoyance plutôt que d'imprévisibilité.
[55] La pression P est fonction croissante de la force F de l'eau et de la surface S sur laquelle elle s'exerce (P = F.S).
[56] Après l'accident, les essais géotechniques réalisés *in situ* ont montré un terrain plus déformable que ce qu'on avait supposé lors des reconnaissances géologiques du projet. Les essais de laboratoire ont, quant à eux, montré une propriété alors ignorée et très rare : la grande sensibilité de la perméabilité à l'état de contrainte.

Voici explicité le mécanisme technique de la rupture de Malpasset. Conséquence de phénomènes météorologiques (fortes précipitations après un été sec diminuant la capacité d'absorption des sols), hydrauliques (pression, sous-pression, …), géologiques (faille, foliation), géotechniques (perméabilité et compressibilité), mais également humains (décision du type et de l'emplacement de l'ouvrage, confiance excessive dans une technique, non remise en cause des avis de Coyne, manque de contrôle et de suivi de la mise en eau, retard d'ouverture de la vanne) en grande partie liés aux organisations et aux contextes sociaux.

La science des barrages a largement évolué après cette catastrophe. Pratiquement tous les barrages voûtes ont été sujets à des campagnes de mesures ; des systèmes de drainage ont été installés sous certaines. De nombreuses retenues ont été abaissées et des procédures de surveillance augmentées. En 1966, est créé le Comité Technique Permanent des Barrages ; il est chargé de fournir un avis sur les projets de barrages afin de renforcer la maîtrise d'œuvre. En 1967, le Comité Français de Mécanique des Roches se constitue, cette discipline est aujourd'hui incontournable dans la conception de barrages. Auparavant exclusivement un titre universitaire, le titre d'ingénieur-géologue[57] est spécifiquement créé. En 1968, l'Etat met en place les plans d'alerte à la population. « *En conclusion, Catastrophe Naturelle ? Ce terme ne semble pas applicable : la Nature est complexe, c'est à l'Homme lorsqu'il veut la modifier à son profit, d'en comprendre et analyser toutes les composantes. L'euphorie d'un projet qui apparaît indispensable ne saurait dispenser de la volonté de connaître tous les facteurs de risques mettant en cause la sécurité.* » (Sarramea, 1999).

Vajont, glissement de terrain et surverse d'un barrage voûte, Italie, 1963

Le Vajont est un barrage hydroélectrique de type voûte (à double courbure), haut de 261 mètres. Il était le plus grand du monde lors de son inauguration en 1960 et avait une capacité de 169 millions de mètres cube. Les travaux de construction se sont déroulés entre 1956 et 1959 dans la province de Pordenone au Nord-Est de l'Italie, au pied du mont Toc, sur le torrent Vajont. En 1957, l'exploitant demande l'autorisation d'augmenter de 61 mètres la hauteur de l'ouvrage, initialement prévue[58].

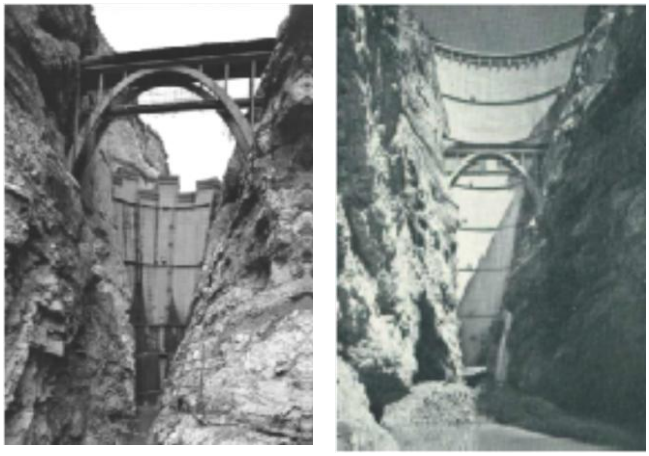

Figure 13 : Photos du barrage du Vajont pendant les travaux (à gauche) et une fois achevé (à droite).

[57] L'auteur note ici que durant ses études d'ingénieur-géologue, n'ont été abordées que les questions *techniques* ou *normatives* de la sécurité, à l'exclusion de considérations humaines et organisationnelles que cette thèse permet de conduire.

[58] Augmentant ainsi la capacité de la retenue, et donc la valeur économique de l'aménagement.

Fin août 1959, une faille est découverte sur le flanc du mont Toc. D'après les géologues du projet (dont Edouardo Semenza[59]), à celle-ci est associé un risque d'instabilité des rives de la retenue (glissement de terrain). L'ingénieur Carlo Semenza, concepteur et porteur du projet de barrage demande que les affirmations du rapport soient atténuées et commande de nouvelles études pour préciser ces *hypothèses*.

Le remplissage du barrage débute en 1960 et provoque, quatre mois plus tard, des premiers (petits) mouvements de terrain. Le géologue du projet, conseiller de C. Semenza, réfute l'hypothèse d'une faille et minimise les risques d'instabilité des versants[60]. E. Semenza estime, lui, une faille longue de 2 kilomètres et profonde de plus de 500 mètres qui pourrait mobiliser quelques 200 millions de mètres cubes de matériaux. Un premier éboulement (estimé à 700 000 mètres cubes) survient en novembre 1960 (Figure 14). Après de nombreuses réunions entre l'exploitant et les géologues, un by-pass[61] est construit en 1961 et le niveau du lac est lentement diminué (Figure 14). Des études hydrauliques[62] indiquent en 1962 que la cote de la retenue ne devait pas excéder 700 m NGF car au-delà, un glissement de terrain dans la retenue génèrerait une vague dépassant la crête de l'ouvrage et menacerait Longarone. Les résultats de cette étude ne sont pas communiqués par l'exploitant.

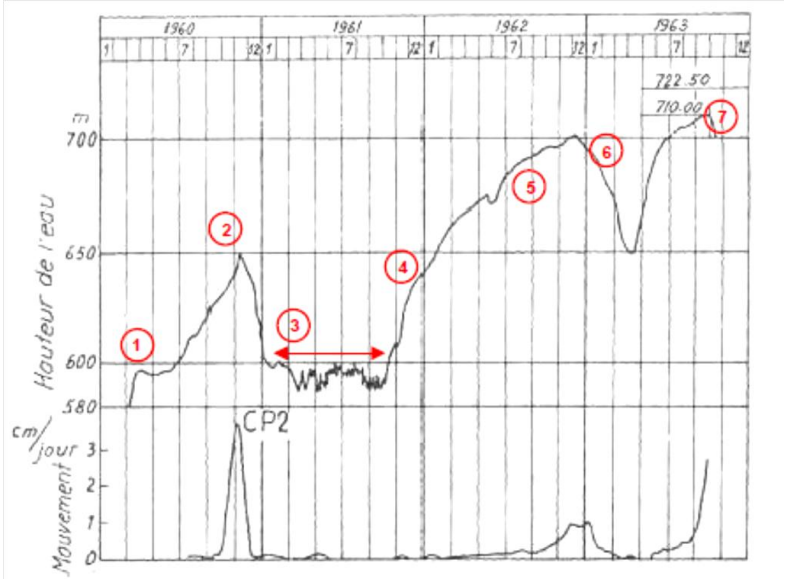

Figure 14 : La courbe du haut montre le niveau de la retenue du barrage de 1961 à 1963. La courbe du bas représente la vitesse d'ouverture de la faille au gré des mouvements de terrain sur cette même période (Semenza, 2002). 1) Première apparition d'une fissure en surface. 2) Premier éboulement après une semaine de fortes pluies, la faille devient visible mais reste considérée superficielle. 3) Mise en place du by-pass. 4) La fracture s'élargit de plusieurs mètres. 5) Des secousses sismiques sont ressenties dans la vallée, des maisons fissurées, mais le second remplissage se poursuit. Le glissement atteint une vitesse d'1,5 cm par jours. 6) A l'hiver 1962, la côte 700 est atteinte puis le niveau de la retenue est diminué. Les secousses cessent. 7) La retenue atteint la cote 722.50 m NGF.

[59] L'auteur, Edouardo Semenza, est l'un des experts géologues ayant prononcé des réserves sur la fiabilité des versants de la retenue. Il est le fils de Carlo Semenza, ingénieur de la SADE, de renommée internationale et concepteur du barrage du Vajont, décédé durant la période de travaux.

[60] Dans un courrier du 9 juillet 1960 (Semenza, 2002).

[61] Ce by-pass de 4,5 mètres de diamètre relie les deux parties de la retenue dont on craignait alors qu'elles puissent être séparées par un éboulement massif. Il avait pour objectif d'assurer l'alimentation en eau du barrage dans une telle éventualité. Les coûts des travaux s'élèvent à 1 milliard de lires.

[62] Le projet d'étude, sur maquette à l'échelle 1:200 est confié à l'université de Padoue au début de l'année 1961. Les résultats seront communiqués en juillet 1962 et incluent la recommandation d'études complémentaires qui ne seront pas financées.

Entre 1962 et 1963, les observations de la faille semblent confirmer l'hypothèse des géologues mettant en doute la sécurité : celle des effets de l'eau sur des couches de matériaux argileux sous-jacents à la faille et celles que la saturation en eau provoquée par l'augmentation du niveau du lac rend glissantes. Insensible aux alertes de certains experts et de la nature, l'exploitant poursuit le remplissage de la retenue[63].

En 1963 l'ENEL, nouvel exploitant, décide de baisser le niveau de la retenue mais ce processus est long. La vitesse du glissement augmente et atteindra, le 5 octobre, la vitesse de 20 centimètres par jour. Le 9 octobre à 22h39, le glissement *lent* se transforme en glissement *brutal* et 260 millions de mètres cube tombent à près de 100 km/h dans le lac et le comblent quasi instantanément. Deux vagues de 25 millions de mètres cubes d'eau se forment en direction de l'amont et l'aval de la retenue. Cette dernière surverse la voûte de plus de 150 mètres et atteindra en quelques minutes la ville de Longarone.

> « *L'avancée de la masse d'eau dans la vallée très étroite provoque des phénomènes de grande violence : l'air propulsé brutalement par l'eau, forme une onde de pression qui commence à faire des ravages dans la ville, puis l'eau charriant de nombreux débris provoque les destructions. La masse d'eau « aval » engloutit les villes de Longarone, Pirago, Rivalta, Villanova et Faè. De nombreux petits villages environnants sont atteints par la vague « amont » remontant sur le lac. Les conséquences humaines sont dramatiques ; selon les estimations, entre 1 900 et 2 100 personnes sont tuées. Les conséquences sociales seront très lourdes : la destruction totale de villages entraîne des situations tragiques ; disparition de familles et d'activités, perte de liens sociaux et de mémoire de la communauté. Le barrage n'a pratiquement pas été endommagé ; seules les installations annexes (salle de contrôle, équipements…) sont détruites.* » (ARIA, 2010).

La voûte, pratiquement intacte, est toujours visible aujourd'hui. Le barrage, *à sec*, n'est plus en service.

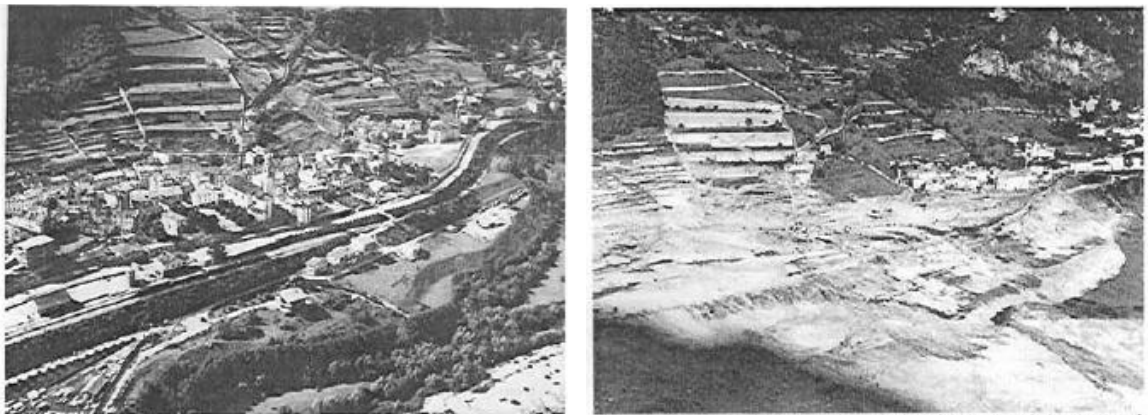

Figure 15 : La photo de gauche présente une vue de la ville de Longarone avant la catastrophe (le 9 octobre 1963), celle de droite, de la ville une semaine après (mises en lignes par le site officiel de la catastrophe : www.vajont.net).

Sur le plan technique, on peut retenir que les causes de cet évènement majeur sont liées : à la géologie du site, avec la présence sur le versant du mont Toc d'une structure de glissement préhistorique, stabilisé sur des lits argileux, aux microséismes induits par la retenue, aux lois

[63] Le projet se déroule dans le contexte économique particulier de l'après-guerre, où la demande en électricité explose et en période de nationalisation de l'hydroélectricité via le rachat d'aménagements par l'ENEL. Ces considérations sont développées après la description de l'accident.

géotechniques de stabilité modifiées par les infiltrations de l'eau et aux phénomènes météorologiques (périodes de fortes pluies qui ont gorgé le terrain d'eau, augmentant son poids).

En comparaison avec les causes techniques de l'accident de Malpasset, on note que la majorité des phénomènes en jeu ici étaient connus (état de l'art) et dans ce cas, suivis. Il semble d'autant plus justifié d'ajouter à ces considérations techniques des éléments liés aux organisations humaines. Du fait de l'instruction judiciaire conduite par le Tribunal de Belluno, des poursuites ont été engagées contre l'exploitant, la commission de contrôle et le ministère. Sur onze prévenus[64], faute de preuves, seul l'ingénieur en chef du projet est condamné à 5 ans de prison pour *homicide par imprudence*. Il sera libéré au bout d'un an.

Le contexte sociopolitique de cet accident était celui de l'Après-guerre. Le projet *Grande Vajont* devait avoir d'importantes retombées économiques et en termes de réputation, en tant que plus haut barrage du monde, pour la SADE (Società Adriatica Di Elettricità) et pour la région de Longarone. Dans un contexte de nationalisation de l'hydroélectricité en Italie, la SADE avait également un intérêt économique à livrer un aménagement à sa capacité maximale à l'ENEL. Ces différentes contingences ont conduit à des négligences et des irrégularités[65]. Selon Semenza (2002), la commission d'essai et les différentes instances de contrôle (notamment le ministère) n'ont jamais eu accès aux rapports complets des études des géologues relatives à la faille, des essais sur maquette et des recommandations relatives à la cote de la retenue. Des irrégularités sont observées, comme la construction du by-pass ou l'atteinte de niveaux de retenue sans autorisations (ou préalablement à celles-ci).

Tout comme Malpasset, la catastrophe du Vajont a marqué la géologie de l'ingénieur. L'étude des versants de la retenue intègre désormais systématiquement les projets de barrages.

> « *Au-delà des mécanismes de causalité impliquant la géologie du site, le contexte économique a probablement joué un rôle significatif dans la survenue de l'accident de Vajont. La compagnie privée d'électricité avait intérêt à réaliser un ouvrage de grande capacité et à le mettre rapidement en service dans la perspective de la nationalisation à court terme de l'électricité. Ces paramètres économiques l'ont conduite à augmenter la dimension de l'ouvrage et à franchir inconsidérément les étapes successives vers sa mise en service à pleine capacité. La compagnie a ignoré des éléments défavorables et des signes précurseurs apparaissant dans les études, expertises et mesures de terrain. La poursuite de son objectif l'aurait même conduite à ne pas divulguer certains résultats d'études. Les possibilités de dérives des acteurs ne peuvent être négligées notamment lorsque les enjeux économiques sont importants.* » (ARIA, 2010).

Le refus de voir, qui conduira à l'aveuglement organisationnel, peut être au moins partiellement expliqué par le contexte social et économique, à même de peser sur des décisions techniques ou pratiques. Toutefois, ces facteurs *exogènes* aux organisations productives, en charge de la réalisation et de l'exploitation des ouvrages ne sont pas nécessaires. On trouve également des facteurs *endogènes* à ces organisations dans les *liens* entre les accidents observés par Coyne. Nous allons le voir, à travers le cas suivant.

[64] L'un d'eux se suicide et deux autres décèdent avant la fin du procès.

[65] On trouvera ici, dans la différence entre *négligences* et *irrégularités*, un écho aux réflexions sur l'imprévisibilité et l'imprévoyance. Les théories contemporaines des facteurs organisationnels et humains (FOH) emploieraient les notions d'*erreurs* et de *fautes*. Nous y reviendrons.

Grand Teton, ruine par renard hydraulique d'un ouvrage poids-remblais, Etats-Unis, 1976

Le barrage de Grand Teton a été construit par l'U.S. Bureau of Reclamation (USBR), l'une des huit agences fédérales de construction de barrages aux Etats Unis et dont aucun des ouvrages n'avait jamais rompu avant. En décembre 1972, première année de construction, une équipe de géologues de l'U.S. Geological Survey (USGS) s'inquiète de récents séismes dans la zone et de leurs impacts potentiels sur le barrage. Elle rédige une note à l'attention de ses supérieurs à l'USGS et de l'USBR avertissant de « la probabilité d'occurrence, dans les mois suivants d'un séisme destructeur dans la région ». Cette note signalait également le fait que les retenues de barrages elles-mêmes, peuvent causer des microséismes. La note alertait enfin sur le risque consécutif à la rupture d'une onde de submersion et allait jusqu'à stipuler explicitement, non sans ironie : « puisqu'une telle onde de submersion peut être anticipée, nous devrions envisager une série de caméra vidéos stratégiquement placées pour documenter le processus catastrophique des ondes de submersion » (cité par Perrow, 1984).

Le mémo d'origine a été développé en 17 pages décrivant le problème et concluant que les observations réunies mettaient en doute la sécurité du barrage en construction, dans la configuration et les choix retenus. La direction du bureau d'études géologiques objecta que le rapport était trop empreint d' « *émotions* », il fut donc remanié à plusieurs reprises. L'équipe de géologues, finalement lassée par ces processus de réécriture finit par se désengager. A mesure que de nouvelles données étaient découvertes elles n'étaient plus intégrées.

Le mémo parvint finalement à l'USBR, six mois après sa première écriture (et dans une version édulcorée) : « *nous pensons que les observations géologiques et sismiques, bien que préliminaires, mettent en cause la configuration géologique du projet de retenue de Teton* ».

Durant ces six mois, l'USBR avait investi 4,5 millions de dollars dans la conception et le début des travaux de construction du barrage. En regard de cet investissement, l'USBR ne tint pas compte de ces avertissements (minorés et tardifs). L'USBR a également ignoré ses propres données, au sujet des roches du secteur. Des fissures dans la roche avaient été découvertes dès 1970 par les géologues de l'USBR, qui durant l'avant-projet, ont conclu que les plus grandes fissures n'étant que centimétriques, elles pourraient être confortées par injections. Pourtant, en 1973, alors que le barrage est à moitié construit, l'USBR découvre en rive droite des fissures et des cavités suffisamment importantes pour qu'une personne s'y tienne debout. La quantité de ciment utilisée dans les injections est alors déjà le double de l'estimation de départ.

Une fois le barrage achevé, la phase de *première mise en eau* commença. Au bout de cinq mois de remplissage, l'ingénieur de construction du projet demanda la permission de remplir la retenue deux fois plus vite[66] (bénéficiant de la fonte des neiges hivernales), en indiquant que cela permettrait de tester les injections (mais sans indiquer ce qu'il serait fait en cas d'échec catastrophique du « test ») et d'atteindre la production électrique maximale plus rapidement.

Un mois plus tard, un mémo indiquait que les dispositifs d'auscultation étaient défaillants et que les conditions souterraines n'étaient pas favorables. Certaines données dans ce mémo avaient 6 mois de retard en raison des conditions hivernales. Trois stations d'auscultation sur sept fonctionnaient mal.

[66] Le taux de remplissage initialement prévu était de 30 cm par jour.

Plus important encore, les stations fonctionnant indiquaient un débit de drainage 1000 fois supérieur à ce qui avait été anticipé. Le remplissage de l'ouvrage se poursuivit pourtant à un taux désormais 4 fois supérieur au taux initialement prévu. Deux mois après ce rapport alarmant, le 3 juin 1976, deux fuites sont détectées à l'aval du barrage, une troisième le jour suivant. L'ingénieur du projet ne se montra pas inquiet, les fuites étaient saines (pas d'entraînement de particules) et sont communes dans les barrages en terre. Deux autres fuites apparurent, le jour suivant, mais leur gravité ne fut pas questionnée.

Les dernières fuites avaient un débit de 83 000 mètres cubes par seconde. En grandissant, elles commencèrent à charrier de la matière : le renard hydraulique était enclenché. Des équipes tentèrent de colmater en urgence la brèche qui grandissait rapidement à l'aval du barrage à l'aide de pelles mécaniques. Mais, un trou de terre et d'eau, devenu béant, finit par « aspirer » l'une des tractopelles juste après que son équipage l'eut évacuée. Une voiture équipée de haut-parleurs diffusa un message d'alerte aux riverains du barrage peu avant la rupture. A 11h57, le 5 juin 1976, une brèche apparaît dans le barrage qui s'*efface*. L'onde de submersion tua 14 personnes[67], des villes entières furent détruites (plusieurs milliers d'habitations), plus de 40 500 hectares de terres agricoles ravagées et 16 000 têtes de bétail perdues. Les dommages aux biens furent estimés supérieurs à 1 milliard de dollars. (Perrow, 1984 ; Solava, 2003).

Contrairement à la recommandation initiale des géologues de l'USSG, aucune caméra vidéo n'était installée pour filmer la catastrophe. De nombreuses photographies ont toutefois été faites par des touristes et publiées dans le TIME[68] (voir Figure 16).

Figure 16 : Photo de la brèche ouverte en rive droite du barrage de Grand Teton, en référence d'échelle la partie intègre du barrage, visible en bas à droite, mesure 93 mètres (source : IDAHO-L-0010 by WaterArchives.org - Sacramento, California, USA).

Ce récit met volontairement l'accent sur les dimensions humaines et organisationnelles de l'accident, au détriment des détails techniques qui ont été développés par ailleurs (e.g. Solava & Delatte, 2003).

[67] Les pertes humaines auraient été plus élevées si la rupture était survenue de nuit, comme ce fut le cas pour les barrages de Malpasset et de Vajont.

[68] Elles sont aujourd'hui disponibles sur internet.

Le phénomène de renard hydraulique peut légitimement être désigné comme une cause de la rupture. Toutefois, comme le remarque Perrow, « *the Teton Dam disaster was not so much an engineering failure as an organization one* ». D'autres éléments sont nécessaires pour expliquer l'ignorance du rapport mettant en doute la sûreté du barrage, la pression qui a pesé sur ses rédacteurs, le maintien des travaux qui auraient dû être suspendus au profit d'études supplémentaires en raison des alertes. Il suffit d'une fissure pour initier un renard et ruiner un barrage en terre, la technique est objective. De même, l'injection n'est pas une science exacte, elle ne garantit pas d'étancher tous les réseaux de fissures. « L'état de l'art » ne rationalise pas la confiance excessive dans cette technique. Pour comprendre et espérer se prévenir de décisions qui se sont avérées négatives en termes de sécurité, il faut ouvrir les *frontières* du système « barrage » à un *écosystème* plus large (ou un agrégat de systèmes).

> « *Despite the linear nature of these systems, there is occasion for system accidents when they are linked to other systems in unanticipated ways.* […] *With some dams an unanticipated expansion of system boundaries creates what we shall call an "eco-system" accident.* » (Perrow, 1984, p. 233).

Ces trois grandes catastrophes illustrent la diversité des mécanismes et des causes techniques de ruptures mais elles se comprennent également à travers des interactions entre les domaines technique, humain et organisationnel. Dans la description sommaire de ces accidents, on voit ces contingences *non-techniques* (économiques, politiques, sociales, relationnelles, etc.) apparaître bien avant les questions *techniques*. On notera qu'il est difficile de s'enrichir de l'expérience quand après l'accident, seuls les faits techniques sont traités en profondeur. Les rapports de force qui enclenchent les événements ne peuvent être méthodiquement évoqués vu leur complexité et le fait qu'à ce jour, aucun moyen n'a été mis en œuvre pour les étudier pour en anticiper les conséquences. Il apparaît inefficient sinon contreproductif d'apporter une réponse *technique* à un problème *pratique.* Il faut donc un éclairage plus large des *traits* invariants qu'énonce Coyne. Celui-là peut être suggéré par les catastrophes (qui font funestement progresser l'étendue des connaissances), toutefois, l'émotion et une forme de *spectacle* peuvent entraver cet effort. Il peut alors être utile de s'intéresser à des évènements moins graves, également porteurs de *sens*.

Autres cas d'accidents, incidents, évènements liés à la sécurité des barrages

Les cas présentés précédemment ont mené à des catastrophes, incluant la ruine de l'ouvrage. Les cas suivants sont des accidents aux conséquences variables. Ils apportent un éclairage parfois plus précis sur l'ouvrage.

Rupture de vanne

Construit en 1908 en France, le barrage de Tuilières est équipé de huit vannes mesurant chacune environ 13 mètres de haut pour 7 mètres de large. Le 29 janvier 2006, vers 3 heures du matin, les chaînes retenant un contrepoids d'une des vannes cèdent, ce qui entraîne la rupture de la vanne. La retenue se vidange libérant 5 millions de mètres cubes d'eau en quelques heures. L'accident ne fait aucune victime humaine. Les impacts de cet évènement furent essentiellement environnementaux (pollution liée aux sédiments). Cet évènement illustre également le fait que les organes des barrages, tout comme leurs ouvrages annexes dans le cas suivant, peuvent faire l'objet de défaillances affectant la sûreté hydraulique.

Risques liés aux éléments des usines hydrauliques

Le barrage-usine Sayano-Chouchenskaia, l'une des plus grandes centrales hydroélectriques du monde, est situé sur l'lénissei en Russie.

Le 17 août 2009, 9 des 10 turbines sont en fonctionnement, délivrant une puissance de 4 400 MW (pour 6 500 MW maximum). A 8h13, une détonation violente est entendue au niveau des turbines, suivie de l'apparition d'un jet d'eau entre deux des turbines. Cette détonation est très probablement due à un *coup de bélier*[69] qui provoque le soulèvement de la turbine n°2 de son support avec les équipements associés (soit une masse totale de 900 tonnes). A 9h20, le circuit hydraulique de la turbine est coupé par la fermeture manuelle de la vanne de tête. Afin de protéger l'ouvrage, les évacuateurs sont ouverts à l'aide d'un groupe électrogène diesel depuis la crête du barrage.

Cet accident a fait 75 victimes (présentes dans l'usine) et a coûté environ 900 millions d'euros (de travaux, auxquels s'ajoutent les 32 millions d'euros de perte mensuelle de profit pour l'opérateur RusHydro). Les turbines n°2, 7 et 9 ont été entièrement détruites. Les autres turbines ont subi des dégâts d'importances diverses. L'inondation immédiate de l'usine a également entraîné l'explosion de deux transformateurs. Du point de vue du réseau, cinq régions de Sibérie sont affectées par l'accident ; le courant est rétabli dans la journée.

A ce point, nous avons évoqué des cas de ruptures de barrages ou d'éléments des aménagements hydrauliques. Les deux cas suivants montrent que les risques liés à ces ouvrages n'impliquent pas nécessairement ce type de défaillance (des ruptures).

Défaillances du contrôle commande

En 1984, sur le barrage de La Croux (France, Tarn), un problème de commande automatique des vannes entraîne une ouverture intempestive, générant un sur-débit involontaire dans le lit aval. Aucune personne n'est mise en difficulté.

Cet évènement montre que la fiabilité structurelle de l'ouvrage et de ses organes n'est pas l'unique enjeu. Les automatismes et leur programmation sont aussi des domaines *à risques.* Suite à cet incident, EDF créer une commission d'experts en « Sécurité dans l'Exploitation des Barrages » (SEB). Cette commission SEB a notamment eu pour mission d'examiner la fiabilité de la conception des organes des ouvrages.

Le risque « exploitation »

En fonctionnement normal, l'usine de Monteynard sur le Drac turbine pendant quelques heures par jour des débits importants (environ 360 mètres cubes par seconde), aux heures de pointe de consommation. Les débits à l'aval de cet aménagement sont faibles en dehors de ces périodes de production.

En décembre 1995, une sortie éducative de 22 élèves de CE1 est organisée pour observer l'habitat des castors dans le lit du Drac, quelques kilomètres à l'aval des équipements d'EDF.

[69] Choc généré par la surpression d'une colonne d'eau ayant une certaine vitesse et brusquement arrêtée.

Le lit du Drac est à cet endroit relativement plat, constitué de bancs d'alluvions séparés par quelques trous d'eau. Des panneaux d'interdiction d'accès sont présents aux abords des points d'accès à la rivière, et préviennent du danger. C'est l'hiver et la consommation électrique est élevée dans les Alpes. Pour répondre à cette demande, le centre de commande régional demande le démarrage de l'usine de Monteynard. Les exploitants appliquent les consignes prévues et réalisent un premier lâcher d'« alerte » à débit réduit (30 mètres cubes par seconde) avant l'ouverture à 360 mètres cubes par seconde. Dans le lit de la rivière où se trouvent les enfants, la vague d'alerte fait monter le débit de quelques décimètres (et cache les trous d'eaux présents dans ce secteur). Le groupe panique et tente de regagner la rive mais six enfants et leur accompagnatrice tombent dans des trous d'eau et se noient. (Poupart, 2002).

En France, avant l'accident du Drac, il n'existait aucune législation spécifique aux risques à proximité des ouvrages hydroélectriques. Par circulaire interministérielle en 1996 (complétée en 1999 ; MI, 1999), les pouvoirs publics prescrivent de nouvelles règles visant à limiter ces risques. Cette circulaire repose sur trois types de mesures : des modifications d'exploitation, des limitations d'accès et l'information à destination du public. De son côté, EDF a formalisé les principes de la sûreté hydraulique dans un document de politique interne et décliné les mesures à prendre comme suite des circulaires de l'Etat. La sûreté hydraulique est définie par EDF comme *« l'ensemble des dispositions prises lors de la conception et de la gestion des aménagements hydroélectriques pour assurer la protection des personnes et des biens contre les risques liés à l'eau et dus à la présence ou au fonctionnement des ouvrages. »* (Batoufflet, 2013). Parmi ces dispositions : des démarches de détection des *Evénements Significatifs pour la Sûreté Hydraulique* (ESSH), la formalisation et le suivi d'indicateurs de « Performance Sûreté Hydraulique », une campagne d'analyse de la criticité des sites à l'aval des ouvrages et la mise sous Assurance Qualité d'un certain nombre d'activités (gestion de crues, surveillance des ouvrages, maîtrise des variations de débits, etc.). Cette mise sous Assurance Qualité implique donc l'exploitation dans un cadre formalisé et contrôlable par audit.

Enfin, héritant des acquis de tous les secteurs du groupe EDF (notamment ceux de la branche nucléaire) et de la prise de conscience de ces risques nouveaux, EDF-DPIH a progressivement mis en place, depuis le début des années 2000, un réseau d'analystes « SOH » (Socio-Organisationnelles et Humaines), chargé de réaliser des études sur les dimensions humaines et organisationnelles telles que la « culture de sûreté ».

La démarche SOH et autres approches sociologiques des risques

Créé en 2005, le réseau SOH est en charge de réaliser des études sous les angles socio-organisationnels et humains (SOH). L'analyse SOH cherche à identifier les causes profondes des évènements qu'elle étudie, une notion que nous aborderons plus en détail dans le chapitre consacré aux FOH. Ce type d'études n'est pas réservé aux incidents, elles peuvent également porter sur des problématiques telles que le travail en astreinte, la performance des projets, etc. Une présentation plus détaillée des *démarches SOH* est effectuée partie 1.3.2.

Les réflexions conduites sous l'angle SOH amènent à une approche de la sécurité compréhensive qui complète les démarches *normatives* (telles que l'interdiction d'accès à certaines zones des rivières et leur signalisation par affichage).

Des démarches humaines de prévention ont été entreprises, comme la mise en place des *hydro-guides*. Des personnes chargées, durant les périodes d'affluence estivales, de parcourir les zones de fréquentation pour porter les messages de prévention et expliquer les mesures de précaution. Cette démarche tend à répondre aux comportements induits par les *représentations* des risques que nous avons évoquées au début de cette partie.

Des recommandations structurelles peuvent également voir le jour. Ainsi, sur certains ouvrages, EDF a pu identifier plus finement les raisons de la fréquentation des usagers de l'eau (notamment pour le cas de la plaisance) pour mettre en place des mesures adaptées. En complément des zones d'interdiction, l'entreprise a entre autre financé la construction d'espaces de baignade (des piscines ouvertes) à proximité des retenues. Ces piscines, focalisant la fréquentation, ont montré leur efficacité dans la diminution des enfreintes aux interdictions d'accès des zones *à risques.*

Synthèse - intérêts d'intégrer le facteur humain dans la sûreté hydraulique

Dans la profession, il est coutume de dire que « *chaque barrage est un cas particulier* », en raison de la diversité des sites d'implantation, des types d'ouvrages et des nombreuses interfaces avec la nature. La présence humaine, pourtant, génère des invariants dont nous avons pu mesurer les effets :

- des enjeux politiques diversement appréciés jusqu'à se transformer en pression politique et/ou économique,
- la peur de dire ou de faire (gradient hiérarchique),
- la gestion des compétences (une responsabilité hiérarchique),
- le rapport au temps (appréciation des signaux faibles, point de non-retour),
- le rapport à l'incertitude (conception, confiance dans la technique, coût du renoncement).

Les grandes leçons de l'expérience dont une, *singulière,* serait l'*absence* de prise en compte de l'expérience, explicitent la diversité des mécanismes et des causes de défaillances de barrages. Certains invariants techniques et regroupements statistiques peuvent-être effectués (e.g. LeBreton, 1985). Ils permettent d'orienter les démarches industrielles de prévention. Ainsi, la première mise en eau fait l'objet, pour tous les nouveaux barrages, de mesures strictes d'observation, d'instrumentation et de contrôles de sécurité. Il ne s'agit que d'un exemple.

Ces démarches peuvent et doivent être complétées par des réflexions apportées par les sciences humaines et sociales. Si nous avons montré l'importance de ces aspects dans les accidents et que des évolutions concernant ces dimensions ont fait écho au REX (Retour d'Expérience), il reste une marge de progression conséquente. La sécurité des barrages est encore essentiellement un domaine d'ingénieur. Des oppositions historiques entre les disciplines et les domaines (recherche, industrie, contrôle) contribuent à expliquer le développement tardif d'un intérêt pour des *remèdes* non-techniques. *« Beaucoup d'ouvrages ont péri pour des causes et des mécanismes déjà plus ou moins bien connus. Les remèdes pour éviter le retour des accidents, sont relativement faciles à définir, malgré toutes les difficultés de l'implantation de nouvelles procédures dans une organisation humaine. »* (Bordes, 2010).

Convaincus de l'intérêt d'une approche des risques pluridisciplinaire et constatant la dominance technique de la culture des risques dans l'hydraulique, il convient de mener une réflexion sur les

opportunités de collaboration entre les sciences de l'ingénieur et les sciences humaines et sociales. C'est par ce type d'approche transversale que nous avons mis en place une démarche *facteur humain* dans les études de dangers.

Synthèse de la première section

Dans cette section nous avons présenté, de manière globale, ce qu'est un barrage. Nous avons évoqué les principaux types d'ouvrages (poids-remblais ou béton, voûtes, mixtes) et leurs grandes fonctions (irrigation, production d'hydroélectricité, alimentation en eau). Enfin, nous avons présenté les principales composantes des aménagements hydroélectriques. Dans un second temps, nous avons présenté les *systèmes barrages* dans le monde, en Europe puis en France. Ces systèmes étant en interaction avec d'autres systèmes, leurs défaillances pouvant porter atteinte aux personnes, aux biens ou à un large ensemble d'individus (société), nous avons graduellement mis l'accent sur la question de leur sécurité. Après avoir présenté différents cas de catastrophes (Malpasset, Vajont, Grand Teton) et d'accidents ou incidents (liés aux ouvrages annexes ou à leur *exploitation*), nous les avons commentés. Les *grandes leçons de l'expérience* montrent que la sécurité des barrages (formalisée en doctrine industrielle par EDF sous l'appellation *sûreté hydraulique*) ne peut s'entendre dans sa globalité sans l'intégration des facteurs organisationnels et humains.

Dans la section suivante, nous allons présenter des différentes évolutions réglementaires, administratives et industrielles française relatives à la prise en compte des risques industriels. Ces perspectives nous permettent de présenter le cadre dans lequel ont été mises en place, en 2007, les études de dangers de barrages. Ce sont les EDD et l'injonction qu'elles portent d'intégrer à des analyses de risques pluridisciplinaires les dimensions FOH qui ont motivé la conception d'un outil spécifique dans le cadre de cette thèse. Nous commentons quelques effets produits par cette évolution, ses principales forces mais aussi ses limites.

1.2. Etudes de dangers : le facteur humain en question

Dans la section précédente, nous avons présenté l'objet technique *barrage* et un ensemble d'enjeux liés à celui-ci (techniques, économiques, politiques, environnementaux, de sécurité, etc.). Les barrages présentent, au sens du droit français, des *risques technologiques majeurs*. Ils font, de ce fait, l'objet d'une classification à laquelle sont associés différents niveaux d'autorisation et de contrôle de l'Etat.

Dans cette section, nous présentons le cadre institutionnel dans lequel s'est inscrite cette thèse. Au sens large, cette démarche s'inscrit au sein d'une *relation contrôleur-contrôlé* des enjeux de sûreté hydraulique dans laquelle on peut isoler deux acteurs principaux : un service de contrôle de l'administration (les DREAL) et l'industriel, responsable d'ouvrage (la DPIH d'EDF). Enfin, notre démarche est inscrite dans le périmètre des études de dangers, vecteur essentiel bien que récent, de la relation de contrôle.

Dans un premier temps nous décrivons, à travers une approche historique, les grandes structures organisationnelles de l'Etat pour le contrôle des installations *à risque* ainsi que le corpus réglementaire qui cadre les EDD. Nous décrivons ensuite les EDD de manière plus détaillée. En effet si elles s'inscrivent dans un ensemble plus large de prescriptions et de dispositions industrielles pour la sûreté, l'approche pluridisciplinaire et fonctionnelle des risques qu'elles ont apportée à la profession leur confère un statut privilégié dans la relation de contrôle. Ces EDD présentent enfin une opportunité significative de progrès dans la maîtrise des risques pour les responsables d'ouvrage. Certaines spécificités de l'approche française de l'EDD et de leur application aux barrages sont mises en évidence. Ces éléments permettent de dégager les *contraintes* associées à leur réalisation et donc, les *moyens* qu'il a fallu considérer dans le déroulement des travaux opérationnels de thèse qui consiste à concevoir et déployer un outil d'étude des FOH, dédié aux EDD des ouvrages de la DPIH.

Nous présentons dans un deuxième temps un certain nombre d'évènements survenus sur le parc de la DPIH. Ces évènements font l'objet, en fonction de leur intensité (gravité) d'un traitement interne à l'Entreprise (REX) ou d'une information à l'administration. A l'instar des *grandes leçons de l'expérience*, l'analyse de ces évènements montre des origines *techniques* variées et confirment l'intérêt des FOH dans la maîtrise et/ou la dégradation des fonctions de sûreté. Pourtant, il semble exister différentes sortes de freins à leur intégration aux EDD, des limites techniques aux biais induits par les organisations et les méthodes.

1.2.1. Comprendre la relation de contrôle

Les bases du rôle de l'Etat pour l'autorisation et le contrôle de certains établissements sont posées, en France dans un décret du 15 octobre 1810, portant sur les manufactures malodorantes, insalubres ou incommodantes. Dans un premier temps, nous verrons comment le rôle de l'Etat, aujourd'hui incarné par l'exercice des inspecteurs des installations classées, a évolué d'un rôle de *mission* à un rôle de *gestion*. Cet historique permet aussi la caractérisation d'un groupe d'acteurs (groupe objet)

et de ses modes d'action (Lourau, 1969). En effet, au-delà des aspects *techniques* et *réglementaires,* les notions d'*identité* et de *culture* sont constitutives de l'activité des services de contrôle des installations industrielles (Granier, 2012).

L'autre groupe d'acteurs (groupe sujet) qui intéresse notre démarche est constitué des différents responsables d'ouvrages hydrauliques (essentiellement des industriels)[70]. L'une des *démarches de sûreté* principales de la DPIH, en termes de mobilisation de ressources et de priorité opérationnelle, est la réalisation d'EDD. Nous présentons les principaux choix d'organisation et de méthode de la DPIH en réponse à cette *injonction réglementaire* de 2007 ; choix largement déterminés par des dimensions culturelles des *métiers d'exploitation hydraulique* et les spécificités d'une *école française de l'EDD.*

Evolution du contrôle des industries à risques en France

En France, il est possible de tracer un principe d'intervention de l'Etat à l'adoption d'un décret le 15 octobre 1810 qui dispose qu'« *à compter de [s]a publication* […], *les manufactures et ateliers qui répandent une odeur insalubre ou incommode, ne pourront être formés sans une permission de l'autorité administrative* » (Baucomont *et al.*, 1994 ; cités par Bonnaud, 2007). A la suite de ce décret, un *conseil d'hygiène publique et de salubrité,* composé essentiellement de médecins, est mis en place. Ce conseil est principalement chargé d'instruire les demandes d'autorisation administratives mais il est également missionné pour définir des motifs de classification de ces établissements (dangereux[71], insalubres, incommodants…). Enfin, le conseil met en place au cas par cas des visites d'établissements, préalables aux autorisations (ces visites se systématisent rapidement). S'opère dès lors une modification du rôle de l'Etat qui, initialement chargé de la prévention des litiges entre industrie et riverains, évolue vers en un rôle de prévention des risques de *santé publique.*

Au fil du temps, cette première approche se montre inefficace pour la prévention des accidents, aussi le *conseil* décide-t-il, à la fin du XIX^{ème} siècle, d'effectuer un contrôle du respect des prescriptions des arrêtés d'autorisation durant leur phase d'exploitation. Il faudra attendre la loi du 19 décembre 1917 faisant suite au *rapport Barrier*[72] sur « *les défectuosités de la réglementation des établissements dangereux, insalubres ou incommodes* » pour voir l'institution formaliser des contrôles à l'échelon départemental. Cette loi propose également la mise en place d'un système de déclaration des incidents. Enfin, elle met en place des sanctions en cas de non-respect des dispositions de l'arrêté d'autorisation. A la suite de la Seconde Guerre mondiale, l'activité de contrôle des sites *à risques* est progressivement confiée à l'Inspection du Travail. Son action se révèle être d'avantage centrée sur la législation sociale et les politiques d'emploi. Elle sera critiquée à différents niveaux et finalement discréditée.

A la fin des années 1960, le rôle du statut d'*inspection des installations classées* a donc évolué de celui d'autorisation et de contrôle (technique) vers celui d'enregistrement (administratif), plus ou moins complet, des installations « dangereuses ».

Un certain nombre d'ajustements organisationnels des administrations durant les années 1970 vont progressivement marquer un retour de *la technique* dans l'activité d'inspection avec, en particulier,

[70] Dans le cadre d'une *analyse institutionnelle* limitée à l'*acteur* EDF-DPIH.
[71] La notion de *danger* émerge, à l'époque, de l'exposition à l'incendie ou à l'explosion.
[72] En 1899.

la reconversion du Corps des Mines vers l'industrie (Bonnaud, 2007). En 1971, la France se dote d'une administration environnementale avec la création des Délégués Régionaux à l'Environnement (DRE). Ces délégués, majoritairement issus des *grands corps techniques*[73] sont chargés de porter la parole du ministre et les valeurs de l'environnement à l'échelle régionale. Il s'agit essentiellement d'une administration de *mission* selon une conception « *technicienne* » qui repose sur un dialogue avec l'industriel et s'éloigne d'une approche essentiellement *juridique.* En 1978, une première fusion des DRE (et des Conservateurs des Bâtiments de France) donne naissance aux DRAE (Délégations Régionales à l'Architecture et à l'Environnement, décret du 6 septembre 1978). Les effets dépassent ceux d'une simple fusion institutionnelle puisqu'on observe que les recrutements liés aux DRAE s'effectuent alors en dehors des corps techniques *traditionnels* pour s'ouvrir à des profils de géographes, de paysagistes ou d'architectes, modifiant l'identité du service et ses rapports à d'autres acteurs (autres administrations, industries, collectivités). A la fin des années 1980 sont créées, sur le modèle des *administrations techniques* (de l'équipement, de l'industrie) les DIREN (Directions régionales de l'Environnement) qui regroupent les DRAE et deux services régionaux opérant dans le domaine de l'eau. Cette nouvelle administration régionale se verticalise et marque une nouvelle évolution significative de prérogatives de *mission* à des prérogatives de *gestion* (et s'accompagne d'un retour à des profils d'acteurs plus *classiques,* issus des corps techniques d'Etat).

Au cours des années 2000, la sphère politique française est marquée par une logique de réforme de l'Etat, de rationalisation de l'action publique et par la volonté de réduction du nombre de fonctionnaires. Ainsi, la fusion des DIREN, des DRIRE (Direction Régionale de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement) et des DRE fait naître les DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) qui achèvent la verticalisation complète du niveau régional jusqu'au niveau central (avec la création d'un grand ministère de l'Ecologie).

La création des DREAL a impliqué le rapprochement organisationnel (par fusion) de directions *techniques* et *environnementales* aux cultures différentes avec des enjeux (environnement, industrie, urbanisme, etc.) différents[74]. Comme le souligne Le Bourhis, « *la fusion entre services […] [pose] la question de l'arbitrage : comment seront forgés les compromis entre les grands types d'intérêts […] question rendue plus épineuse du fait […] de l'enjeu [de] conformité avec les directives européennes* » (2009).

Nous avons vu l'évolution progressive de l'Administration environnementale depuis le début des années 1970 qui a ultimement conduit au cours des années 2000 à sa fusion avec les administrations en charge de l'industrie et de l'équipement. Sur cette même période temporelle, il est intéressant de pointer les évolutions de la réglementation française relative aux risques industriels.

A la suite de la catastrophe de Seveso[75] une loi sur les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) est promulguée en France le 19 juillet 1976. Celle-ci met en place différents régimes réglementaires de déclaration et d'autorisation en fonction des industries et de seuils déterminés par des quantités de produits dangereux ou par la nature de leurs activités. Elle est suivie, le 24 juin 1982, par la directive Seveso. Celle-ci impose de nouvelles règles aux Etats et aux

[73] Génie rural, Eaux et forêts, Ponts et Chaussées, etc.
[74] Mais aussi avec des modes d'action et des rapports de force différents.
[75] Le 10 juillet 1976, l'usine chimique ICMESA provoque un rejet de dioxine à proximité de la commune italienne de Seveso.

entreprises pour l'identification des risques associés à certaines activités industrielles et préconise ou prescrit des mesures pour y faire face. Modifiée à diverses reprises (en 1986 puis en 2012)[76] son champ d'action a été étendu, notamment en ce qui concerne la prévention des accidents majeurs.

En 2001, l'accident de l'usine AZF suscite une réaction sociale et politique d'ampleur qui contribue à la mise en place (le 30 juillet 2003) de la *loi Bachelot.* Cette loi met en place les EDD. L'exploitant d'un site reçoit l'injonction d'étudier les dangers auxquels ses installations exposent les tiers, et de mettre en œuvre des mesures de prévention et de protection de ces risques (Poupart, 2011).

L'étude de dangers, méthode industrielle d'analyse de risques

L'EDD induit la séparation (au moins *conceptuelle*) entre *évaluation* et *gestion* des risques. L'idée naît dans les années 1960 aux Etats-Unis (séparation entre *risk assessment* et *risk management*) suite à un investissent important dans l'étiologie, la recherche et l'évaluation des risques de cancers liés à différents produits industriels (insecticides, pesticides…). Le congrès encourage alors la mise en place de nombreuses commissions chargées de traiter les questions de la santé et de l'environnement, auxquelles il fixe des objectifs de *risk assessment*. Ces objectifs seront inscrits dans un document intitulé *Risk assessment in the Federal Government : managing the process* (1983) qui indique aux agences gouvernementales les différents moyens à employer pour évaluer ces risques.

Les évolutions des domaines de santé publique et d'environnement vont s'étendre aux risques industriels en 1975 avec le rapport *Rasmussen* sur l'évaluation des risques des réacteurs nucléaires de l'époque. Ce rapport est considéré comme la première approche *probabiliste* des risques par des scénarios de défaillances. Son objectif était de démontrer que le risque nucléaire aux USA était comparable au risque naturel de chutes de météorites (Galland, 2010). Si Rasmussen et son équipe ont réussis à *prouver* ce résultat, le rapport rencontre de nombreuses critiques (notamment sur les méthodes de calculs employées[77]). Il constitue néanmoins un nouveau point de départ pour l'analyse des risques dans le domaine industriel. En effet, bien que la *fiabilité industrielle*, en tant qu'étude des rapports entre la défaillance des parties et la défaillance d'un ensemble, ait débuté dans les années 30 et évoluée durant la Seconde Guerre mondiale (essentiellement dans le domaine de l'aviation), c'est le rapport Rasmussen qui la généralise. L'évaluation *probabiliste* s'institutionnalise.

L'Europe va également jouer un rôle moteur dans ces évolutions. En 1982, la directive Seveso commande, dans son article 4 que « l*es Etats-membres* [de l'Union Européenne] *prennent les mesures nécessaires pour que tout fabricant soit tenu de prouver à tout moment à l'autorité compétente, aux fins de vérifications requises* […]*, qu'il a déterminé les risques d'accidents majeurs existants* […] ». La directive Seveso 2 précise ensuite que les exploitants doivent « *démontrer que les dangers d'accidents majeurs ont été identifiés et que les mesures nécessaires pour les prévenir et pour limiter les conséquences de tels accidents pour l'homme et pour l'environnement ont été prises* ».

Ces évolutions peuvent être rapprochées de la volonté politique de créer un marché intérieur européen. Les différences de réglementations nationales étant un frein à cette action, l'Europe a utilisé les obligations d'évaluation (issue du *risk assessment*) et d'information au public en matière de risques comme moyen de régulation. Une des conséquences a été l'évolution des acteurs en charge

[76] On parle de Seveso 2 et Seveso 3.
[77] C'est un *analyseur* dans l'entendement *socioanalytique*.

de la sécurité industrielle (tant sur le plan administratif qu'industriel comme nous l'avons montré dans le cas français). Ainsi, les années 1990 voient naître un ensemble d'institutions (comme l'INERIS organisme semi-public créé en 1990) et de bureaux d'études privés en charge de réaliser des EDD pour les industriels.

Si la loi Bachelot place l'EDD au centre d'un dispositif plus global de gestion des risques : mesures de réduction, plans de préventions, plans de secours, mesures d'information, etc. Telle qu'elle est désormais intégrée au paysage des risques industriels, l'EDD possède quelques spécificités (Galland, 2010). L'industriel « producteur de risques » en fait l'évaluation (ce qui peut s'opposer à d'autres domaines, tel que celui des aliments avec l'existence d'agences indépendantes chargées de ces évaluations). L'EDD présente un inventaire et constitue une *photographie* du niveau de sûreté (ou de dangers) d'une installation. Elle n'a pas, contrairement à d'autres dispositions, vocation à produire des calculs. Elle exploite des données nationales ou internationales sur les composants du système qui sont ensuite utilisées dans un contexte local bien précis : le périmètre de l'EDD est une notion géographique plus que fonctionnelle. Enfin, elle révèle une opposition entre deux approches des risques.

Approche déterministe et approche probabiliste

De manière générale, les méthodes d'évaluation des risques recourent à une modélisation qui permet de mesurer les conséquences résultant de l'occurrence d'un événement grave. Il convient de conceptuellement bien distinguer deux paramètres : l'occurrence et l'intensité. Dans le cas des barrages par exemple, on cherche à évaluer la possibilité qu'une défaillance de fonction(s) de l'ouvrage (retenir l'eau, maîtriser les débits à l'aval et la cote amont) puisse porter atteinte aux personnes, aux biens ou à l'environnement. Une défaillance plausible[78] (occurrence forte) peut se réaliser sans porter atteinte aux tiers (intensité faible) et une défaillance non plausible (occurrence faible) peut générer une catastrophe (intensité élevée)… et réciproquement ! Ces deux paramètres centraux de l'analyse de risques peuvent être déterminés suivant deux approches distinctes : l'approche probabiliste et l'approche déterministe.

L'approche probabiliste[79] suppose que l'évènement étudié obéisse à une loi de probabilité connue (loi normale ou gaussienne). Une approche par scénarios permet d'associer des lois de probabilité à chaque paramètre pouvant agir sur l'intensité de l'évènement ce qui permet d'obtenir la probabilité du risque par composition des probabilités nominales de ces paramètres. On s'affranchit donc en théorie (par le calcul) d'avoir à déterminer (directement) une loi probabiliste pour un évènement extrêmement rare (la catastrophe) mais l'on créé réciproquement une forte dépendance au modèle.

L'approche déterministe[80] repose (comme son nom l'évoque bien) sur des scénarios déterminés. C'est-à-dire qu'à la différence de l'approche probabiliste par scénarios, elle ne fait pas parcourir à chacun des paramètres d'un modèle le spectre entier de ses valeurs (ou états). Ces valeurs sont fixées par des experts en raison de considérations techniques, économiques et en rapport au REX

[78] *Plausible* est ici volontairement préféré à *probable* car la considération concerne aussi bien les approches déterministes que probabilistes.

[79] Cette approche regroupe deux grandes familles de modèles *probabilistes* : les *modèles structurels* (ex : Logit) qui s'intéressent aux facteurs explicatifs ou prédictifs d'occurrence indépendamment de l'intensité et les *modèles scénarios* (ex : Value-at-Risk) qui reposent sur des scénarios de risques aux intensités prédéfinies.

[80] Approche considérant qu'une issue ne dépend que des conditions initiales.

d'un secteur d'activité. S'il est évident qu'une forme de subjectivité de l'expert intervient, pour l'étude de phénomènes extrêmement rares (comme la rupture d'un barrage voûte), cette approche pallie certaines limites des études stochastiques qui nécessitent des bases de données statistiques (pour estimer les lois et leurs paramètres). Les approches déterministes possèdent toutefois d'autres limites techniques. Par exemple, il faudrait pouvoir rigoureusement isoler les évènements initiateurs d'une catastrophe et leurs enchaînements (sans en omettre, ni en ajouter) ce qui n'est pas pratiquement réalisable dans un monde qui n'est pas cartésien.

Chaque pays a une approche différente des risques industriels. Cela est lié à des raisons historiques et culturelles qu'il ne nous appartient pas de développer en détail[81]. Ces différences fournissent des éléments intéressant pour la compréhension des pratiques françaises.

Dans certains pays, la densité de population et le tissage serré entre celle-ci et les sites industriels a nécessité des approches permettant une homogénéité de traitement à l'échelle communautaire. C'est le cas du Royaume-Uni ou des Pays-Bas. Ces deux pays ont une approche probabiliste des risques, marquée dans leurs études de dangers qui utilisent des données probabilistes type (basées sur l'observation ou le retour d'expérience) pour hiérarchiser les évènements et leurs conséquences possibles en chaque point d'un site. L'Allemagne, *a contrario,* défend une approche résolument déterminisme. Sa politique de sécurité industrielle est basée sur la notion de distances-type d'éloignement des sites à risques (Seveso ou non) et sur une articulation avec la maîtrise de l'urbanisme.

La France se situe à une position intermédiaire avec une approche probabiliste depuis l'introduction, des EDD en 2003. Le recours aux probabilités dans ces EDD n'est pas absolu, il intègre en amont une réflexion déterministe qui exploite les mesures existantes de l'installation et les moyens d'intervention spécifiques au site. L'arrêté ICPE propose trois approches : qualitative, quantitative et semi-quantitative. Dans l'approche semi-quantitative[82] les notions probabilistes sont est complétées par des critères qualitatifs qui peuvent être convoqués pour exclure certains phénomènes ou scénarios des analyses de risques. La spécificité française serait donc de construire les actions locales sur la base d'une méthode nationale (ex : matrices de criticité) n'imposant toutefois que peu de données d'entrée (Farret, 2008).

En synthèse, on retiendra que la maîtrise des risques industriels s'est progressivement développée en France, depuis le début du XIX^{ème} siècle. Elle fait aujourd'hui l'objet d'un partage de responsabilités et de prérogatives entre l'Etat et l'industrie. Dans le cas des installations classées (ICPE) la relation contrôleur-contrôlé s'articule, depuis le début des années 2000, autour des études de dangers. Ces documents décrivent les dangers que peut présenter une installation, l'organisation spécifique à la sécurité du site (à travers son Système de Gestion de la Sécurité, ou SGS), puis une analyse de risques basée sur des scénarios. A l'aide de méthodes probabilistes ou semi-probabilistes (en fonction des domaines ou des acteurs industriels), les scénarios et leurs effets sont hiérarchisés à l'aide d'une grille (ou matrice) de criticité. Cela permet à l'exploitant de présenter un ensemble de mesures visant la réduction et/ou la maîtrise des risques de son installation.

[81] Des études ont été menées par ailleurs (e.g. Tingey-Holyoak *et al.*, 2011).

[82] Dans les des EDD de barrages, EDF préfère au terme *probabilité* celui de d'*occurrence*. Les classes d'occurrence, que nous détaillons plus loin, équivalent à des intervalles probabilistes.

1.2.2. Présentation des études de dangers de barrages

L'un des objectifs des travaux conduits durant cette thèse était de concevoir puis mettre en place un outil permettant l'étude des FOH dans les EDD de barrages d'EDF. La mise en place de l'outil ayant été décidée dans le strict cadre de l'EDD, nous souhaitons mettre en avant quelques spécificités supplémentaires. Celles-ci sont à même d'éclairer certains des choix réalisés dans les travaux opérationnels de cette thèse.

Obligations réglementaires des responsables d'ouvrages hydrauliques

En 2004, un rapport faisant suite à différents incidents, rédigé par le Conseil Général des Mines et l'Inspection Générale de l'Environnement, met en évidence une hétérogénéité de la réglementation française en matière d'ouvrages hydrauliques. En fonction de leur destination, ces ouvrages répondaient du régime des ICPE, de la loi sur l'eau, du stockage minier, etc. De cette hétérogénéité découlaient, selon ce rapport, une confusion dans les rôles et responsabilités de l'administration et des exploitants ainsi qu'une dichotomie entre les ouvrages classés (sécurité civile ou publique) et non classés. Parmi ses préconisations, le rapport suggérait une refonte du dispositif législatif avec un adossement à la Loi sur l'eau, la mise en place de procédures claires ainsi qu'un renforcement de l'organisation des services de contrôle de l'Etat.

En 2006, la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA, 30 décembre 2006) est refondue. Sa nouvelle version vise à l'application de la directive européenne DCE (Directive-cadre sur l'eau, 2000). Outre des impacts sur l'outil de production, une évolution importante concerne la sécurité des ouvrages hydrauliques, harmonisée indépendamment des régimes juridiques (déclaration, autorisation ou concession). Le lecteur souhaitant consulter les dispositions précises pourra se référer notamment aux décrets et arrêtés suivants :

- le décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007, relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques (CTPBOH) qui modifie le code de l'environnement et dispose que « l'*étude de dangers précise les risques auxquels le barrage peut exposer la population, directement ou par effet domino en cas d'accident, que la cause soit interne ou externe à l'ouvrage. Elle est renouvelée tous les 10 ans* » (MEDAD, 2007),
- l'arrêté du 29 février 2008 qui fixe les prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques (modifié par arrêté du 16 juin 2009),
- l'arrêté du 12 juin 2008 qui définit le plan de l'étude des dangers des barrages et des digues et en précisent le contenu,
- l'arrêté du 18 février 2010 qui précise les catégories et les critères d'agréments des organismes intervenant pour la sécurité des ouvrages hydrauliques et celui du 7 avril 2011 relatif aux agréments de ces organismes,
- l'arrêté du 21 mai 2010 qui définit une échelle réglementaire de *gravité* pour les événements pouvant mettre en cause la sécurité des biens et des personnes,
- enfin, le décret du 12 mai 2015 qui étend les EDD aux conduites forcées, révise les classes d'ouvrages et étend le diagnostic exhaustif (RS) aux ouvrages de classes B.

La mise en place d'agréments des organismes chargés de la surveillance des ouvrages (et de la production des EDD) correspond également au souhait d'harmoniser les dispositions existant dans d'autres réglementations de sécurité des ICPE. Par exemple, le principe de gradation des mesures : les nouvelles obligations pour le gestionnaire de l'ouvrage en matière de suivi du barrage augmentent avec la classe de l'ouvrage (niveau d'exigence, périodicités plus élevées, etc.). Le Tableau 4 présente les principales obligations réglementaires et leur fréquence.

Tableau 4 : Obligations réglementaires du responsable d'un ouvrage hydraulique et fréquences d'actualisation, en fonction de sa classe.

	Classe A	**Classe B**	**Classe C**	**Classe D**
Entretien et surveillance du barrage	OUI	OUI	OUI	OUI
Registre de l'ouvrage	OUI	OUI	OUI	OUI
Visite technique approfondie (VTA)	OUI *au moins tous les ans*	OUI *au moins tous les 5 ans*	OUI *au moins tous les 5 ans*	OUI *au moins tous les 10 ans*
Rapport de surveillance ou d'exploitation	OUI *au moins tous les ans*	OUI *au moins tous les 5 ans*	OUI *au moins tous les 5 ans*	NON
Rapport d'auscultation	OUI *au moins tous les 2 ans*	OUI *au moins tous les 5 ans*	OUI *au moins tous les 5 ans*	NON
Etudes de dangers	OUI *mise à jour au moins tous les 10 ans*	OUI *mise à jour au moins tous les 10 ans*	NON *sauf demande du Préfet*	NON *sauf demande du Préfet*
Revues de sûreté	OUI	NON	NON	NON
Déclaration des évènements précurseurs pour la sûreté hydraulique (PSH)	OUI	OUI	NON	NON
Déclaration des évènements importants pour la sûreté hydraulique (EISH)	OUI	OUI	OUI	OUI
Inspection du service de contrôle de l'Etat	OUI	OUI	OUI	Possible

Les EDD de barrages

L'EDD peut être assimilée à une *photographie* du niveau de risque d'un barrage. Elle permet une meilleure connaissance des conséquences potentielles d'une défaillance ou d'une rupture (avec la création des cartographies d'ondes de submersion). Enfin, elle apporte des pistes d'amélioration en explicitant des engagements du responsable de l'ouvrage en matière de maîtrise des risques (surveillance, auscultation, réalisation d'études techniques complémentaires, programmation de travaux, etc.).

Les grands principes des EDD industrielles s'appliquent à celles de barrages : classement des ouvrages en fonction d'un potentiel de dangers, accroissement des exigences en fonction des classes, étude du SGS du site, autorisation d'exploitation des ouvrages neufs subordonnée à la réalisation d'une étude de dangers, etc. Il existe cependant certaines différences qu'il convient d'exposer.

Comparé à d'autres sites industriels (classés Seveso ou ICPE) les barrages n'admettent que peu de standardisation, chaque ouvrage a un caractère prototypique. Il est donc plus délicat de leur déterminer des normes précises[83] et des méthodologies d'analyse de risques standardisées (1.1.2). Des études spécifiques sont nécessaires pour chaque cas, d'où l'une des difficultés de recourir à des éléments de fiabilité probabilistes (sauf pour les études relatives aux organes hydromécaniques, comme les vannes). En outre, le périmètre des conséquences potentielles des défaillances peut couvrir, pour un barrage, d'importants linéaires (certaines ondes de submersion pourraient parcourir plusieurs centaines de kilomètres). En conséquence, il est également difficile de recourir à l'une des mesures classiques de réduction du risque industriel : la limitation de l'urbanisation dans les périmètres proches du site (Poupart, 2011).

Notons enfin que la réglementation est, nous l'avons vu, relativement récente dans les barrages (en comparaison à d'autres secteurs industriels). Pour la production des premières EDD de barrages, les délais fixés par décret impliquaient la production des EDD avant le 31 décembre 2012 pour les barrages de classe A et le 31 décembre 2014 pour ceux de classe B. L'ensemble des premières EDD du parc français ayant été réalisé il y a moins d'un an, des ajustements dans les règlements et les pratiques sont donc à prévoir, tant du côté des responsables d'ouvrages, émetteurs, que des services de contrôle de l'Etat, récepteurs de ces études.

Les EDD de la DPIH

La mise en place des EDD a représenté pour la DPIH une charge conséquente et une priorité opérationnelle (EDF étant le premier acteur hydroélectrique français notamment en termes de taille du parc). Elle a également démontré la capacité de l'entreprise à mobiliser des ressources et à investir en développement voire en innovation[84] pour la sûreté hydraulique.

Pour réaliser les EDD (et les revues de sûreté ou RS) de ses ouvrages, la DPIH a fait le choix de recourir à une organisation en structure projet. Le commanditaire (Directeur Délégué de la DPIH) a fait appel aux unités d'ingénierie (CIH et DTG)[85] pour le pilotage opérationnel du projet-EDD/RS. Pour respecter le calendrier réglementaire, la DPIH s'est également appuyée sur des bureaux d'études spécialisés, en complément des ressources internes[86].

L'EDD est un document unique, autoportant, qui n'est pas formellement présenté à l'Administration, ni approuvé. Elle est néanmoins transmise dans des délais imposés et sert de support à un dialogue avec l'autorité de contrôle (DREAL) qui livre généralement un ensemble de questions ou de remarques à la réception du document et qui se réfère à celui-là lors des inspections du site.

[83] On peut, par exemple, illustrer cela à travers la question des normes (Eurocodes) relatives aux fondations. Dans le cas d'un site chimique, des normes de confinement et de résistance peuvent être établies et généralisées. Dans le cas d'un barrage, en revanche, chaque site implique des études poussées qui, elles-mêmes, contribuent à définir un *type* d'ouvrage. D'où une plus grande importance de la géotechnique dans la conception et les études de sécurité des barrages.

[84] Par exemple, en permettant et en soutenant les travaux de recherche présentés dans cette thèse.

[85] Organismes agréés au sens du décret 2007-1735.

[86] Cela introduisant dans le collectif *groupe de travail* des individus en relation de sous-traitance. Nous en prendrons certains effets en compte dans la conception d'ECHO.

Elle est composée de 10 chapitres (plus un résumé non technique d'une dizaine de pages) dont le contenu est fixé par l'arrêté du 12 juin 2008 et précisé, pour la DPIH, par un référentiel méthodologique interne (produit par le CIH).

Tableau 5 : Titre des chapitres d'un EDD et résumé de leurs contenus.

N°	Intitulé du chapitre	Résumé du contenu
1	Renseignements administratifs	Identification du concessionnaire ou du propriétaire et de l'exploitant de l'ouvrage. Titre de concession ou d'autorisation et classement de l'ouvrage selon le décret du 11 décembre 2007.
2	Objet de l'étude	Références réglementaires (notamment aux plans d'urgence ou autres conventions entre le responsable de l'ouvrage et l'Etat). Périmètre couvert par l'EDD.
3	Description de l'ouvrage et de son environnement	Description de l'ouvrage et de ses organes, tel qu'il est exploité à la date de réalisation de l'EDD, accompagnées de schémas. Description de l'environnement, notamment en termes de facteurs d'agression et d'enjeux potentiels.
4	Système de gestion de la sécurité	Présentation du SGS global d'EDF (annexé aux EDD) et déclinaison locale à l'ouvrage concerné (organisation, principales consignes et instructions, dispositions de contrôle et d'audit du SGS).
5	Identification des potentiels de dangers	Pour chaque défaillance considérée dangereuse pour les tiers (rupture du barrage, d'une vanne, manœuvres d'exploitation inappropriées, etc.), estimation des volumes d'eau et des cinétiques.
6	Caractérisation des aléas naturels	Identification des aléas auxquels peut être soumis l'ouvrage (crue, gel, foudre, séismes, etc.), caractérisation de leur ampleur et incidence potentielle sur l'ouvrage. Ce chapitre permet de déterminer ceux retenus ou non dans l'EDD et d'argumenter ces choix.
7	Etude accidentologique et REX	REX mondial et REX du parc EDF. REX du barrage concerné.
8	Identification et caractérisation des risques en termes de probabilité d'occurrence, d'intensité, de cinétique des effets et de gravité des conséquences	Partie *centrale* de l'EDD, elle présente la méthodologie d'analyse des risques ainsi que la grille de cotation d'occurrence et de gravité (8.1). Les risques *intrinsèques* à l'ouvrage et sa retenue (8.2). La synthèse de l'APR justifiant les évènements retenus (EI, ERC) ou non (8.3). L'ADR qui présente une analyse de risques avec la représentation de scénarios et leurs occurrences et gravités estimées par le groupe de travail (8.4). Enfin, une table de criticité présente les couples occurrence-gravité pour chaque ERC et permet au responsable de l'ouvrage de se prononcer sur l'*acceptabilité* des risques (8.5).
9	Etude de réduction des risques	Partie co-rédigée entre le rédacteur de l'EDD et le responsable de l'ouvrage détaillant des propositions d'actions de réduction ou de non aggravation des risques et un engagement de délai.
10	Cartographie	Présente l'ensemble des cartographies utiles à l'illustration de l'EDD. Notamment, la carte de l'onde de submersion qui résulterait de la rupture de l'ouvrage.

Pour la DPIH, comme d'autres exploitants de barrages, l'EDD constitue une évolution culturelle importante par le décloisonnement de l'étude des risques qu'elle induit. Historiquement, les risques sont étudiés par métiers avec des méthodes et des standards spécifiques. Dans le cadre de l'EDD, l'analyse est conduite par des groupes de travail pluridisciplinaires et selon une approche

fonctionnelle[87] qui constitue une évolution majeure, complémentaire à l'approche de la sûreté par familles de matériels de la DPIH (depuis 2005).

Les groupes de travail associent des ingénieurs, spécialistes[88] dans différents domaines (génie civil, contrôle commande, mécanique, etc.), des membres de l'exploitation (cadres, techniciens) et une compétence en analyse des risques et rédaction d'EDD[89] (bureaux d'étude ou ressources internes à l'ingénierie). Le Tableau 6 présente l'ensemble des acteurs et précise ceux qui participent aux groupes de travail.

Tableau 6 : composition « type » d'un GT-EDD de la DPIH, les principales contributions attendues sont résumées par fonction.

Fonction	Description	Participation au GT-EDD
Pilote-EDD	Responsable de la qualité et des délais de « son » EDD. Il pilote la collecte des données, anime le groupe de travail (planification des réunions, sollicitations des intervenants, animation des réunions). Il rend compte ou alerte sur le déroulement et les difficultés rencontrées.	Oui
Vérificateur général (VG)	Assiste le Pilote-EDD et la liaison entre le groupe de travail et le projet-EDD. Le VG vérifie notamment le périmètre de l'EDD, la conformité à la méthodologie et la cohérence inter et intra EDD.	Partielle (visite et réunion d'enclenchement)
CVT Génie Civil	Responsables, dans leurs domaines *techniques* respectifs, de l'appropriation des données d'entrée (notamment lors de la visite), de la contribution au groupe de travail (identification, analyse et cotation des EI, des ERC). Les CVT contribuent à la rédaction, vérifient et signent l'EDD.	Oui
CVT Mécanique		Oui
CVT Contrôle Commande		Oui
Contributeurs Exploitation	Aide à la collecte des données d'entrée, présence lors de la visite du site et participation aux groupes de travail. Le plus souvent, un cadre et un technicien d'exploitation participent aux GT.	Oui
Contributeurs Responsable d'Ouvrage	Fournit les données d'entrée en complément du GU[90], contribution aux groupes de travail, validation des mesures de maîtrise des risques (chap. 9).	Oui
Correspondant(s)	Un certain nombre de contributeurs ne participent pas en personne au groupe de travail mais sont sollicités par le Pilote-EDD pour produire des éléments nécessaires aux analyses de risques. On peut citer des données hydrométéorologiques, des estimations de cotes réglementaires (Q5000), les simulations d'ondes de submersion et le comptage des populations potentiellement impactées, la note géologique, etc.	Non

[87] Les trois fonctions retenues pour un barrage sont : retenir l'eau, maîtriser le débit relâché à l'aval et la cote du plan d'eau amont.
[88] Appelés CVT (Contributeurs, Vérificateurs Techniques).
[89] Ou *Pilotes-EDD,* vu leur mission de rédaction mais aussi d'animation des groupes de travail.
[90] Groupement d'Usines, la plus petite structure organisationnelle de l'exploitation hydraulique à EDF.

Sur le plan méthodologique, l'analyse des risques se décompose en deux phases : l'analyse préliminaire des risques (APR) et l'analyse détaillée des risques (ADR). L'APR peut s'apparenter à une AMDEC[91] simplifiée où les objets de l'analyse (sous-structures) demeurent macroscopiques (le barrage, la prise d'eau, l'évacuateur, la vidange, etc.). L'ADR est réalisée à l'aide de la méthode nœuds papillon[92] dont les résultats permettent le positionnement de l'ensemble des scénarios étudiés dans une unique matrice de criticité. Pour chaque EDD le barrage est visité par le GT puis, généralement dans la foulée, est réalisée l'APR. Cette première réunion en salle permet de réaliser un inventaire analytique et argumenté des risques portant sur le barrage puis d'en estimer les conséquences potentielles (sur les tiers, les biens et/ou l'environnement). Le GT se sépare pour une première période de rédaction des chapitres descriptifs de l'EDD. La (ou les deux) réunion suivante est consacrée à l'ADR[93]. Il s'agit de déterminer les classes de probabilité des différents évènements initiateurs (EI) pour estimer celle d'un évènement redouté central (ERC). En effet, les scénarios d'accident sont traduits par l'association d'EI à l'aide de portes logiques (« ET » ou « OU ») impliquant des règles de logique combinatoire booléennes et de probabilités conditionnelles[94], afin d'obtenir in fine une classe de probabilité d'occurrence de l'ERC (Figure 17).

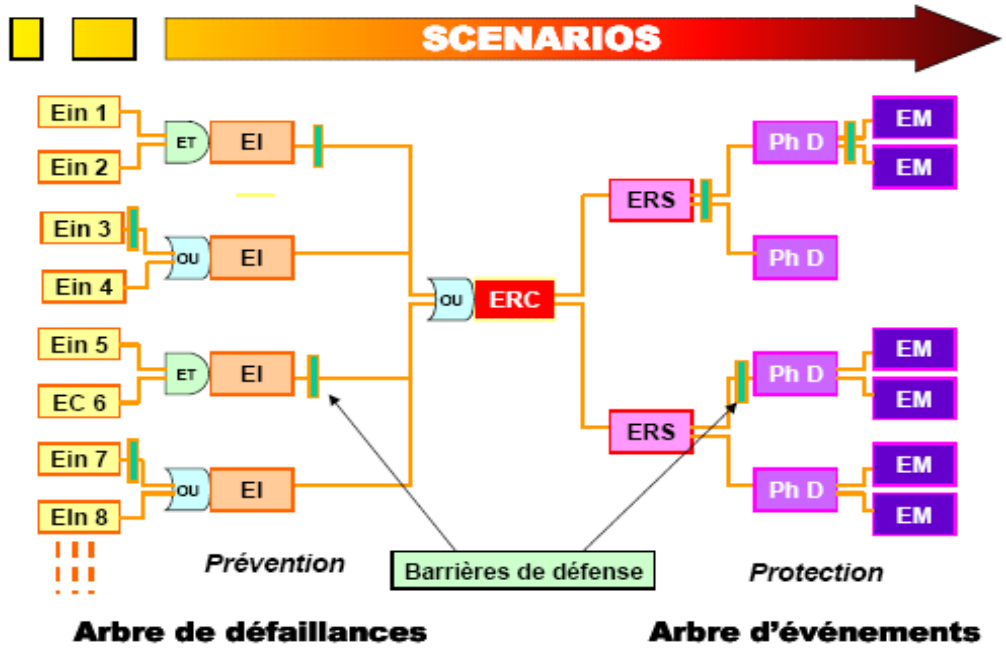

Figure 17 : Représentation graphique d'un nœud papillon type. Légende : Ein / EI : évènement indésirable / évènement initiateur, dans les EDD de barrages on ne parlera que d'EI, ce peut être une cause externe, d'origine naturelle, non naturelle ou une cause interne. ERC : évènement redouté central, évènement conduisant à la libération du potentiel de danger. PhD/EM : phénomènes dangereux / effets majeurs : phénomène physique pouvant provoquer des dommages majeurs sur les tiers, les biens ou l'environnement, dans les EDD de barrages on assimile le phénomène dangereux à ses effets majeurs (d'après le guide PPRT ; INERIS, 2007).

[91] *Analyse des Modes de Défaillances et des Effets de leur Criticité*.

[92] Méthode, propulsée par Shell dans les années 1980, qui propose une représentation graphique combinant un *arbre des causes* et un *arbre des conséquences* centrés sur un *évènement redouté central* (ERC). La représentation graphique ainsi obtenue évoque un sablier horizontal, ou encore un nœud papillon.

[93] On parle aussi de *réunion(s) nœud papillon*.

[94] L'un de ces principes est que la probabilité d'un évènement A étant donné un évènement B (ou de A si B) est plus faible que les probabilités *nominales* de A et B.

Dans le cas des portes « ou », l'un ou l'autre des initiateurs conduit à l'événement suivant, sur le plan quantitatif, on additionne les probabilités. Dans le cas des portes « et », l'analyse estime que l'un et l'autre sont nécessaires, on multiplie alors les probabilités des initiateurs[95]. Ces principes calculatoires ont nécessité une adaptation à la méthode semi-quantitative des EDD de barrages : pour les portes « ou », la méthodologie indique de retenir la classe d'occurrence la plus élevée (voire une classe en-dessous), dans le cas des portes « et » de retenir la classe la plus faible ou la classe immédiatement inférieure (voir note de bas de page 76 et les Figure 18 et Figure 19).

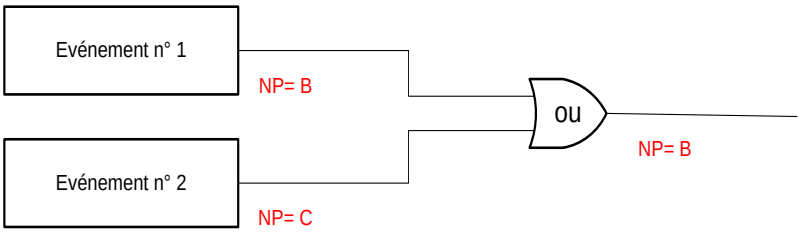

Figure 18 : Une porte OU entre deux initiateurs (évènements 1 et 2) implique de retenir en sortie la probabilité d'occurrence la plus élevée : ici B.

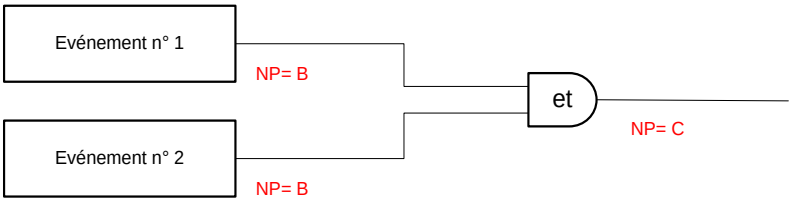

Figure 19 : Une porte ET entre deux initiateurs (évènements 1 et 2) diminue la probabilité de « sortie ».

Les *classes d'occurrence* s'inspirent du référentiel ICPE (Tableau 7) mais sont exprimées de manière *qualitative* plutôt que *quantitative.* Elles peuvent être obtenues par différents moyens : modèles probabilistes dédiés, analyses fiabilistes ou encore *à dires d'experts*. Afin d'assister les GT et de permettre une homogénéité entre EDD, le CIH a conçu différents *guides de cotation*. Partie intégrante du *référentiel méthodologique* global, ils couvrent différents domaines :

- guide de cotation « Risque rupture de vannes »,
- guide de cotation « Télécommunication »,
- guide de cotation de l'évènement redouté « Rupture d'ouvrage »,
- guide de cotation « Prise en compte du facteur humain », nous y reviendrons en détail.

La durée de réalisation d'une EDD varie de 8 à 12 mois. Entre 2008 et 2014, l'ensemble des EDD de première génération a été réalisé, soit un total de 252 EDD (et 150 RS).

En raison de modifications des échéanciers réglementaires – pour harmoniser les calendriers d'EDD et de RS - la mise à jour décennale a été anticipée pour certaines EDD. Ainsi, dès 2015, le projet EDD a eu en charge la rédaction d'études de *deuxième génération*. Ces mises-à-jour ont été l'occasion d'évolutions conséquentes du *guide méthodologique*[96], notamment en ce qui concerne la prise en compte des FOH, avec la mise en place d'ECHO.

[95] Le principe d'addition ou de multiplication des probabilités suppose l'indépendance des initiateurs.
[96] Document interne guidant la production des EDD de barrages d'EDF.

Tableau 7 : Grille définissant 5 classes de probabilité d'occurrence. Dans le cas des EDD d'EDF, seule l'appréciation qualitative est utilisée, les probabilités affichées le sont donc sous formes de lettres (A à E) et non quantifiées. (D'après l'annexe 1 MEDDE, 2005).

	E	**D**	**C**	**B**	**A**
Qualitative (*les définitions entre guillemets ne sont valables que si le nombre d'installations et le REX sont suffisants*)	« **Evènement possible mais extrêmement peu probable** » : *N'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années et d'installations.*	« **Evènement très improbable** » : *S'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.*	« **Evènement improbable** » : *Un évènement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité*	« **Evènement probable** » : *S'est produit et/ou peut se reproduire pendant la durée de vie de l'installation*	« **Evènement courant** » : *S'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation, malgré d'éventuelles mesures correctives.*
Semi-quantitative	**Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place, conformément à l'article 4 du présent arrêté**				
Quantitative (*par unité et par an*)		10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}

Tableau 8 : Classes d'occurrences utilisées dans la cotation des EDD de la DPIH (2015).

Classe	Signification	Exemple
A	Défaut courant, mesures correctives non efficaces	Défaut mineur du contrôle-commande
B	Défaut susceptible de se produire plusieurs fois dans la vie de l'ouvrage mais corrigeable	Corrosion d'une vanne, défaut de conception d'un automatisme
C	Défaut susceptible de se produire plusieurs fois sur un parc d'ouvrages, non corrigeable	Défaut de fondation d'un barrage
D	Défaut susceptible de se produire plusieurs fois sur un parc d'ouvrages, corrigeable	Défaut d'étanchéité de corps d'un barrage
E	Défaut extrêmement rare	Non rencontré au niveau mondial

Limites et biais de l'EDD

L'une des limites[97] de la méthode nœud papillon réside dans l'estimation d'une classe d'occurrence des ERC : elle est en fait approchée par un découpage réducteur (car analytique) en EI. De ce principe découle un certain nombre de biais.

Premièrement, l'analyse des risques peut négliger ou omettre certains éléments (des scénarios, de leurs causes ou de leurs conséquences), en effet « *les accidents ont toujours beaucoup plus d'imagination que ceux qui cherchent à les prévoir* » (Anonyme, cité par Martinais, 2010b). Le raisonnement par scénarios est nécessairement simplificateur du réel. *« Certains phénomènes ne sont tout simplement pas imaginables tant qu'ils n'ont pas été observés et référencés. L'histoire de la sécurité industrielle recèle ainsi d'exemples d'événements qui ne sont envisagés qu'à partir du moment où ils se sont produits au moins une fois* » (Martinais, 2010b). Ensuite, s'il est aisé d'estimer les occurrences des EI les plus courants puisqu'ils bénéficient de bases de données relativement fiables et fournies, d'autres EI posent problème. C'est le cas de ceux extrêmement rares sur lesquels les données n'existent pas toujours (les crues de dimensionnement ou séismes de référence sont des choix *normatifs*). Enfin, certaines classes d'occurrence sont déterminées à partir du *REX mondial* et du *REX parc* de l'exploitation. On convient des limites d'une approche statistique sur un parc mondial regroupant des contextes naturels et climatiques très variés, tout comme les conditions techniques et économiques pour la conception, la construction et la maintenance. A l'inverse, comme le notent Bolvin *et al.,* une approche uniquement basée sur le REX parc d'un responsable d'ouvrage français, dans une zone tempérée et relativement peu sujette aux séismes et pouvant présenter l'absence de tout incident majeur ferait tendre les probabilités calculées vers un cas théorique de risque zéro (2011).

Ces limites techniques ne sont pas les seules, d'autres sont le fait des acteurs de l'EDD (dans la relation large contrôleur-contrôlé ou à l'échelle des relations au sein des équipes de production des études), « *cela tient notamment au pouvoir que* [l'élaboration de l'étude de dangers leur] *confère et à l'influence que cette évaluation très technique exerce sur l'ensemble du processus décisionnel* » (Martinais, 2010b).

Si des référentiels méthodologiques ont été mis en place par des industriels ou des bureaux d'études pour renforcer la qualité et la comparabilité des EDD, la réalité est faite d'ajustements, d'habitudes, d'optimisations qui expriment la subjectivité (et la sensibilité) des acteurs en charge de les produire. Ces ajustements se traduisent par une oscillation entre la liberté revendiquée des groupes de travail pour réaliser du cas par cas et leur volonté de bénéficier du confort de l'étude générique à travers des guides de référence. Au niveau de la relation macroscopique, les négociations méthodologiques et l'interprétation des textes de loi (tant par l'industriel que par l'administration) s'articulent notamment sur l'estimation des potentiels de dangers de leur gravité. Si la spécificité française (cf. 1.2.2) semi-probabiliste (choix de recourir à des classes d'occurrence qualitatives, non quantifiées en termes de probabilité) est justifiée par le caractère singulier des barrages, les nombres restent une donnée attirante en termes de gestion. *« Il serait effectivement rassurant pour le technicien et le contrôleur de pouvoir « déterminer » mathématiquement l'occurrence de risques et de renvoyer leur*

[97] Les considérations ci-après ne sont pas exclusivement restreintes aux EDD de barrages, bien qu'elles leurs soient dédiées. On trouve dans la littérature un certain nombre de critiques adressées aux EDD industrielles *au sens large* (e.g. Farret, 2008 ; Martinais, 2010b ; Bolvin, *et al.*, 2011).

prise en compte (technico-économique) à une acceptabilité plus ou moins grande de la société (des usagers) et à la capacité financière de les dépasser. » (Laloux *et al.*, 2011). Enfin, le cadre légal et l'argumentation technique n'empêchent pas l'influence d'autres éléments propres aux entreprises comme la disponibilité du personnel et celle des ressources documentaires pour faire les analyses. Influent également les capacités budgétaires, la rentabilité des installations, les rapports de force sociaux ou hiérarchiques, etc.

Une fois l'EDD réalisée, nonobstant les limites techniques et non-techniques évoquées, il faut enfin que les différents utilisateurs se l'approprient (Farret, 2008). Rappelons que les utilisateurs ne sont pas uniquement les acteurs de la relation contrôleur-contrôlé mais qu'ils impliquent d'autres parties prenantes (élus locaux, associations et riverains). Or, l'aspect très technique de l'EDD (à l'exception de son résumé non technique) peut représenter un obstacle à la mise en discussion des risques. Les vives oppositions qu'a reçu le projet de construction du barrage de Sivens[98] témoignent que les processus de débat social et politique au sujet des grands projets et de leurs impacts peuvent emprunter la voie du conflit malgré la volonté affichée de les inscrire dans une discussion rationnelle (technique). Pour cause, « *dans les procédures d'autorisation ou de maîtrise de l'urbanisation, la première partie de l'histoire est écrite uniquement par la DRIRE et l'exploitant. Il y a en effet à ce moment-là un aspect très technique qui fait que les autres parties prenantes ne sont pas vraiment invitées à entrer dans les débats. C'est plus tard qu'elles sont amenées à réagir sur nos propositions* » (Un inspecteur de la DRIRE ; cité par Martinais, 2010b). Martinais parle d'« *univers restreint de la décision* » qui a pour effet, en ses termes, de « *tenir à distance (sinon d'exclure) des lieux où se préparent les décisions tous les acteurs qui n'ont pas formellement participé à l'élaboration de l'étude de dangers et qui, dans ces conditions, ne peuvent pas revendiquer une filiation avec les choix préalables qu'elle a contribué à entériner.* »

> « *[L'EDD] est un instrument de pouvoir au service des acteurs qui en maîtrisent les conditions de production. […] Les industriels qui préparent et présentent les dossiers […], les services de l'Etat chargés de l'évaluation critique et de la validation administrative de ces études. Les fonctions de rédacteur d'un côté et d'évaluateur de l'autre sont en effet éminemment stratégiques, dans la mesure où elles permettent d'influer sur le contenu de l'étude et donc, sur la configuration des problèmes. Car si l'étude de dangers est un moyen de discuter l'indiscutable, c'est selon des modalités qui sont en grande partie imposées par ces deux catégories d'acteurs (et par elles seulement). En ce sens, l'étude de dangers ne produit pas un savoir « pur » qui viserait l'exhaustivité et le détail maximal dans un souci d'objectivité parfaite. Comme la plupart des instruments de connaissance, elle opère plutôt un formatage orienté de la situation étudiée*. » (Martinais, 2010b).

A travers ces considérations techniques et pratiques, nous établissons que l'image des risques produite par une EDD demeure empreinte d'une forme de subjectivité. Elle est imprégnée des logiques et des intérêts de ses acteurs depuis le cadrage des problèmes à la définition et au dimensionnement des mesures de prévention et de réduction des risques (des mesures de réduction à la source à l'élaboration des plans de secours et PPI (Plans Particuliers d'Intervention), voire à la

[98] Ce projet de barrage se situe dans le Tarn en France sur une partie sauvage et préservée de la rivière Tescou. Le barrage s'élèverait de 13 mètres au-dessus du terrain naturel et ferait 1500 mètres de long pour 230 mètres de large. La retenue d'une capacité d'environ 1,5 millions de mètres cube serait utilisée pour l'irrigation de 300 ha de terres cultivées et pour le soutien au débit d'étiage du Tescou. Le projet, porté par le Conseil Général du Tarn (maître d'ouvrage), a reçu une vive opposition populaire et a divisé la classe politique. Il est notamment critiqué pour ses impacts sur l'environnement, la faune et la flore.

maîtrise de l'urbanisme à travers les PPRT). « *On peut dire que l'étude de dangers confère à ses « auteurs » la maîtrise du monde des phénomènes accidentels en même temps que celle de l'espace dans lequel ces mêmes phénomènes doivent être appréhendés et traités.* » (Martinais, 2010a). Dans sa complexité, l'étude de dangers semble tout autant être un moyen de connaissance et de *négociation* des risques (voire d'information du public) qu'un « *outil de verrouillage du champ social* » en ce que ses effets sont difficilement opposables du fait « *du statut particulier dont bénéficient les analyses de risques dans le domaine de la prévention des risques* » (Tierney, 2010 ; Martinais, 2010b).

Ces éléments sur l'EDD au sein d'une relation *contrôleur-contrôlé* s'appliquent à tous les domaines intégrant l'analyse de risque, qu'ils soient *techniques* ou *pratiques*.

1.2.3. Facteur humain : des situations d'exploitation aux nœuds papillon

La présentation détaillée des EDD industrielles et les considérations spécifiques relatives à leur application aux barrages ne doit pas occulter le fait que ces études s'insèrent au cœur d'un dispositif plus large de sûreté (en témoigne, par exemple, la complémentarité EDD / RS)[99]. Bien qu'il ne nous appartienne pas de dresser ici l'inventaire exhaustif de ces démarches, il est utile pour soutenir les composantes socio-analytiques de nos travaux d'en présenter certaines.

Dans cette partie, nous nous intéressons à certains dispositifs de retour d'expérience qui constituent l'une des données d'entrée de l'EDD. C'est le cas de trois dispositifs de classification, de remontée et de traitement des évènements (incidents ou accidents) : les EISH, les ESSH et les ESSI. Après les avoir situés et à travers la présentation de quelques évènements survenus sur des barrages du parc EDF et des analyses qui ont suivi, il est possible de confirmer une prédominance des contributions humaines ou organisationnelles dans la sûreté hydraulique. Enfin, nous abordons à la lumière de ces éléments quelques problématiques liées à l'intégration des FOH dans l'EDD de barrage.

L'EDD au cœur d'un dispositif plus large de sûreté hydraulique

Que ce soit sur les plans administratif, juridique ou industriel, un vaste ensemble de démarches liées à la maîtrise de la sûreté des ouvrages hydrauliques existait avant la mise en place des EDD ou a été mis en place, de manière indépendante, ultérieurement. Il ne nous appartient pas de les détailler ici[100] mais il convient de mentionner leur existence dans un effort de contextualisation de ces travaux et puisque certains de ces dispositifs sont des données d'entrées essentielles à la qualité de l'EDD. C'est notamment le cas des processus de retour d'expérience qui façonnent la *culture* des métiers (et donc, dans une certaine mesure, les modalités de réalisation des analyses) et produisent des bases de données exploitées dans l'EDD.

[99] Par des approches complémentaires : *structurelle* (RS) et *fonctionnelle* (EDD).
[100] Pour l'inventaire et le suivi des démarches de la DPIH, le lecteur pourra se référer aux rapports annuels de l'Inspecteur pour la sûreté hydraulique d'EDF, disponibles librement en ligne.

Depuis septembre 2006, la DARQSI[101] (Direction de l'Action Régionale, de la Qualité et de la Sécurité Industrielle) a mis en place un dispositif de détection et de centralisation de l'information au sujet des évènements indésirables survenant sur des aménagements hydroélectriques. Ce dispositif introduit la notion d'*Evénements Importants pour la Sûreté Hydraulique* (EISH). Dans les cas de barrages en régime de *concession*, la déclaration d'EISH concerne l'ensemble du périmètre concédé (incluant les galeries d'amenée, conduites forcées, etc.).

Les EISH sont classés selon trois niveaux relatifs à la nature (gravité) des conséquences. On parle d'EISH jaune, orange ou rouge (gradation introduite dans l'arrêté du 21 mai 2010). Sont classés en *incidents* (jaunes) les évènements conduisant à des dégâts de faible importance aux biens (incluant les ouvrages hydrauliques) sans mise en danger de la sécurité des personnes. En *incidents graves* (orange), ceux ayant mis en difficulté des personnes sans entraîner de blessures graves ou généré des dégâts importants sur des biens ou ayant modifié de façon significative le lit ou les berges des cours d'eau ou des retenues. En *accidents* (rouge), les événements ayant causé des blessures aux personnes ou des dégâts majeurs aux biens. Sont notamment qualifiés d'EISH les cas de non-respect d'obligations réglementaires (comme la maîtrise des débits relâchés ou des cotes de retenue).

Tous les EISH sont enregistrés par les DREAL. Au niveau national, le nombre d'EISH déclarés pour les barrages concédés est relativement stable, avec en moyenne 40 EISH par an entre 2006 et 2010 (Brandon, Rival, 2011). La DPIH d'EDF n'a déclaré aucun EISH rouge depuis 2008. En 2014, EDF a déclaré 1 EISH orange et 19 EISH jaunes.

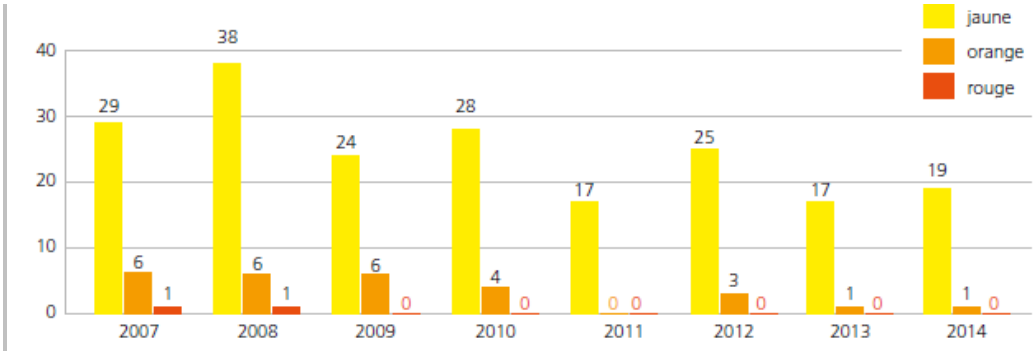

Figure 20 : historique des EISH de la DPIH (Batoufflet, 2014)

La DPIH disposait, avant la mise en place des EISH, de son propre système de détection des précurseurs ou écarts de sûreté. Aujourd'hui, celui-là distingue les *Evènements Significatifs de Sûreté Hydraulique* (ESSH) et les *Evènements Significatifs de Sûreté à l'Ingénierie* (ESSI). Le nombre de *précurseurs* détectés (ESSH et ESSI) dépasse les 3200 évènements par an, cela atteste d'un effort de transparence et fournit des données utiles aux REX (Batoufflet, 2014).

Afin de permettre une *amélioration continue* de la sûreté hydraulique, des objectifs sont fixés au niveau local pour l'analyse des précurseurs et le suivi des actions correctrices. Les écarts aux prescriptions réglementaires doivent être analysés dans les quinze jours qui en suivent la détection ; les événements les plus marquants (sans écart aux prescriptions), dans les trois mois. L'analyse de ces évènements est le plus souvent réalisée sous l'angle *technique* avec l'établissement d'un *arbre*

[101] Organisme dépendant de la Direction Générale des Entreprises au Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Emploi.

des causes. Des réflexions sont en cours à la DPIH, pour permettre une meilleure prise en compte des dimensions FOH et par conséquent, une amélioration du REX.

Les évènements (EISH, ESSH) sont collectés dans les phases préliminaires de l'EDD. Ils sont présentés dans le septième chapitre (dédié) des EDD. D'une certaine manière, ces processus de REX (collecte, analyse des évènements et communication des analyses dans l'entreprise) et les enseignements qu'ils permettent contribuent à façonner la culture des acteurs chargés des analyses de risques, notamment dans le cas des EDD. La partie suivante présente brièvement certains de ces évènements « significatifs » et les enseignements qu'ils portent.

Des « grandes leçons de l'expérience » aux « évènements significatifs »

Dans la partie 1.1.3, nous avons commenté des évènements majeurs, catastrophiques, survenus sur des ouvrages hydrauliques. Leurs enseignements ont été nombreux, Coyne les qualifiait de *grandes leçons de l'expérience*. Heureusement ces évènements sont rares, voire extrêmement rares (Malpasset est, par exemple, le seul cas de rupture connue d'un barrage voûte).

La réalité opérationnelle de la maîtrise d'ouvrage est, quant à elle, faite d'évènements dont les conséquences (gravité) sont beaucoup moins importantes mais la fréquence plus élevée. Ces *évènements significatifs* font généralement l'objet de mesures de détection et de traitement (voir 1.3.2 pour une revue de ces mesures à la DPIH d'EDF). L'analyse qualitative et/ou quantitative de ces évènements apporte une contribution significative à la structuration du « REX de la profession ». Nous retrouvons dans les analyses de ces évènements des traits communs aux *grandes leçons* : la variété des explications *techniques* et une forme d'invariance des contributions humaines et organisationnelles (tant dans l'initiation que dans la maîtrise de situations dégradées).

A titre d'exemple, nous présentons quelques-unes de ces situations où, souvent, l'intervention humaine contribue à maîtriser l'évènement et éviter que ses conséquences s'aggravent.

Ouverture intempestive d'une vanne de crue dans un contexte de requalification

Le 30 juillet 2013, des tests de *requalification* sont effectués sur le barrage de Kembs. Ils portent sur un automate chargé de la manœuvre des vannes au-delà d'un certain débit entrant. Lors de tests, des protocoles *normaux* d'analyse de risques sont conduits, ils dirigent ici l'attention sur des impacts potentiels à l'amont de l'ouvrage. En effet, en cas de non maîtrise de la cote amont, un risque majeur serait d'impacter le port international de Bale (Suisse). Dans une première phase du test, le comportement de l'automate se montre insatisfaisant mais, des conditions de débit sur la retenue (relativement exceptionnelles pour la période de l'année et favorables au test) conduisent à la poursuite de la requalification. Dans les heures qui suivent, sur une commande de l'automate, une vanne s'ouvre intempestivement au barrage ce qui provoque une augmentation de 470 mètres cube par seconde du débit dans le lit du Rhin. Cette augmentation a généré une hausse du niveau de 1,45 mètre à l'aval immédiat du barrage de manière rapide (en moins d'une demi-heure). L'incident survient en été et, malgré les interdictions d'accès signalées tant du côté français que du côté allemand[102], trois jeunes adultes sont installés sur un îlot du fleuve, situé 1 kilomètre à l'aval du barrage. Ces personnes sont mises en difficulté par la montée rapide de l'eau et l'augmentation du

[102] Ce qui renvoie à nos réserves sur une approche normative du risque hydraulique étant donné la perception sociale de ce risque (1.1.3).

débit mais elles parviennent à regagner les rives par leurs propres moyens. Ils alertent les secours qui lancent des recherches sur les deux rives. (Batoufflet, 2013).

L'analyse de cet événement (déclaré EISH orange) renvoie à différents éléments : la présence de plusieurs contraintes de sûreté (et l'importance, singulière, d'un *risque amont* qui focalise l'attention des acteurs), l'attitude interrogative (un précurseur mal évalué), le non-respect de procédures (non-respect du DMP prévoyant une présence au barrage). L'initiateur est une défaillance *technique* (la mauvaise réaction du système de conduite lors du basculement d'automates de conduite). On notera toutefois que la conception, la programmation et la mise en place d'automates relèvent également de dimensions *pratiques*. Comme souvent (nous allons le confirmer), cet initiateur *technique* se combine avec un ensemble de défaillances humaines et organisationnelles, nécessaires mais non suffisantes à expliquer l'évènement.

Dépassement de cote de sécurité (PHE[103]) et rupture de vanne en début de crue

En 1995, des travaux visant à renforcer la sûreté d'un barrage sont conduits sur son évacuateur de crue (notamment sa vanne à flotteur qui en assure l'autonomie). En raison des prévisions d'orage, des dispositions particulières sont prises (à partir de 18h création d'un creux préventif, à 21h15 mobilisation d'une surveillance permanente depuis l'usine). Suite à des pluies violentes, le niveau de la retenue monte lentement (entre 21h00 et 23h15) mais l'exhaussement s'accélère après 23h15. L'exploitant est prévenu par les systèmes d'instrumentation mais l'information sur le niveau de la retenue manque de clarté (superposition avec le niveau de la retenue d'un autre barrage) et de précision : le journal de bord n'affiche pas de cotes correspondant aux différents niveaux d'alarme. L'exploitant est surpris par cette brusque montée et alors que la cote normale (RN) de la retenue est dépassée de 40 centimètres, il est induit en erreur par son IHM : l'enregistrement indique une baisse de niveau alors que celui-ci augmente (en raison d'un mauvais codage de la plage d'utilisation du codeur de l'enregistreur de niveau, une condition *latente*).

Dans cette situation confuse, l'exploitant n'a pas la possibilité d'avoir une estimation de l'ordre de grandeur des débits entrants. Vers 23h40, celui-ci pense pouvoir diminuer la montée de la retenue par une intervention sur le programme de production. Or, ses diverses tentatives sur le terminal de l'automate sont sans succès. Le logiciel avait été modifié la semaine précédente pour qu'on ne puisse pas arrêter un groupe en marche si celui-ci doit repartir en *marche programmée* dans les 25 minutes qui suivent. C'était ici le cas et l'agent de surveillance ignorait cette modification récente. Vers 23h50, il se rend en voiture au barrage mais lorsqu'il arrive, la vanne centrale vient de se rompre alors que le niveau maximal (PHE) de la retenue avait été dépassé d'environ 60 centimètres. Aucun tiers n'est impacté et les dommages sont limités par la faible capacité de la retenue et la rupture nocturne (absence de la fréquentation aval).

L'analyse de l'évènement a également montré des origines techniques et pratiques à l'accident. Sur le plan technique, les capteurs et l'IHM ont généré la confusion (information erronée et affichage des informations en temps réel manquant de clarté). Sur le plan pratique (organisationnel) des problèmes liés à la traçabilité des actions et l'absence de consigne provisoire pour tenir compte des conditions particulières d'exploitation (indisponibilité partielle de deux vannes en période de travaux).

[103] Plus Hautes Eaux.

D'autres évènements du parc hydroélectrique Français

A l'occasion d'une intervention de maintenance sur un programme d'automate d'interface (qui établit le lien entre le poste asservi et les automatismes câblés de l'usine), les automatismes de second rang de l'usine sont mis hors conduite. Quelques minutes suffisent à l'agent chargé de la maintenance pour intégrer la modification de programme. Le technicien d'exploitation relance les automates lorsqu'un ordre intempestif de débit nul est envoyé à tous les groupes de production alors que le débit entrant dans l'aménagement est important (environ 350 mètres cubes par seconde). Un agent d'exploitation intervient sur les groupes pour reprendre la charge sur la centrale et un autre se rend rapidement au barrage pour prendre la main sur l'automate Barrage (APB) et ouvrir les vannes. Malgré ces actions d'exploitation, le niveau amont usine monte brusquement, une intumescence se propage dans le canal, les capteurs de *niveau haut* de la retenue (1er et 2ème stades) sont atteints. Un débit intempestif de 90 mètres cubes par seconde est relâché. Un ESSH est déclaré.

Sur un autre ouvrage, suite à une intervention de diagnostic sur des câbles de télécommunication (liaison usine-barrage) un faux contact provoque simultanément le déclenchement (arrêt) de l'usine et la perte de l'automatisme de barrage normal. Une situation transitoire (travaux, maintenance) sur la disponibilité des vannes induit un fonctionnement inadéquat (retardé) de l'automatisme de sauvegarde, de telle sorte que lorsque l'exploitant arrive le barrage déverse, toutes vannes fermées. Le niveau de Retenue Normale (RN) est dépassé mais la cote de sécurité (PHE) n'est pas atteinte grâce au faible débit transitant lors de l'évènement.

Ces évènements de différentes intensités (EISH, ESSH) montrent, au même titre que les *grandes leçons de l'expérience,* la diversité des précurseurs et initiateurs techniques mais dans le même temps, l'omniprésence des FOH. Qu'ils soient initiateurs ou éléments de maîtrise, les hommes et leurs organisations jouent un rôle prépondérant dans les considérations de sûreté hydraulique. Nous allons voir comment et dans quelle mesure ces rôles sont considérés dans les EDD de barrages.

A questions pratiques, réponses techniques ?

L'EDD est cadrée par arrêté et décrets réglementaires mais aussi par le référentiel méthodologique de l'entreprise qui les réalise. Dans sa forme actuelle, elle porte certaines injonctions à la prise en compte des FOH, par des acteurs et dans un secteur industriel historiquement de culture *technique* (voir 1.2.2).

Dans le cadre de l'EDD, les FOH doivent être mobilisés au quatrième chapitre, consacré à la présentation du SGS qui inclut des dispositions organisationnelles. Ensuite, le huitième chapitre qui présente l'analyse de risques mobilise, le cas échéant, les FOH à travers des évènements initiateurs (on parlera d'EI-FH) ou des Barrières Humaines de Sécurité (BHS[104]). Par exemple, dans ces termes, une ouverture intempestive de vanne liée à une action humaine est un EI-FH et l'intervention d'un opérateur d'astreinte, une BHS. Notre démarche s'intéresse à l'évaluation de l'occurrence des EI-FH or, en raison du périmètre sur lequel porte l'EDD, notre démarche n'a pas à considérer les situations de travaux, de maintenance ou de requalification. Ces situations sont dites transitoires (ou *non-nominales*) et donc exclues de l'EDD puisqu'elles ne constituent pas des situations pérennes à l'échelle de la vie d'un ouvrage[105]. Les bases de données d'ESSH indiquent que les évènements qui

[104] Et par opposition aux barrières *techniques* de sécurité ou BTS.
[105] Elles font, par ailleurs, l'objet d'études d'impacts et d'analyses de risques.

ont des causes explicatives FOH surviennent majoritairement dans de telles situations non-nominales. De ce fait, le REX significatif exploitable pour nos travaux de conception, dédiés à l'EDD, se trouve diminué. Enfin, il convient de noter l'introduction d'un biais « favorable » pour les FOH dans les EDD qui excluent les situations où le FOH (peut) pose(r) problème.

Indépendamment des questions de périmètre, l'approche EI-FH porte des limites liées à l'approche par arbre des causes dans les nœuds papillon. Comme le remarque Denis Besnard, « *il existe une tendance à universaliser l'usage d'une méthode. Un exemple est l'utilisation de l'arbre des causes (un outil des défaillances techniques) pour analyser des accidents dans lesquels des humains sont impliqués. Une fois que l'on aura étiqueté une branche de l'arbre « erreur humaine », sera-t-on réellement en mesure d'éviter sa récurrence ? Qu'aura-t-on compris des conditions dans lesquelles la soi-disant erreur* [se produit] ? » (Besnard, 2010). Le choix de la méthode *nœuds papillon* illustre que « *l'investigation accidentelle est sous l'influence de la compétence et la culture de ses acteurs* » (*op. cit.*). La culture *technique* (d'ingénierie) du CIH, organisme agréé garant de la méthodologie EDD, mais également celle des législateurs et des inspecteurs de l'Etat, impacte les outils et méthodes utilisés. Dans ce sens, on notera également que si les combinaisons logiques[106] effectuées dans les nœuds papillon sont peu discutables sur le plan calculatoire pour des éléments matériels (inertes), elles le sont plus quand elles combinent des dimensions *techniques* et *pratiques* (FOH). Le comportement humain, les mécanismes de la décision ou l'évaluation de la performance peuvent être négatifs ou vertueux voire, les deux à la fois et il est délicat d'affirmer qu'ils répondent à des lois probabilistes, *a fortiori* en l'absence de donnée de simulation.

Dans son étude détaillée des règlements liés à la prévention des risques en France, Emmanuel Martinais note que « *si les rédacteurs* [des textes réglementaires] *sont à ce point efficaces, c'est aussi parce qu'ils recourent au recyclage, c'est-à-dire la réappropriation de techniques et de méthodes existantes, déjà employées dans le domaine concerné ou dans des domaines voisins dont ils ont l'expérience* » (Martinais, 2010a, p. 202). Il ajoute au sujet de l'approche probabiliste que, « *dans les études de dangers,* [elle] *illustre parfaitement cette forme particulière d'innovation qui consiste à faire du neuf avec du vieux. Pour mettre en forme cette méthode spécifique, les ingénieurs de l'INERIS vont en effet mobiliser les résultats de différentes recherches menées sur le sujet ces dernières années, puis les assembler de façon à obtenir un outil d'analyse conforme aux attentes des rédacteurs du ministère. Façonnée en trois semaines, la méthode se présente alors comme le produit d'un travail de mise en cohérence et d'agencement de composants techniques et méthodologiques qui n'avaient pas encore trouvé d'usage réglementaire en matière d'évaluation des risques.* » (Martinais, 2010a, p. 202). Une importante partie des difficultés méthodologiques rencontrées dans les EDD de barrage résulterait donc d'une application (trop) directe des acquis des ICPE (usines pétrochimiques, gazières, etc.) aux ouvrages hydrauliques. En effet, la complexité et le couplage (probabilité d'interactions insoupçonnées) d'un barrage n'est pas comparable à celle de la majorité des ICPE et l'affirmation n'est pas nouvelle : « [dams] *are primitive, compared to nuclear and chemical plants, and there are few unanticipated interactions* [or] *virtually none* […] *the* system is very linear » (Perrow, 1984).

Pour finir, le cadrage réglementaire (ou son absence) joue aussi un rôle dans ces difficultés. A l'exception de la présentation du contenu attendu des chapitres sur le SGS, aucune mention relative aux FOH n'est faite dans les textes réglementaires cadrant l'EDD (décret de 2007, arrêté de 2008).

[106] Associations d'EI par des *portes* « ET » ou « OU » impliquant des évolutions des probabilités d'occurrence.

Pourtant, l'analyse des remarques des DREAL au sujet des EDD montre une préoccupation marquée pour le traitement des EI-FH. En 2012, 80% des EDD *traitées* par les services de contrôle faisaient l'objet d'au moins une remarque sur ces derniers (Larouzée, 2012a). Nous verrons dans la section suivante les effets produits par ces éléments sur la prise en compte des FOH dans les EDD de barrages d'EDF.

Synthèse de la deuxième section

Dans cette section nous avons vu comment s'est façonné le cadre juridique et administratif des risques industriels et comment s'est opéré, en France, un lent glissement d'une administration de *mission* vers une administration de *gestion*. Dans ce contexte, la fonction d'inspecteur des installations classées est passée du rôle de *censeur* à celui de *coproducteur* de normes (Granier, 2012). La mise en place au début des années 2000 des EDD puis, en 2007, leur introduction pour les ouvrages hydrauliques répond de ces tendances de fond autant que d'une volonté d'harmonisation européenne et nationale des référentiels.

Les EDD de barrages d'EDF, du fait d'une *école française des risques* (1.2.1) et de spécificités des ouvrages hydrauliques (1.2.2) ne sont pas des études *probabilistes.* Ce nouveau dispositif a toutefois été à l'origine d'évolutions conséquentes dans la prise en compte des risques liés aux barrages : elles ont fait évoluer une approche *métiers* ou *en silo* des risques vers une approche pluridisciplinaire et par voie de conséquence, renforcé la nécessité d'intégrer les dimensions FOH.

Si les EDD constituent une réelle *opportunité* d'amélioration de la *sûreté* hydraulique, elles présentent aussi un certain nombre de limites et de biais à l'étude complexe de l'homme dans les systèmes industriels. Nous avons mis en évidence un corpus réglementaire relativement flou et des choix méthodologiques essentiellement orientés vers la *technique*, notamment en raison de la culture des différentes parties prenantes dans la relation *contrôleur-contrôlé*. Néanmoins, les enseignements du REX démontrent (ou confirment) l'importance que revêt, pour un responsable d'ouvrage, une approche *pratique* de la sûreté permettant une meilleure intégration des FOH aux EDD qui est, par conséquent, une volonté affirmée du projet-EDD. Les nombreuses remarques des DREAL sur ces aspects FOH montrent, de leur côté, qu'en l'absence de cadre ou de solide état de l'art, les FOH sont également un sujet d'intérêt pour les services de l'Etat.

C'est cette double expression de besoin qui a stimulé ce travail de thèse car, comme le montre la section suivante, aucune solution n'est alors apparu immédiatement disponible.

1.3. Facteur humain : état de l'art, des pratiques et des dispositions industrielles

Cette section s'intéresse à la prise en compte des dimensions FOH dans les EDD de la DPIH. Comme nous l'avons montré, ce point est à la croisée de volontés industrielles et administratives. Toutefois, il demeure un sujet *sensible* (nombre de retours de l'administration à ce sujet suite aux premières EDD).

Dans un premier temps, nous avons tenté d'établir un état de l'art de la prise en compte des FOH dans les risques liés aux barrages. Le nombre de publications ressortant de critères de recherche larges est très faible (N = 8). Ceci peut s'expliquer par une prise en compte industrielle qui ne fait pas l'objet de publications systématiques mais peut également traduire des difficultés, voire des réticences qui peuvent être liées à l'inadéquation des productions académiques de connaissances « FOH ». Celles-ci sont généralement associées à d'autres secteurs industriels (nucléaire, aérien, médicale, voir 2.1.1) et ne conviennent pas nécessairement aux *besoins* ou aux *moyens* des responsables d'ouvrages hydrauliques.

Dans un second temps, et face à l'absence d'un solide état de l'art, nous nous intéressons aux dispositions internes à la DPIH en lien aux FOH. Ces démarches ne s'avèrent finalement pas dimensionnées aux besoins, ni aux moyens de l'EDD (et n'ont pas été conçues pour l'être). Le projet-EDD a toutefois dû prendre en compte certains aspects FOH dans ses analyses de risques dès les premières EDD (2008). Dans le cadre du principe de progressivité dans la réalisation des EDD et suite à l'observation de différents effets indésirables produits par la première méthodologie de prise en compte, le *guide facteur humain EDD* a évolué en 2012 puis en 2015, avec l'application de l'outil ECHO (voir 3.1).

Nous concluons ce chapitre par la présentation du projet de thèse qui précise les postures méthodologiques adoptées pour aborder notre question de recherche.

1.3.1. Revue bibliographique

Dans cette partie, nous présentons un repérage (le plus exhaustif possible) des publications relatives aux FOH dans la sécurité des ouvrages hydrauliques. Ces publications ont été réunies à l'aide de recherches dans des bases de données numériques, ce qui peut exclure certaines sources, uniquement disponibles sur support papier. Toutefois, l'avènement des FOH dans la sécurité industrielle et particulièrement dans le cas des barrages, peut être considéré comme contemporain au développement des bases de données numériques.

Méthodologie

Notre repérage a consisté en une recherche par mots clefs prédéfinis (en français et en anglais), dans des bases de données de publications académiques (Google Scholar, Science direct, HAL). Il a été complété (devant un nombre trop faible de publications dans les bases académiques) par une

recherche via un moteur de recherche généraliste[107] (permettant d'identifier des sources sur les sites de compagnies d'exploitation, par exemple). Les différents mots clefs choisis ont été concaténés suivant la logique : $a + b_i$ *ou* c_i

Tableau 9 : Liste des mots clefs utilisés pour le repérage des publications.

	Français	**Anglais**
a)	Barrage / Centrale hydraulique / Ouvrage hydraulique	Dam / Hydroelectric power plant / Hydraulic structure
b_1)	Facteur humain Erreur humaine Opérateur Violation Fiabilité humaine	Human factor Human error Operator Violation Human reliability
b_2)	Organisation Facteur organisationnel	Organization Organizational factor
c_1)	Accident Rupture Catastrophe Crise Incident Risque Analyse	Accident Break Catastroph Crisis Incident Risk Analysis
c_2)	Sûreté Sécurité Diagnostic	Safety Security Diagnosis

La démarche opérationnelle de la thèse, qui motive cette étude bibliographique, vise à créer un outil d'estimation des risques (et non de leurs conséquences). Nous avons donc exclu des résultats les publications traitant de l'exposition des populations ou des effets sociaux des catastrophes (ex : Peng & Zang, 2012 ; Marchand, 1991).

La recherche nous a permis d'identifier 8 publications (voir Tableau 10). Nous pouvons classer celles-ci suivant deux catégories : l'appartenance de leurs auteurs et la démarche de sûreté considérée. Le premier critère permet de *cartographier* les institutions se saisissant des FOH, les évolutions sont-elles impulsées par une communauté de chercheurs (la ou lesquelles) dont les travaux sont adaptés par les responsables d'ouvrages (comment, pourquoi) ? Ou, au contraire, les professionnels mettent-ils en place des réponses à leurs problématiques FOH ? Sont-elles alors l'objet de travaux de recherche ? Le second critère permet d'estimer une forme de *maturité* dans la prise en compte des FOH en acceptant l'hypothèse que les démarches et méthodes d'analyse post-évènementielles (REX) correspondent à une quête de *sens* et d'*orientations* qui précède dans le temps la phase d'évaluation *proactive* des risques liés aux FOH. Enfin, nous recourons à certains critères de caractérisation bibliographiques *classiques* tels que le support *source* (journal, conférence, ouvrage, etc.), la nationalité de l'auteur (ou plus rigoureusement, de son institution de rattachement) ou encore l'année de publication.

[107] Google.

Résumé des principales publications

Tableau 10 : Synthèse des publications relatives aux FOH dans la sûreté des barrages. Les catégories portent sur l'institution (A : académique / I : industrielle) et sur l'objet des travaux (REX : post-accidentel / PRO : diagnostic proactif).

Auteurs	Pays	Institution	Support	Année	Titre	Catégorie
Alvi	U.S.A.	**Industrie** ASDSO Dam Failures & Incidents Commitee	**Conférence(s)** ASDSO Northeast Regional Conference[108]	2015	*Human Factors in Dam Failures*	I, REX
Dandan & Lei	Chine	**Recherche** Nanjing hydraulic research institute	**Journal** Advanced Materials Research vols.225-226	2011	*Suggestion of Introducing the Human Reliability into Dam Risk Analysis*	A, PRO
DSIG (Dam Safety Interest Group)	Canada	**Mixte** CEATI (*Centre for Energy Advancement through Technological Innovation)*	**Conférence** Summary Report of Workshop (30 avril & 1er mai 2001)	2001	*Workshop on Reliability of Discharge Equipment*	I, hors critères
Hartford & Baecher	U.K.	**Mixte** Dam Safety Interest Group	**Ouvrage** Risk and Uncertainty in Dam Safety	2004	*Chap 9.5 : Fault Tree Analysis, operator actions*	I, PRO
Hill	U.S.A.	**Industrie** Metropolitan Water District of Southern California	**Conférence** USSD 32nd annual conference Innovative Dam and Levee Design and Construction	2012	*Organizational Response to Failure*	I, REX, PRO
Martin *et al.*	Canada	**Industrie** AMEC Earth & Environmental Limited	**Conférence** Canadian Dam Association Annual Conference (2001)	2001	*Pearl Harbor: Lessons for the Dam Safety Community*	I, REX
Norstedt *et al.*	Suède	**Industrie** Swedish utility Vattenfall	**Web** www.hydroword.com	2008	*Considering Human Factors in Dam Safety*	I, REX, PRO
Perrow	U.S.A.	**Recherche** Sociology, Yale University.	**Ouvrage** Normal Accidents	1986	*Chap 7 : hearth bound systems*	A, hors critères

Les années 1980 : la prise de conscience du rôle des FOH dans les accidents de barrages

Les années 1980 semblent être celles d'une prise de conscience de l'importance des FOH dans la sûreté des barrages. Les barrages sont alors des ouvrages qui ont connu une période conséquente de développement à l'échelle mondiale (voir 1.1.2) et, suite à l'accident de la centrale nucléaire de Three Mile Island (TMI), les premières études sur ce qu'on appellera bientôt les FOH sont réalisées dans différents domaines industriels (voir 2.1.1).

En 1983, un rapport au département de l'intérieur américain sur les barrages et la sécurité publique indique que les causes récurrentes d'accidents de barrages sont les orages, les tremblements de terre, les défaillances d'équipements et les erreurs des opérateurs (Jasen, 1983). L'année suivante, une étude australienne sur les accidents nationaux de barrages conclut « *there is room for improved*

[108] On trouve en ligne un fichier PDF « auto-publié » de 11 pages (qui n'est pas daté) portant le même titre et du même auteur.

hydrological estimation but this is much less important than the reduction of human error, residing chiefly in the construction quality control (and, by implication, supervision). » (Ingles, 1984).

Le besoin de développer le rôle des hommes dans les accidents de barrages reçoit un premier écho dans les travaux du sociologue Charles Perrow. Le septième chapitre de son livre *Normal Accidents* (Perrow, 1984) s'intitule « *earthbound systems : dams, quakes, mines and lakes »*, il est consacré à des systèmes qu'il qualifie de « *primitive, compared to nuclear and chemical plants* » auxquels il consacre la plus grande partie de son livre. Cet aspect « primitif » est un point positif en terme de sûreté car cela implique que le système, simple, est prévisible pour l'homme : « *there are* [virtually no] *unanticipated interactions in dams* ». Perrow s'intéresse aux barrages pour leurs potentiels de dangers et, étant donné leur simplicité, le rôle de l'organisation dans les accidents : « d*ams have catastrophic potential, a matter of interest to us, but dam failures are not system accidents. The system is tightly coupled but very linear.* (Perrow, 1984, p. 232).

A travers le récit détaillé, depuis la construction jusqu'à la rupture, du barrage de Grand Teton (mais aussi des considerations issues de trois autres cas de rupture : Vajont, Church Rock et Tablachaca), Perrow dépasse l'idée que les FOH seraient (presque) aussi importants que les facteurs techniques pour expliquer les accidents : il les place au premier rang. "*The Teton Dam disaster was not so much an engineering failure as an organization one"* (Perrow, 1984, p. 233). Enfin, il enjoint à la méfiance face à l'apparente *simplicité* d'un système (barrages, mines, …) car il se trouve des occasions où le système n'est en réalité qu'un composant d'un système plus large. Echouer à le percevoir peut donc conduire à des interactions inattendues et indésirables : les accidents éco-systémiques.

> « *Despite the linear nature of these systems, there is occasion for system accidents when thay are linked to other systems in unanticipated ways. Earthquakes not only stem from "the restless earth" as Nigel Calder calls it, but from restless humans who think on a small scale in an ecology that is large scale. With some dams an unanticipated expansion of system boundaries creates what we shall call an "eco-system" accident, a concept relevant to the toxic waste problem as well as earthquakes.* » *(Perrow, 1984, p. 233).*

Années 2000 : les méthodes de fiabilité humaine dans les analyses de risques de barrages ?

L'article suggérant l'introduction de méthodes de fiabilité humaine dans les analyses de risques présentés par les barrages, semble le plus proche de nos considérations (Dandan & Lei, 2011). Dans un court article de trois pages, les auteurs évoquent l'importance du management, de la maintenance et de *l'erreur humaine* dans les accidents de barrages. Ils se basent sur le retour d'expérience du parc chinois (ruptures ou débordements de quatre barrages entre 1969 et 1998) pour noter que malgré l'importance des FOH, la recherche dans le domaine des barrages sur les questions de fiabilité humaine est *vierge* : « *lots of accidents of dam break was caused by human error* […]. *However, people have been focusing on the dam system and component reliability research, so the human error probability of research is a blank ».* Partant de ce constat et d'une très brève revue de littérature sur les méthodes fiabilistes (dites HRA), ils indiquent retenir une méthode nommée « *improved HCR »* (Gong, 2008 ; cité par Dandan & Lei, 2011) dont ils explicitent les hypothèses « *HCR method has two important hypothesis : (1)Dam operate is distributed into skilled, rule, knowledge. (2) The fault probability is only dependent on ratio of allow time (t) and operation time (T)* […]. *The operation time T varies with different situation, so* […] *three performance shaping factors should be considered in HCR model: experience (K1), pressure (K2), Man-Machine Interface*

(K3) [and] physiology (K4), environment (K5) and organization (K6) ». Les auteurs avancent alors une formule[109] mais échouent à proposer une solution convaincante pour en déterminer les paramètres. Selon eux, les valeurs des coefficients K1 à K6 « *should be based on engineering experience, survey, judgment of experts and simulation experiment »* et concluent « *which need further research ».* Au final, l'article ne constitue malheureusement guère plus qu'une pétition de principe.

On trouve également une réflexion sur l'utilité des méthodes de fiabilité humaine dans un livre dédié aux risques de barrages (Hartford & Baecher, 2004). Les auteurs développent très brièvement (pages 246, 247 puis 281 dans un ouvrage de 416 pages au total) le fait que les FOH comme des évènements initiateurs aux incidents et qu'il convient donc d'intégrer les erreurs (*operator errors*) dans les *arbres des causes* (f*ault tree model*). Enfin, les auteurs indiquent que les actions des opérateurs sont influencées par huit facteurs : les procédures, les indicateurs, les choix de sauvegarde, le temps disponible, l'accessibilité du site, la complexité des procédures, la complexité des actions et le niveau de stress. Ils concluent *« the process of evaluating operator error probabilities can be difficult and time consuming* [...]*.* » avant de renvoyer vers une littérature canonique des HRA (non adaptée spécifiquement aux barrages) « *resources that can be consulted to carry out a HRA are Swain and Guttman (1983) and Erickson et al. (1990). These references define comprehensive procedures to access operator error probabilities.* » (Hartford & Baecher, 2004, p. 247).

Finalement, l'intégration des HRA dans les études de risques est plutôt *souhaitée* que *réalisée* par ces auteurs. On remarque un paradoxe entre l'affirmation récurrente de l'importance incontournable des FOH et le peu de place qui leur est accordée (ceux-là ne font l'objet d'aucune *adaptation* aux barrages). Ce paradoxe relève de l'expression d'un besoin d'ingénieur (réduire le comportement humain à un ensemble de probabilités afin de le rationaliser) à laquelle aucun « état de l'art » dans le domaine des barrages ne peut apporter de réponse immédiate. En 2015, les lignes ont-elles bougé ?

2015 : Les ingénieurs parlent toujours de facteur humain dans les accidents de barrages...

Irfan A. Alvi est un ingénieur en génie civil américain, spécialisé dans les grands ouvrages et notamment les barrages. Il est l'auteur de quatre communications au sujet du rôle des FOH dans la communauté et s'avère être l'auteur le plus actif sur la question que la revue de littérature a permis d'identifier. L'ensemble de ses productions accessibles (deux fichiers Powerpoint présentés en conférences et deux articles rédigés auto-publiés) est disponible via le site internet de son cabinet (Alvi Associates, Inc.).

Dans ses développements, Alvi introduit les défaillances de barrages comme le fait d'une interaction dans la durée entre des éléments *techniques* et des éléments *humains.* Il remarque que les défaillances des ouvrages sont fondamentalement dues aux FOH (« *physical systems are deterministic, nature doesn't make 'mistakes'. So failure (unmet expectations) is fundamentally due to human factors* » Alvi, Ka Loko, 2015). Il note toutefois que certaines organisations parviennent à maintenir un très haut niveau de sûreté bien qu'elles soient confrontées à des milieux *à risques* (on les qualifie de HRO[110]), notamment grâce au développement d'une forte *culture sûreté* et au recours à des *bonnes pratiques* (best practices). Alvi propose alors un ensemble de *bonnes pratiques*

[109] $T = T_n \times (1 + K_1) \times (1 + K_2) \times (1 + K_3) \times (1 + K_4) \times (1 + K_5) \times (1 + K_6)$

[110] Pour High Reliability Organisations (voir X.X.X.).

associées aux barrages (voir Tableau 11) et illustre à travers différents cas[111] leur mise en application ou en défaut. Comme l'illustrent les deux extraits qui suivent, il conclut ses études de cas par une injonction à l'application des *bonnes pratiques* qu'il encapsule dans la notion de *culture*.

> « *Dam failures are fundamentally driven by human factors […] but dam safety can be maintained by diligent application of best practices, in the context of safety cultures which are vigilant about both avoiding failure and achieving success* » (2015, barrage Ka Loko).

> « *Fundamentally, all dam failures can be attributed to human factors, at both individual and group levels. […] By doing our part in implementing high-reliability practices in the dam safety community, dam safety [practitioners] can contribute to reducing the occurrence of dam failures*. » (St Francis, 2015).

Tableau 11 : « Best practices for dam safety » d'après Alvi (2015).

General Design Features	Organizational & Professional Practices	Warning Signs
• Conservative safety margins • Redundancy, robustness, and resilience • Following generally-accepted best practices for design and construction • Customization to project sites, including scenario planning during design and testing/adaptation during construction • Progressive and controllable failure which generates warning signs • Emergency action planning based on accurate hazard classification	• Safety-oriented personnel selection • Sufficient resources, reasonable schedules • Peer-review and cross-checking • Information sharing, including thorough documentation • Diverse teams, but with leadership, avoiding 'diffusion of responsibility' • Recognizing knowledge limitations, deferring to expertise, training • Use of checklists • Appropriate system models (possibly including human factors directly in the models), and careful software use • Professional, ethical, and legal/regulatory standards • Learning from failures and incidents	• Look for them actively and monitor, including after unusual events • Investigate to understand their significance • Address promptly and properly, with verification of follow-up • Be suspicious during 'quiet periods'

Les études de cas présentées par Alvi sont détaillées et mettent, sans équivoque, les FOH au premier rang des problématiques de sûreté des ouvrages hydrauliques. On note toutefois que ses contributions n'apportent pas de réponses pragmatiques à l'effort de maîtrise des risques. Le concept de *culture* est vaste et certaines des *bonnes pratiques* permettent (par leur défaut) l'explication rétroactive des accidents mais ne sont pas applicables à l'exercice de diagnostic proactif. Enfin, il est intéressant de souligner une opposition (au moins conceptuelle) entre Alvi et Perrow quant à la notion de *complexité.* Pour le sociologue les barrages sont, comparés à d'autres systèmes industriels *à risques*, simples et linéaires.

L'ingénieur lui, affirme que les barrages sont complexes.

[111] Les accidents de Saint Francis, Big Bay, Ka Loko et Sella Zerbino, qui correspondent chacun à l'une de ses quatre contributions.

> « *Accidents in* [dams] *can redily be reduced; the fatal combination of complexity and tight coupling is not present.* » *(Perrow, 1984, p. 232).*
>
> « *Given the complexity of dams, especially when associated human factors are brought into the picture,* […] *we need to go into failure investigations with an awareness that the story we end up telling may be a complex one, recognizing that causes can have multiple effects, and effects can have multiple causes, all linked and developing over time.* » (Alvi, 2015, St Francis).

Une réflexion sur la question de la complexité, de nature à éclairer le dualisme exprimé par ces propos, est proposée dans la partie « *complexité ontologique, complexité épistémologique* » (voir 4.3.2). On illustre, avec ces deux citations, le propos d'Edgar Morin : « *la complexité est un mot problème, pas un mot* solution » (Morin, 1990).

Les travaux d'Alvi apparaissent en l'état limités à l'analyse de REX : l'amélioration *proactive* de la sûreté par la prise en compte des FOH ne saurait se résumer à un *benchmarking* d'autres secteurs (les HRO)[112], qu'il conviendrait d'appliquer (sans conseils *pratiques* pour y parvenir) aux barrages[113].

Synthèse : absence de réel état de l'art et phase transitoire

Notre exercice de repérage des différentes contributions, malgré une approche se voulant la plus large possible et n'impliquant aucune restriction géographique ou temporelle, ne fournit pas un corpus conséquent de références (N = 8), pourtant étalé sur plus de trente ans (1983 - 2015). Les deux tiers[114] sont des publications *industrielles*. Des deux seules publications *académiques* identifiées, celle de Charles Perrow témoigne d'un intérêt pour les FOH dans les barrages précoce, ou du moins, parfaitement contemporain avec les démarches qui étaient alors mises en place dans l'aviation ou le nucléaire. En 2015 il est possible de constater que l'« appel » du sociologue n'a pas été relevé par la communauté de recherche. La répartition égale d'articles relatifs à l'analyse et au diagnostic pourrait témoigner d'une phase *transitoire* où les responsables d'ouvrages, après avoir pris conscience du rôle des FOH dans les évènements qui affectent les ouvrages, cherchent à en anticiper les conséquences.

Les tendances divergent entre la tentation de développer de nouveaux outils dédiés aux barrages et celle d'adapter directement des méthodes existantes. On rappellera sur ce point l'absence de consensus sur la *complexité* d'un barrage. Pour Perrow, elle n'est pas comparable à celle d'une centrale nucléaire ou chimique, les barrages sont des systèmes linéaires où les composants interagissent de façon *simple.* Pour Alvi, au contraire, les barrages sont des systèmes complexes. Perrow ne néglige pas d'affirmer que la *complexité* peut venir du fait que les barrages intègrent des systèmes plus larges : les écosystèmes. Cette difficulté onto-épistémique peut représenter un frein au développement culturel et méthodologique, nécessaire à la prise en compte des FOH.

[112] Qui, bien que performants (par définition !) marquent d'importantes différences avec les barrages, tant sur le plan technique (fonctionnel, structurel) que pratique (activités, culture, etc.). Nonobstant, un rapprochement existe dans les publications d'Alvi « *these factors illustrate many ways in which HRO traits were lacking* » (à propos de l'accident du barrage de St Francis).

[113] Il nous a semblé intéressant de confronter nos visions et nos perspectives avec un auteur, comptant parmi les trop rares personnes à publier (en 2015) sur la question des FOH dans la sûreté des barrages. Nous l'avons donc contacté à plusieurs reprises sans succès.

[114] On gardera à l'esprit la faiblesse des remarques quantitatives vu la taille de l'échantillon de référence.

Face à cette absence d'état de l'art, on trouve des informations (auto-publiées) sur des démarches industrielles comme celles de Vattenfall Utility (suédoise) mais aussi des surprises liées aux éléments de langage : les *actes* du 28ème congrès annuel de l'USSD (U.S. Society of Dams, un des acteurs majeurs de la communauté mondiale des hydrauliciens) s'intitulent « *the sustainability of exeprience – investing in the human factor ».* Le document, disponible sur le site internet de l'USSD, a donc été repéré par notre protocole de recherche. On y trouve 81 articles (plus de 1200 pages) exclusivement *techniques* traitant de la conception, de la construction, de la réhabilitation, ou encore de la surveillance *instrumentée* des ouvrages. Le titre est en réalité relatif au besoin de transmission des compétences entre des *ingénieurs* proches de la retraite et les jeunes ingénieurs actifs.

Dans la partie suivante, nous allons nous intéresser spécifiquement aux démarches de la DPIH d'EDF relatives aux FOH.

1.3.2. Revue des dispositions industrielles : le cas d'EDF-DPIH

Les FOH bien que présents dans les évènements, des incidents aux accidents majeurs, ne font pourtant pas l'objet de réel *état de l'art,* théorique ou pratique, et nécessite donc des travaux d'approfondissement. Ces dimensions ne sont cependant pas totalement absentes des démarches industrielles (qui, du reste, ne font que rarement l'objet de publications).

Cette partie présente les principales dispositions de la DPIH en matière de FOH. Après avoir proposé un *historique compréhensif* de la percolation des FOH dans la division, nous présentons sa principale démarche : le *réseau SOH*. Cette présentation permet d'affiner la compréhension des évolutions que propose l'EDD, au regard de l'existant. Il met aussi en évidence l'inadéquation de la *méthode SOH* pour répondre aux objectifs de l'EDD (en accord avec les *moyens* pour sa production). Enfin, nous présentons les deux approches successives des FOH dans les EDD d'EDF, depuis 2008 jusqu'à l'enclenchement des travaux de thèse.

Histoire du facteur humain à la DPIH

L'approche historique des *risques* liés aux barrages est une approche *métiers* ou *en silo.* Schématiquement, chaque corps de métier adopte à son périmètre des outils ou des méthodes différentes d'analyse et de maîtrise des risques. Cela s'explique entre autres par l'histoire même de la division d'hydroélectricité d'EDF qui a été créée par la fusion de plusieurs dizaines de petites sociétés d'exploitation lors de la nationalisation de l'électricité en France (1946). L'approche en silo a des origines culturelles de différenciation et de valorisation de démarches (comme le REX) locales. L'un des effets produits par cette approche est la création de *zones de recouvrement* et de *zones d'exclusion* dans les analyses. Dans une culture technique et un domaine d'ingénieurs, « le FOH » qui n'est pas un métier à part entière, se situe donc dans une forme de *zone d'exclusion*.

Les grands accidents font l'objet d'études approfondies presque exclusivement *techniques* qui nourrissent des bases de données ou des *référentiels de risques* « métier ». A la suite de l'accident du Drac (voir 1.1.3) et dans un contexte plus large d'évolutions culturelles de l'Entreprise, une impulsion centrale opère une première intégration des FOH aux démarches de sûreté.

Au courant des années 1990, une série d'évènements survenus sur le parc hydraulique mais aussi dans le secteur de distribution et de transport amènent l'accélération de la diffusion des acquis du secteur nucléaire au reste de l'Entreprise. La division nucléaire d'EDF a en effet connu une évolution singulière de la prise en compte des FOH. D'une part, le développement conséquent et rapide du programme nucléaire français a généré un renouvellement et une augmentation considérables du personnel qui a *coupé* la production nucléaire de la culture antérieure de production. D'autre part, le secteur nucléaire mondial a été un lieu d'incubation de plusieurs concepts et théories, cela a contribué à la prise de conscience de la profession mais aussi des autorités de contrôle qui ont fixé, dès la fin des années 1970, des normes et des contrôles très élevés[115].

Suite à l'accident de TMI (1979) aux Etats-Unis, une première équipe « facteur humain » est créée dans la division nucléaire d'EDF en 1982. Deux ans plus tard, est créée la première base de données sur les incidents. Cette période est globalement marquée par la recherche de définitions et de conceptualisation du *facteur humain.* La mise en place d'observation des exploitants en simulateurs apporte des éléments complémentaires aux démarches compréhensives et sert de base au développement des *études probabilistes de sûreté* (EPS) (Colas, 1998). On peut considérer le domaine nucléaire en *avance de phase* sur les autres secteurs de la production. On peut également observer que des mutations entre secteurs de production (du nucléaire vers l'hydraulique dans notre cas) sont corrélables avec la mise en place ou l'accélération de démarches FOH.

Si l'importance du secteur nucléaire dans le mix énergétique de l'entreprise (près de 80 %) a contribué au développement des FOH, des différences *techniques* et *pratiques* avec les autres secteurs interdisent leur percolation complète. Aussi, si la production nucléaire bénéficie de bases de données statistiques, issues de la simulation (qui permettent des études probabilistes de fiabilité humaine), la diversité des ouvrages hydrauliques (caractère prototypique de chaque aménagement) empêche la création de pareils simulateurs. Dès lors, les transferts directs de connaissances entre un secteur *probabiliste* et l'autre *déterministe* sont délicats. Si la DPIH a entrepris la modernisation de son parc qui génère une augmentation des automatisations et la standardisation des usines hydroélectriques, le *décalage de phase* (entre 10 et 20 ans) présentera toujours une difficulté, elle aussi *culturelle.* Un autre effet produit par l'importance du secteur nucléaire est sa plus grande priorité opérationnelle ; ce qui se traduit sur les ressources, les budgets mais également les études. EDF possède une R&D[116] qui couvre l'ensemble des secteurs de production et une grande partie de ses activités est orientée vers le nucléaire. Un phénomène de rétroactions positives a semble-t-il été à l'œuvre ces vingt dernières années. L'évolution des pratiques FOH du secteur nucléaire, encouragée par de nombreuses études de la R&D, augmentait l'écart avec les autres secteurs, cet écart rendant délicat le transfert d'équilibre des connaissances déjà fragilisé par le manque d'études dédiées aux FOH dans le secteur hydraulique. Dans ce temps, nous l'avons explicité, le secteur hydraulique progressait dans une approche en silo et non probabiliste des risques.

[115] *A minima* en comparaison avec les autres domaines de production (hydraulique, thermique, etc.) de l'entreprise.

[116] Historiquement, la R&D est étroitement liée au secteur nucléaire dans l'Entreprise. EDF a d'ailleurs constitué au début des années 1980 sa première équipe *facteurs humains* au Centre de Recherche (actuelle R&D) pour réaliser des études en ergonomie cognitive dans ses centrales et ce, dans le cadre d'un programme issu des enseignements de TMI (Colas, 1998).

La prise en compte des FOH, s'ils ne sont pas des *métiers,* semble bien relever de considérations *culturelles*. Leur évolution à la DPIH depuis la fin des années 1990 est donc autant liée à l'évolution du cadre réglementaire (voir 1.2.2) qu'à une percolation des cultures et des méthodes entre les secteurs de production. Ainsi, la mise en place des ESSH (puis des EISH) a constitué un dispositif conséquent de veille et d'analyse des incidents ou accidents et fourni des bases de données. Des impulsions managériales ont contribué à la mise en place d'analystes sensibilisés aux sciences humaines (voir ci-dessous le *réseau SOH*). Enfin, la production d'EDD implique de dépasser l'approche en silo des *risques* au profit d'une vision *fonctionnelle*, pluridisciplinaire : évolution significative pour les aspects *techniques* mais peut-être bien plus encore pour les aspects *non-techniques.*

Le réseau SOH

Suite à l'accident du Drac, dès 1999, le guide d'analyse des ESSH prend en compte des dimensions humaines et organisationnelles dans les analyses. Mais, la méthode, essentiellement portée par les analystes eux-mêmes, est une approche factorielle qui donne lieu à des plans d'actions très fournis qui ne se trouvent que rarement ou partiellement mis en œuvre comme l'a montré le REX interne à la DPIH. En 2005, la Direction soucieuse d'améliorer les performances globales de la DPIH met en place une démarche chargée de prendre en compte « *les dimensions socio, organisationnelles et humaines (SOH)* » (selon le cadrage interne) en particulier pour renforcer la prise en compte du REX.

Après un examen « de l'existant » et des réflexions à divers niveaux sur les objectifs, les apports, le portage et les moyens, un *réseau SOH* est mis en place dans toutes les unités de la DPIH en 2007. Les *plans à moyen terme* (PMT) des unités incluent alors des objectifs ambitieux : la réalisation de deux analyses SOH approfondies par an et par correspondant SOH. L'ensemble des correspondants SOH[117] est formé aux bases de la pratique à la fin 2007. Dans le même temps, l'ensemble des managers est sensibilisé à la démarche. Les études SOH portent autant sur des problématiques de sécurité que de performance industrielle.

Les formations sont très appréciées par le management et les analystes. Les analyses montent rapidement en qualité et apportent de nouvelles pistes de réflexion. Des réticences managériales sont rencontrées : les analyses sont longues (environ un an) et coûteuses (mobilisation importante de ressources pour les enquêtes et les entretiens), les plans d'action et recommandations impliquent souvent des efforts conséquents tant ils portent sur l'organisation. Le besoin opérationnel de limiter les évènements *méritant* de tels efforts d'analyse a conduit à la validation d'un principe de traitement des ESSH suivant trois niveaux : le simple classement (N0), l'analyse de premier niveau (N1) et l'analyse approfondie (SOH ou N2). Le REX conduit en 2008 à une révision du référentiel et de la méthodologie d'analyse.

Depuis 2010, le *réseau SOH* subit deux tendances antagonistes ; une, au niveau national, visant à développer la démarche (augmentation du nombre d'analyses, analyse des invariants sur l'ensemble des études produites, réflexion sur les apports du réseau aux projets de la division, etc.) et une autre, au niveau local, soucieuse d'alléger la charge que ces études représentent. On peut illustrer cette deuxième volonté par la mise en place d'*analyses N2 « simplifiées »*, généralisée suite à l'initiative d'une des unités de production. En 2013, si la démarche est bien ancrée et installée, elle présente

[117] Il est important de préciser que les *analystes SOH* ne sont pas exclusivement voués à cette activité.

des signes d'essoufflement. Le nombre d'analyses SOH réalisées par an est en baisse[118]. Les analystes formés alertent sur leurs difficultés à maintenir les compétences face à la baisse de réalisation de nouvelles analyses et leur *isolement*. En effet, des *analystes de la première heure* mutent ou partent à la retraite et les profils proposés par les directions s'éloignent des filières risques (SST et SH). On note des difficultés à ouvrir des terrains d'étude ou trouver des sujets d'analyse SOH ainsi qu'une présence moins systématique des membres du réseau aux réunions.

Depuis la création du réseau il y a bientôt 10 ans, l'environnement et les besoins[119] ont évolué. Les pratiques SOH sont installées et reconnues mais les attentes (fortes) du management s'éloignent des *diagnostics* pour tendre vers une aide dans les transformations (notamment du fait d'une emprise forte d'un vaste projet de modernisation du parc (*Renouv'eau*) dans les priorités opérationnelles.

Un certain nombre de nouvelles orientations et besoins sont définies par le *réseau* et partagées par la direction. Progresser sur les analyses N1 en y intégrant des dimensions SOH et mieux partager leurs enseignements. Développer *l'appui au management* en progressant du *diagnostic* à l'*analyse-intervention*. Des points de vigilance concernent le peu d'analyses N2 par an dans les entités et la baisse de disponibilité des analystes.

Notons enfin que le projet-EDD ne mobilise ni la méthodologie ni les compétences du réseau SOH. La méthode, même dans sa version *simplifiée* n'est en effet pas *compatible* avec le cadre de l'EDD. Le fonctionnement en groupe de travail et le calendrier réglementaire pour la réalisation des études imposent des contraintes de temps et de lieu. Il n'est guère possible d'envisager pour une EDD la conduite d'entretiens et d'enquêtes, le groupe de travail disposant en moyenne de trois journées de rencontre (visite, APR, ADR). De plus, l'EDD s'inscrivant dans un ensemble plus large de sûreté (notamment le *réseau SOH*), n'est pas à apparenter à un audit organisationnel et humain. La mobilisation conséquente de ressources et le défi qu'a représenté la mise en place des EDD ont donc exclu le recours spécifique ou systématique aux compétences SOH pour traiter des aspects humains et organisationnels de l'analyse de *risques* EDD.

Dans la partie suivante, nous présentons les approches successives des FOH dans les EDD, depuis 2008 jusqu'à l'application de l'outil ECHO résultant de ces travaux de thèse.

1.3.3. Le facteur humain avec un nœud papillon

Les EDD de barrages ont, nous l'avons vu, constitué une évolution majeure dans l'approche des risques. Elles contribuent notamment une injonction de l'Etat vers les responsables de barrages d'intégrer à des études pluridisciplinaires des risques leurs dimensions « FOH ». A évolution culturelle est venue s'ajouter, dans le cas d'EDF, une contrainte temporelle forte en raison d'un parc important nécessitant de réaliser 157 EDD en 6 ans (de 2008 à 2014). Nous avons également établi que les EDD sont réalisées dans un contexte particulier. Le plan des études constitue une prescription réglementaire (les marges de manœuvres en matière de méthodologie sont donc limitées). Les délais impartis pour réaliser les études d'ouvrages sont fixés par décision préfectorale (les marges de

[118] 12 en 2007, 10 en 2008, 16 en 2009, 10 en 2010, 9 en 2011, 10 en 2012 et 5 analyses en 2013.
[119] *A minima,* la perception de ces besoins par les commanditaires des analyses SOH.

manœuvre temporelles sont donc quasi nulles). Le fonctionnement en *groupes de travail* impose certaines contraintes de lieu (lors des réunions) mais aussi de temps (3 à 5 journées de réunion des GT-EDD). Dans cette partie nous présentons les différentes méthodes qui ont accompagné, dans ce contexte contraint, les groupes de travail dans leurs études des aspects humains et organisationnels.

2008 : l'erreur humaine « courante » ?

En 2008, la prise en compte des EI-FH dans les EDD est systématique mais peu précise et profonde. Le guide méthodologique ne donne aucune indication relative aux FOH pour la collecte de documents ou la visite du site, la question des FOH est posée « en salle », lors des analyses préliminaires de risques qui font apparaître deux types d'EI : *erreur humaine* et *défaillance humaine.* La notion renvoie de façon arbitraire à « *l'interruption inopinée d'une activité en cours de réalisation ou attendue, liée à la « fiabilité intrinsèque » d'un individu* ». Sa cause est généralement appréhendée comme un événement subi et indépendant de l'organisation (ex : malaise, chute de plain-pied, accident, ...). La notion d'*erreur humaine*, elle, pose question puisqu'elle réduit à l'*erreur* une variété d'actions qui résultent de la très complexe cognition humaine (sinon, nous le verrons, à des aspects organisationnels comme la culture, les procédures, etc.). Dès lors, sans aborder la problématique de cotation (semi-probabiliste[120]) qu'implique l'EDD, il apparaît délicat de rendre compte de façon réaliste des situations réelles d'exploitation dans un cadre manichéen et réducteur (l'action aux effets négatifs – anticipés – réduite à l'*erreur* et considérée comme EI opposée à celle aux effets positifs – attendus – comme BHS). Le découpage du nœud papillon sépare donc conceptuellement et opérationnellement des gestes d'exploitation (EI) et le contrôle, humain, visant à en prévenir les effets négatifs (BHS d'inspection ou de maintenance) alors que les connaissances actuelles tendent à montrer de mieux en mieux les rétroactions dynamiques entre ces deux faces d'une même pièce[121], la *performance* humaine.

L'estimation alors faite des occurrences des EI-FH (*erreur humaine*) est, quant à elle, portée par une méthodologie basique. Celle-ci consiste à coter en fonction des effectifs en accord avec un postulat, largement discutable, qu'un tiers est une source *fiable* de prévention ou de rattrapage des erreurs :

- erreur cotée A (courant)[122] si l'opérateur est seul,
- cotation B (probable) en présence de deux opérateurs,

Comme il est fréquent, sur les ouvrages hydrauliques, que l'opérateur intervienne seul la cotation des EI *erreur humaine* était souvent réduite à la classe A.

Cette approche pouvait, dans une logique *technicienne*[123], sembler satisfaisante. Les FOH faisant appel à des compétences qui n'étaient pas immédiatement disponibles (analystes SOH, membres de la R&D, consultants externes, etc.) il s'agissait donc, sans chercher à mener une étude précise du « composant humain » d'en considérer l'« état » le plus « pénalisant » (une cotation en A signifiant des erreurs humaines « courantes ») avant de « démontrer », à l'aide des logiques combinatoires du nœud papillon, que la classe finale de probabilité d'occurrence d'un ERC demeure, elle, acceptable. En d'autres termes : ne sachant pas déterminer précisément les FOH, l'analyse de risque « l'élimine »

[120] Ou par *probabilités qualitatives.*
[121] Image utilisée par James Reason (1990b).
[122] Les lettres et équivalents qualitatifs font référence à la *nomenclature* EDD, issue de l'arrêté ICPE de 2005.
[123] Au sens des sciences *techniques* de l'ingénieur.

de l'équation en le considérant défavorable avant de s'appuyer sur des éléments *techniques,* que l'on sait étudier, pour aboutir. On pourrait ajouter la responsabilité qu'engage le signataire d'une EDD comme élément moteur à cette posture *conservative.* L'ingénieur expert (dans un domaine technique) chargé d'appliquer la méthodologie est-il en capacité de se prononcer sur la possible occurrence d'un évènement relevant des FOH sans formation à ces questions, qui plus est, en termes probabilistes – même *simplement* qualitatifs ? N'est-il pas naturel qu'en engageant une forte responsabilité[124], il se cantonne à son champ d'expertise ?

Sans épiloguer sur le crédit scientifique et théorique que l'on peut accorder à la méthode (découpage réducteur manichéen et cotation normative basique réalisée sans compétence particulière), on peut en commenter certains effets produits. Les limites de cette approche ont été soulignées par les retours des services de contrôle de l'Etat. D'une part, la systématisation d'EI-FH cotés A fournissait une vision excessivement négative du professionnalisme des agents et par conséquence de la sûreté des ouvrages. De plus, en l'absence de choix méthodologiques détaillés, des incompréhensions ou des désaccords étaient exprimées par les DREAL à la réception des EDD. Un autre effet, sans doute moins mesurable quoique saillant était l'insatisfaction *latente* des exploitants, présents dans les groupes de travail ; ils étaient peu consultés par les ingénieurs et voyaient associer l'attribut *courant* à des *erreur*s dont ils peinaient parfois à concevoir jusqu'à la possibilité *physique*. Il est évident que cette insatisfaction produisait à son tour un certain nombre d'effets indésirables à divers temps du processus global de production des EDD[125]. Ces constats ont amené à deux décisions du projet-EDD en 2012 : une première évolution du référentiel méthodologique relatif aux FOH et l'enclenchement de cette thèse.

2012 : de l'erreur aux gestes inappropriés

Les réflexions suscitées par les EDD ont fait écho à divers échelons (rapports annuels de l'Inspecteur Sûreté, réflexions au niveau national à la MSP – mission sûreté prévention - et au sein de la R&D d'EDF). Le projet-EDD ayant passé la phase de « développement » et d'« expérimentation » pour entrer dans une phase pérenne de « production » des études, des ressources ont pu être allouées à l'amélioration de certains aspects incluant le facteur humain.

Dès juin 2012 une note interne portant sur l'évolution du référentiel de cotation du facteur humain indique qu'une « *meilleure appropriation des avancées académiques est nécessaire pour orienter les contributeurs du projet EDD vers une vision systémique et organisationnelle des évènements liés à l'humain* ». Cette note qui fait suite à une décision du Président du Comité de Validation des EDD au CIH (le Directeur Adjoint en charge de la maîtrise des risques), précise que « *les difficultés actuelles sont inhérentes aux différences de cultures existant entre les sciences de l'ingénieur et les sciences humaines (dans l'organisation d'EDF mais également de nombreuses autres entreprises). Il semble donc intéressant et nécessaire d'opérer un rapprochement de ces visions, dans une étude de dangers pluridisciplinaire* » (Planès, 2012).

[124] En 2012, un tribunal italien condamne à des peines de prison sept experts en sismologie pour n'avoir pas alerté de l'occurrence d'un séisme (en avril 2009) de forte magnitude. Cette décision de justice a eu un large retentissement dans la communauté de l'expertise scientifique.

[125] Ces effets ont fait l'objet de rapports internes suite à des observations et entretiens réalisés dans le cadre d'un stage ingénieur, réalisé au CIH dans le cadre du projet-EDD (Larouzée, 2012a).

C'est dans ce contexte qu'a été décidée la collaboration entre EDF-CIH et le CRC des Mines Paristech dans le cadre d'une thèse CIFRE[126]. Ce projet de thèse portait notamment sur la « *détermination d'une méthode qui permette, dans un contexte contraint, une meilleure efficience dans la compréhension, l'analyse et la retranscription, des facteurs humains et organisationnels* ». Dans l'attente de la réalisation de cette méthode et de l'avancée de travaux de recherche, la mission maîtrise des risques (MMR) du CIH a été chargée d'aider le projet-EDD à faire évoluer la méthodologie. Pour ce faire, la MMR s'est appuyée sur les compétences SOH et sur une collaboration avec la MSP afin que les travaux soient coordonnés avec les actions alors en cours à la DPIH dans ce domaine. En septembre 2012, un nouveau guide de cotation entre en vigueur pour la réalisation des EDD. La démarche de conception de ce guide a pris en compte les attentes exprimées des DREAL :

- Attente de voir les EI relatifs à l'erreur humaine cotés en A, en rapport à « l'état de l'art »[127],
- Attente d'un distinguo plus argumenté entre les notions affichées de *défaillance* et *d'erreur* humaine mais aussi parfois, au contraire, étonnement de l'existence d'un tel distinguo[128],
- Attente d'une argumentation claire et précise sur les mécanismes mettant en jeu « la cause humaine », demande d'expliciter la nature de l'erreur et celle de ses conséquences. (Larouzée, 2012b).

Et le constat des effets produits indésirables d'une approche trop réductrice. Toutefois, elle a également dû intégrer les diverses *contraintes* techniques et pratiques de l'EDD (voir 1.2.2). La préoccupation a donc été d'inciter les acteurs du groupe de travail à intégrer dans leur appréciation des EI-FH, le *contexte* de l'activité, l'*efficacité* du management de la sûreté à EDF et le *professionnalisme* des exploitants. L'évolution du guide de cotation a apporté deux évolutions principales. (1) La substitution du terme générique « erreur humaine » au profit d'EI clairement identifiés et situant l'action attendue et les conséquences de sa mauvaise ou non-exécution. Il s'agit donc, dans cet esprit, de privilégier la désignation de l'action attendue et la défaillance associée[129]. L'erreur humaine pouvant, dès lors, être située dans un contexte, un système de management, un objectif précis. (2) L'évaluation de l'occurrence des EI-FH selon quatre dimensions (Figure 21) :

- la possibilité d'autocorrection (ergonomie et réversibilité des actions humaines),
- la complexité de la tâche à accomplir (relative au système à actionner),
- le savoir et savoir-faire de l'opérateur (compétences),
- la situation de travail (en tant qu'influence de l'environnement sur l'opérateur).

Enfin, ce guide de cotation a permis d'élargir les cotations des EI-FH à la classe d'occurrence C. Cette dernière évolution est fondamentale puisqu'elle brise un cadre méthodologique qui condamnait à une évaluation « défavorable » des EI-FH.

[126] Conventions Industrielles de Formation par la Recherche.
[127] L'*état de l'art* renvoie ici aux pratiques répandues et éprouvées dans d'autres ICPE, souvent probabilistes.
[128] Ce qui renvoie bien à la notion de co-construction de norme, exacerbée dans une phase ou une évolution réglementaire est éprouvée par les acteurs de la relation de contrôle.
[129] Par exemple : « *écart / non application de l'instruction d'essais* », « *oubli de la vanne d'échappement en position ouverte/fermé*e » ou « *écart majeur de l'application de la consigne de conduite en crue* ».

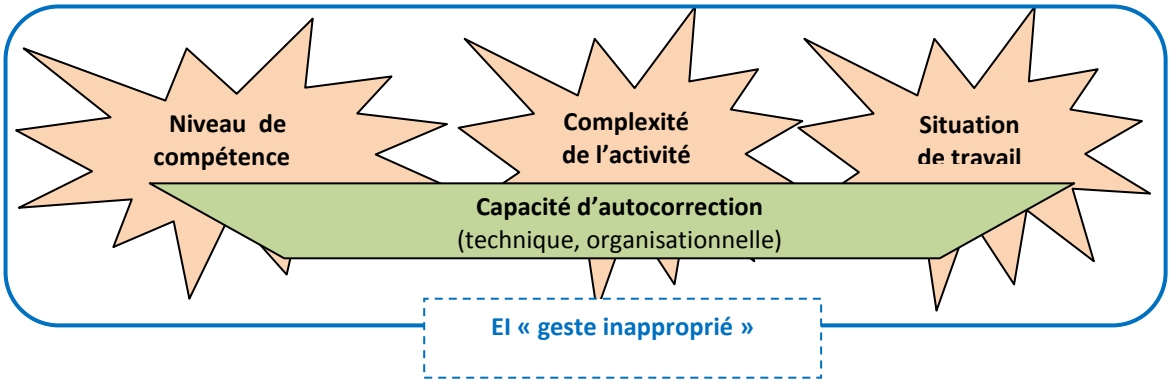

Figure 21 : articulation des quatre dimensions étudiées pour la cotation des EI-FH (méthode 2012).

En parallèle à son déploiement, la collaboration CIFRE entre EDF-CIH et le CRC des Mines Paristech a permis d'entreprendre la conception d'un nouveau guide de cotation, destiné à être utilisé dans le cadre des actualisations décennales des EDD.

Objectifs, cadrage et méthodologie de recherche

Le projet de thèse, tel que validé par l'ANRT[130] (novembre 2012) faisait état d'une volonté assez large de travailler autour d'une notion de *convergence*[131] : « *les difficultés actuelles sont inhérentes aux différences de culture existant entre les sciences de l'ingénieur et les sciences humaines […]. Il sera intéressant d'opérer un rapprochement de ces visions, dans une étude de dangers pluridisciplinaire et soumise à un contrôle externe permettant de valider l'efficience de cette approche novatrice.* ». Il définissait le cadre d'une approche opérationnelle dans un contexte spécifique : « *les EDD sont réalisées dans un contexte particulier. Le plan des études constitue une prescription réglementaire (les marges de manœuvre en matière de méthodologie sont donc limitées). Les délais impartis pour réaliser les études d'ouvrages sont fixés par le Préfet (les marges de manœuvre temporelles sont donc quasi nulles). Le fonctionnement en groupes de travail impose certaines contraintes de lieu (lors des réunions). Il s'agit de déterminer une méthode qui permette, dans ce contexte particulièrement contraint, la meilleure efficience dans la compréhension, l'analyse et la retranscription, des facteurs humain et organisationnel* ».

Cette thèse propose une approche combinée des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines dans le cadre d'une recherche-action. Elle s'est fixé plusieurs objectifs :

- Décrypter, en lien avec les unités de production, les facteurs humains et organisationnels en jeu dans l'exploitation des installations hydroélectriques en analysant les activités liées à ces processus (notamment le rapport à la règle, la formation et les pratiques du personnel).
- Développer puis tester une méthode d'analyse des facteurs d'erreur ou de défaillance humaine et organisationnelle appliquée aux EDD.
- Déployer cette méthode d'analyse dans des EDD « pilotes ».
- Identifier, à l'aide des résultats des EDD « pilotes » et de l'analyse conduite dans l'entreprise, les leviers d'action permettant de renforcer la culture sûreté d'EDF DPIH. Et

[130] Association Nationale de la Recherche et de la Technologie, organisme notamment chargé d'attribuer les financements des thèses CIFRE, réalisées en entreprise.
[131] Le terme de convergence a ultérieurement été précisé dans celui de collaboration (voir 4.3.3).

enfin, mettre au point et conduire des formations, communications (internes / externes), autour des facteurs humains et organisationnels en relation avec la culture sûreté d'EDF DPIH.

La thèse a été réalisée avec une commandite du projet-EDD, au Centre d'Ingénierie Hydraulique (CIH) d'EDF, avec un rattachement à sa mission maîtrise des risques (MMR). Elle a notamment permis, comme nous le développons par la suite, les bénéfices suivant :

- L'amélioration de la qualité intrinsèque des EDD (suivant le principe de progressivité de la profondeur d'analyse des EDD) et une meilleure cohérence entre les différentes EDD.
- La réponse à une demande des services de contrôle de l'Etat (et la réduction corrélative attendue des observations desdits services).
- Une consolidation (attendue) du REX d'EDF DPIH en matière d'évènements impliquant les facteurs humains et organisationnels.
- Sur le plan académique nous valorisons la formalisation d'un outil FOH d'étude de dangers à travers un processus d'ingénierie qu'une étude réflexive permet de qualifier *collaboratif* entre d'une part les sciences de l'ingénieur et les sciences humaines et sociales et d'autre part, entre l'industrie et la recherche (thèse CIFRE).
- L'étude des conditions d'appropriation et d'utilisation de ce nouveau modèle (à travers l'outil ECHO) dans les études de dangers, en lien avec la question de l'accompagnement au changement, s'inscrit dans des perspectives actuelles des safety sciences.

La recherche s'est organisée en cinq phases :

- Phase 1 : Revue de la bibliographie générale et spécifique (à l'*erreur humaine* et aux EDD) ;
- Phase 2 : Conception d'un modèle FOH d''exploitation d'un barrage, adapté aux contraintes des EDD ;
- Phase 3 : Ingénierie d'un outil dérivé du modèle (ECHO), vérification et validation de la méthode (notons que, dans la pratique, les phases 2 et 3 ont été concomitantes et se sont enrichies mutuellement) ;
- Phase 4 : Déploiement de la méthode dans les groupes de travail, formations et communications ;
- Phase 5 : Observation des effets produits par la méthode et analyse des résultats. Recommandations sur la base de ce REX.

Elle a été guidée, sur le plan académique, par la question du rôle des modèles dans l'innovation organisationnelle en sécurité. Autrement dit, comment la mise en œuvre d'un outil impacte l'organisation mais aussi les représentations et donc la *culture* d'une entreprise, dans le champ de la sécurité et plus précisément des FOH. Cette réflexion « cadre » littéralement la recherche car elle prend racine dans l'étude bibliographique avec le cas du SCM*,* un modèle paradigmatique (qui a donc généré une évolution significative des pratiques) et elle se nourrit des premiers résultats de mise en œuvre d'ECHO.

Phase 1 : Revue générale bibliographique ; étude des contraintes EDD pour les FOH

La revue bibliographique s'est portée sur des publications académiques et/ou industrielles relatives aux facteurs humains et organisationnels et leur prise en compte dans les études de risques. La notion d'*erreur humaine* a fait l'objet d'un approfondissement à travers des publications de *psychologie cognitive* (pour sa formalisation théorique et sa compréhension pratique) et de *sociologie des organisations* (pour sa gestion). Le recours fréquent à des modèles pour expliquer ou anticiper les *erreurs humaines* a conduit à un approfondissement ontologique, épistémologique et sémantique de l'*objet modèle.*

L'ensemble de ces considérations s'est trouvé illustré par l'étude d'un modèle paradigmatique de la sécurité industrielle : le *Swiss cheese model* (SCM) de Reason (Reason, 2000b).

Cette revue bibliographie théorique et scientifique a été complétée, pour la formalisation du contexte de recherche, par une analyse du corpus documentaire technique, organisationnel et juridique cadrant la réalisation des EDD des ouvrages de la DPIH.

Enfin, les considérations générales de la thèse ont été confrontées auprès d'autres milieux industriels (ou non) où les acteurs, de par des activités singulières, sont confrontés en permanence au *rapport au risque* (aviation, armée, secteur nucléaire d'EDF, etc.).

Elle a permis de situer la recherche dans les grands courants de pensée existant sur les FOH et au sein de l'organisation de la DPIH et plus précisément, du projet-EDD. Enfin, cette phase initiale a permis de préparer la mise en place de la recherche *terrain* (prise de contact avec les différents acteurs, entretiens et observations exploratoires, etc.)

Phase 2 : Ingénierie d'un modèle d'analyse des FOH dédié aux EDD et construction d'un dispositif d'observation de son fonctionnement

L'objectif de cette phase était de concevoir un modèle permettant de concilier les visions et attentes des différents acteurs de l'EDD en s'adaptant à ses contraintes spécifiques (voir 1.2). Pour cela, dans un premier temps un ensemble de réunions de travail en entreprise ont formalisé, les contraintes de l'EDD (temporelles, spatiales, financières, méthodologiques), celles liées au fonctionnement en groupe de travail (sociogramme et organigramme du groupe), celles issues des attentes de l'administration (DREAL).

Une fois un cahier des charges établi et partagé, des critères de *benchmarking* ont été arrêtés. Suivant ces critères, différentes *méthodes FOH* ont été étudiées (CREAM, TRIPOD et des méthodes internes à EDF). Un *modèle* des FOH liés à l'exploitation d'un barrage de la DPIH a été proposé et validé (empiriquement).

Phase 3 : Du modèle vers l'outil, déploiement de la méthode au sein de groupes de travail d'EDD en cours afin de consolider et de valider la démarche. Analyse des résultats (efficience de la méthode, forces et faiblesses)

Une fois le modèle établi, il a fait l'objet d'une déclinaison opérationnelle à travers un outil permettant l'évaluation et la cotation des dimensions humaines et organisationnelles (ECHO). La

conception de l'outil a été itérative et ponctuée de dispositifs de test et de consultation avec les utilisateurs (membres des GT EDD).

Une première validation empirique a été obtenue après la réalisation d'une EDD *factice* destinée à éprouver ECHO (constitution d'un GT, visite d'un barrage et utilisation de l'outil). Les différents retours (observations, questionnaires) ont permis d'ajuster et de finaliser les travaux de conception.

L'une des ambitions de cette phase était, au stade du projet de thèse, de « *mesurer, autant que possible, le « niveau de satisfaction » des instances de contrôle (DREAL) en comparant les remarques à ce sujet avant et après l'application de la méthode* ». Elle ne sera pas atteinte en pratique compte tenu de l'écart imposé par la différence de calendrier entre l'industriel et l'administration : la validation totale par l'industriel (voir ci-après) est incompatible avec la date de retour des premières observations de la DREAL. Le temps de traitement d'une EDD par l'administration peut être long. Toutefois, les retours sur ECHO pourront être pris en compte par le projet EDD afin d'améliorer, le cas échéant, l'outil ou sa méthode d'application.

Phase 4 : Intégration de la méthode au référentiel méthodologique national de rédaction des EDD associée à des communications et des formations

Après les phases de conception (2 et 3) et d'expérimentation (3) sur cas théoriques et une EDD *test*, l'intégration de la méthode au référentiel méthodologique national des EDD de la DPIH a été abordée à travers la validation des livrables (dont un guide méthodologique de cotation) selon le processus qualité du CIH. De courtes formations des utilisateurs, l'élaboration d'un plan communication et d'information ont complété la mise en œuvre.

Phase 5 : Prise en compte des résultats de l'application de la méthode ECHO aux EDD

Bien que la temporalité des EDD soit relativement longue (comparée à des audits FOH suivis de plans d'action incluant des mesures à court ou moyen terme) et que nous n'ayons pas, à ce jour, de retour des DREAL, une première analyse des résultats des travaux opérationnels de thèse a été possible.

Les analyses ont porté d'une part sur le caractère pratique de l'outil, à travers des observations de son utilisation en conditions nominales et des entretiens avec les utilisateurs. La démarche répond aux attentes et aux besoins. Elle a notamment été saluée pour son pragmatisme. Si ces retours sont satisfaisants, ils constituent principalement le résultat du procédé d'ingénierie et peu de la démarche de recherche. Nous avons donc également cherché à identifier, en accord avec notre problématique théorique, le rôle du modèle dans l'innovation organisationnelle en sécurité. Nous reviendrons sur ces éléments dans le chapitre 4.

Enfin, une fois la démarche opérationnalisée, il a été possible de préciser ses apports potentiels aux autres processus ou réseaux établis à la DPIH.

Synthèse : le cadre de notre démarche de recherche-intervention

Dans ce chapitre, nous avons défini ce qu'est un barrage et présenté ces objets industriels dans leurs variétés et leurs constantes. Les *types* d'ouvrages sont autant de réponses *techniques* à un besoin universel de l'Homme : exploiter l'eau. Dans le monde, les barrages les plus représentés sont des ouvrages poids-remblais en terre, destinés à l'irrigation. L'un des usages des barrages nous intéresse

plus particulièrement, c'est la production d'hydroélectricité. Au barrage est associé un ensemble d'ouvrages annexes et d'outils productifs : on parle d'aménagement. Les aménagements présentent un certain nombre de *risques* : le principal est la rupture totale d'un ouvrage induisant une *onde de submersion*. Une revue des grandes catastrophes nous a permis d'expliciter un certain nombre de *mécanismes de rupture.* Si les accidents sont en partie causés par des éléments techniques, le retour d'expériences met également en avant le rôle prédominant des FOH.

Comme tous les sites industriels à risques, les barrages font l'objet d'autorisations et de contrôle des Etats. En Europe et en France, les réglementations et les administrations se sont lentement développées depuis le XIX^{ème} siècle sur l'ensemble des ICPE, dont les barrages qui bénéficiaient toutefois de particularités notamment liées à l'histoire et à l'hétérogénéité plus marquée des installations, comparées à d'autres secteurs industriels. Afin de renforcer les dispositifs de sécurité des barrages, une évolution en 2007 est la mise en place des EDD. Ces études basées autour des nœuds papillon ont des forces, comme l'approche pluridisciplinaire des risques, mais aussi des limites. Point d'intérêt pour notre démarche : les EDD ont porté l'injonction d'étudier les FOH dans la sécurité des barrages. FOH qui, nous l'avons vu, faisaient déjà l'objet de démarches (EISH, analyses N1, SOH) mais ne bénéficiaient pas du même niveau de considération que dans d'autres secteurs industriels (nucléaire, aviation).

Pour prendre en compte les FOH, le projet-EDD n'a pas été en mesure de s'appuyer sur un état de l'art dédié aux barrages (relativement pauvre) ni, de manière opérationnelle, sur les autres démarches de la DPIH. L'existence d'un réseau d'analystes qualifiés (SOH), étant globalement réservée à la conduite d'analyses compréhensives suivant une méthodologie détaillée et longue, s'avère donc inadaptée aux besoins (et aux moyens) de l'EDD. En conséquence et en vertu d'un principe d'amélioration continue les aspects FOH ont dans un premier temps été abordés de manière conservative, fortement réductrice et sans méthodologie détaillée. Un certain nombre d'effets produits négatifs ont toutefois conduit, en 2012, à faire évoluer la méthodologie puis à enclencher un travail de thèse visant à concevoir une méthode qui permette, dans un contexte contraint, une meilleure efficience dans la compréhension, l'analyse et la retranscription, des FOH.

Dans la partie suivante nous abordons des considérations relatives aux FOH. Après avoir présenté un historique partiel des approches scientifiques, théoriques et pratiques qui ont amené la création et le développement de ces concepts, nous étudierons en détail l'une des théories phares : celle de l'accident organisationnel selon James Reason. Elle constitue effectivement un paradigme fort des safety sciences et a servi de cadre conceptuel à nos travaux de développement d'un modèle et d'un outil permettant la prise en compte des FOH dans les EDD d'EDF. Ces développements sont l'objet de la troisième section du chapitre suivant.

CHAPITRE 2 – LES MODELES EN GESTION DE LA SECURITE

DE L'ERREUR HUMAINE AUX MODELES D'ACCIDENTS, LE CAS DU SWISS CHEESE MODEL

Nous avons présenté les EDD de barrages. Ces études réglementaires qui occupent une place privilégiée au sein de la relation contrôleur-contrôlé dans la sécurité des ouvrages hydrauliques imposent notamment de prendre en compte les FOH. Dans le cas de la DPIH, nous avons développé deux approches successives répondant à cette injonction. Ces deux approches comportent des limites. Ces limites peuvent se comprendre par le caractère innovant de l'intégration des FOH au sein d'études pluridisciplinaires des risques mais aussi, comme le montre le faible état de l'art, par le fait de la question des FOH n'a pas été adaptée au secteur. Face au besoin généré par l'EDD et confirmé par les nombreuses remarques des DREAL au sujet des FOH, la décision a été prise de concevoir, à travers une thèse, un modèle des FOH dans l'exploitation d'un barrage et un outil associé, permettant l'estimation des occurrences d'initiateurs humains ou organisationnels dans les scénarios de défaillance des EDD.

Dans ce chapitre, nous présentons et discutions la question des modèles de gestion de la sécurité. Ces modèles sont principalement représentés par des modèles d'erreur humaine et des modèles d'accidents (2.1). Après avoir proposé un cadre pour l'étude des modèles, nous nous intéressons au cas emblématique des modèles d'accidents organisationnels à travers une relecture des travaux de James Reason (2.2). Enfin, nous présentons le débat académique autour de la valeur, de la nature et du rôle du *Swiss cheese model* et tentons d'y apporter des perspectives nouvelles (2.3).

2.1. Courants et modèles des facteurs organisationnels et humains

A travers les évolutions de paradigmes, les FOH se sont constitués comme un champ pluridisciplinaire très vaste qui recourt notamment aux *modèles* comme outils de médiation et de collaboration.

Comme le note Le Coze : « *l'histoire des différentes contributions disciplinaires à la sécurité industrielle est très souvent abordée de deux manières, soit en favorisant un point de vue 'mono' disciplinaire, soit en présentant beaucoup plus succinctement une tendance à la succession de regards technique, humain et organisationnel dans ce domaine* » (Le Coze, 2011). Dans le cadre de ce travail, nous nous attachons à expliciter le choix d'une théorie donnée, celle de l'*accident organisationnel*, comme cadre conceptuel pour nos travaux de conception et de développement du modèle FOH-EDD et de l'outil ECHO. Ainsi, nous présentons « une histoire » des FOH par « tendances successives » avec pour objectif de situer brièvement l'état de la question (2.1.1) avant de nous intéresser plus spécifiquement aux *modèles.* Ces objets sont largement utilisés dans l'explication et la prévention des accidents alors même qu'il ne semble pas en exister de définition absolument partagée (2.1.2). Afin d'enrichir nos perspectives sur le rôle des modèles dans les organisations et leur gestion de la sécurité, nous proposons un cadre pour la relecture des travaux de James Reason, auteur du très répandu SCM (2.1.3).

2.1.1. Considérations historiques sur les facteurs organisationnels et humains

S'il n'y a pas de définition univoque du concept de « *facteur humain* », utilisés de manière vernaculaire[132], ces mots se rapportent d'une part à la compréhension des capacités ou des limites prévisibles de l'Homme et d'autre part, à l'application de ces connaissances pour améliorer la sûreté des systèmes sociotechniques (ICAO, 1998). La définition d'Edwards, appliquée à l'industrie, met en avant la multidisciplinarité (sinon l'interdisciplinarité)[133] du sujet qui se situe à la croisée des sciences humaines et des sciences de l'ingénieur : « *Human Factor is concerned to optimize the relationship between people and their activites, by the systematic application of human sciences, integrated within the framework of systems engineering »* (Edwards, 1988). Si il existe aujourd'hui un vaste corpus de connaissances à disposition des personnes en charge des problématiques de sûreté (quels que soient leurs activités ou leurs domaines), celui-ci s'est progressivement construit et affiné au fil du temps et au gré de la quasi inversion du postulat asservissant l'Homme à la machine, comme l'illustrent les deux extraits[134] suivant :

> « *Our interest in the design of machines for human use runs the full gamut of machine complexity – from the design of single instruments to the design of complete systems of machines which must be operated with some degree of coordination.* » (Chapanis, *et al.,* 1949).

[132] Terme linguistique relatif à un langage parlé exclusivement au sein d'un groupe ou d'une communauté.
[133] Où l'approche multidisciplinaire consiste à la juxtaposition d'éclairages disciplinaires différents sur un même objet et se distingue de l'interdisciplinarité qui cherche à faire se confronter ces éclairages.
[134] Le premier est issu d'un ouvrage intitulé *Human factors in engineering design* publié en 1949, le second de l'*U.S. National Academy of Engineering* publiant un document titré « *les ingénieurs de 2020 »*.

> « *Engineers and engineering will seek to optimize the benefits derived from a unified appreciation of the physical, psychological, and emotional interactions between information technology and humans.* » (U.S. National Academy of Engineering, 2004; cité par Proctor & Van Zandt, 2008).

Accidents, erreurs, des questions philosophiques aux problématiques d'ingénieurs

L'accident ou l'erreur sont des questions aussi vieilles que la Philosophie, longtemps réservées aux *humanités*. Au IV^{ème} siècle avant J.-C., Aristote caractérise l'accident comme « *un attribut qui n'est pas essentiel à la chose à laquelle il appartient »,* ce qui appartient ou arrive à un *être* sans avoir de lien ni avec l'*essence* ni avec la *substance* même de cet être. Autrement dit, sans cet *accident*, ou s'il était *autre,* l'être serait tout autant « lui-même ». Aristote dans sa *Métaphysique* (Livre sixième) en arrive à la conclusion qu'il n'y a pas de science de l'accident puis qu'il n'a qu'une existence *nominale* :

> « [N]*ous devons remarquer avant tout qu'il n'y a aucune spéculation qui ait pour objet l'être accidentel; et la preuve, c'est qu'aucune science, ni pratique, ni créatrice, ni théorétique, ne tient compte de l'accident. Celui qui fait une maison ne fait pas les accidents divers dont cette construction est le sujet, car le nombre de ces accidents est infini. Rien n'empêche que la maison construite paraisse agréable aux uns, désagréable aux autres, utile à ceux-ci, et revête, pour ainsi dire, toute sorte d'êtres divers, dont aucun n'est le produit de l'art de bâtir. De même aussi le géomètre ne s'occupe ni des accidents de ce genre dont les figures sont le sujet, ni de la différence qu'il peut y avoir entre le triangle réalisé et le triangle qui a la somme de ses trois angles égale à deux angles droits. Et c'est avec raison qu'on en use ainsi : l'accident n'a, en quelque sorte, qu'une existence nominale.* » (Aristote, Pierron & Zevort, 1840).

Au sens courant on peut qualifier l'*accident* d'*évènement imprévu*, ce qui déjoue l'attendu, l'habitude. La quête de compréhension des accidents afin de les éviter dans les systèmes sociotechniques est bien plus récente. Elle a accompagné les révolutions industrielles de la fin du XVIII^{ème} siècle (Desmorat, 2012). Avec le développement important de la technicité et des échelles des systèmes, l'accident individuel de l'artisan a également évolué dans sa *nature* et dans sa *forme* (ampleur des conséquences, échelle, etc.). En 1931, Heinrich propose sa *théorie des dominos* que l'on considère comme le premier *modèle d'accidents*. Il décompose la séquence accidentelle en cinq éléments (l'environnement social, la faute du travailleur, le geste dangereux associé à un risque mécanique ou physique, l'accident et les dommages matériels ou corporels). On remarque que l'individu et ses actions sont intégrés dans une chaîne causale (linéaire) déterministe. Ce postulat sera détaillé avant d'être réfuté par d'autres théories durant la seconde moitié du XX^{ème} siècle avec le développement des safety sciences.

L'*erreur* est, comme *l'accident,* un très ancien sujet d'étude pour les *humanités* comme l'atteste l'antique formule « *errare humanum est, perseverare diabolicum »*[135]*,* attribuée à Sénèque. Pour Descartes toute *erreur* est par définition le fait du *jugement* (selon lui, il n'y a pas d'erreur *des sens*), elle n'est imputable qu'à la volonté qui juge. La dimension *morale* de l'erreur est une fois encore très marquée. Pour certains philosophes l'*erreur* est liée à la *connaissance,* on retrouve donc de nombreuses considération sur l'*erreur* dans les travaux sur le *rationalisme intellectualiste* (Descartes, Leibniz) et l'*empirisme* (Hume, Locke) notamment au travers de la discorde sur la question de la *preuve expérimentale*. C'est à la fin du XIX^{ème} siècle que l'on voit apparaître des travaux qui s'intéressent directement aux mécanismes *mentaux* et *comportementaux* de l'erreur dans le champ de la *psychologie.* En 1881, James Sully publie un ouvrage intitulé *Illusions* (cité par Reason, 1990b)

[135] L'erreur est humaine, persévérer [dans son erreur] est diabolique.

dans la préface duquel il indique entreprendre « *une analyse étendue du domaine de l'erreur* ». Sully peut être considéré comme le premier psychologue à tenter une classification des *erreurs humaines* et à en chercher des principes explicatifs communs. En 1904 dans le livre *Psychopathologie de la vie quotidienne* (cité par Reason, 1990b), Freud propose une classification de nombreuses *erreurs quotidiennes* (lors de la lecture, de l'écriture, de l'expression orale ou de maladresses) qu'il explique par des pulsions inconscientes. En 1932, Bartlett utilise la notion de *schéma* pour expliquer des *erreurs* liées à la référence à des éléments mémorisés (formes, textes), il définit un schéma comme « *une organisation active de réactions passées ou d'expériences passées, que l'on doit toujours supposer à l'œuvre dans toute réponse organique bien adaptée* [...] *à chaque fois que le comportement se révèle ordonné et régulier* [...]. *»* (p. 201). La théorie des schémas sera reprise et étendue par Minsky (1975) et Rumelhart (1977) qui les considèrent comme des *répertoires mentaux* qui mettent en correspondance, pour un domaine d'activité donné, des problèmes et des solutions. Selon cette théorie, les *erreurs* surviennent lorsqu'un schéma inapproprié est utilisé (c'est par exemple le cas lors d'une mauvaise identification d'un problème ou en raison de biais cognitifs, comme les biais de *similarité* ou de *fréquence*[136]). Cette notion reste présente dans de nombreux travaux à l'origine de modélisations de la *cognition humaine* qui visent à *expliquer* et/ou *prédire* pour ultimement *prévenir* les *erreurs* ou leurs *conséquences.*

A travers la notion d'*erreur (humaine)*, nous avons illustré l'un des glissements entre philosophie, psychologie, psychologie cognitive et application à la sécurité des systèmes sociotechniques. Autour d'autres notions (sûreté de fonctionnement, respect ou non des procédures, accidents, etc.) et convoquant d'autres disciplines, de nombreux autres *glissements* peuvent être constatés depuis les premières révolutions industrielles. Les évolutions sont souvent marquées pendant les périodes de guerres. Celles-ci contribuent à des avancées technologiques majeures (on pourrait citer les domaines de la médecine, des communications, du transport, etc.), ruptures *techniques* et *pratiques* dans les sciences, l'industriel et les sociétés. Comme d'autres (e.g. Guarnieri *et al.,* 2008) nous retiendrons comme point de départ à un « historique » des FOH la Seconde Guerre mondiale durant et après laquelle l'intérêt des ingénieurs pour la prise en compte de l'humain augmente de manière significative avant de s'étendre à d'autres disciplines (ergonomie, psychologie, sociologie, etc.) et de se diversifier (approche organisationnelle ; voir Figure 22).

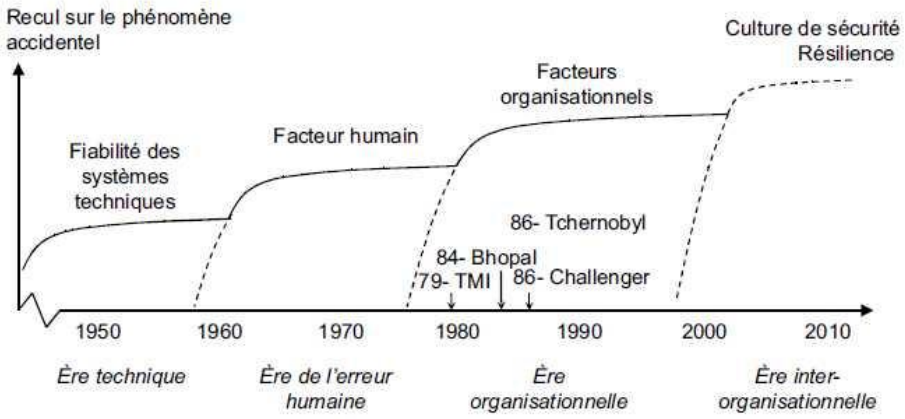

Figure 22 : Principales ères dans la gestion de sécurité industrielle (adapté de Groeneweg, 2002).

[136] Le premier implique que nous sélectionnons les schémas à l'aide d'attributs d'une tâche par ressemblance à d'autres tâches mémorisées ; le second que nous sélectionnons plus facilement les schémas les plus fréquemment utilisés – en réalité, ce sont ceux qui « apparaissent » en premier dans notre esprit.

De très bonnes synthèses historiques ou thématiques du domaine de gestion de la sécurité existent par ailleurs (e.g. Reason, 1990b présente un historique détaillé des travaux sur l'erreur ; Groeneweg, 2002 ; Hollnagel, 2004 ; Bieder, 2006 ; Guarnieri *et al.,* 2008 proposent des mises en perspective historique). Il existe également d'autres approches originales à la croisée de ces visions, qui rendent compte des développements concomitants, enchevêtrés, qui résultent de percolations entre les disciplines scientifiques et les thèmes de recherche (installation, cognition, organisation ou régulation ; voir par exemple Le Coze, 2011, p. 41 - 82). Nous effectuons ici le choix d'une présentation succincte, linéaire et historique des principaux courants de pensée pour concentrer, par la suite, nos réflexions sur les *modèles d'accidents.* Certains modèles sont évoqués dans ces lignes, lorsque cela nous apparaît pertinent en rapport avec l'objectif de cette réflexion, nous proposons un approfondissement bibliographique et théorique (2.2). Enfin, les dates de publication des modèles dépassent parfois le découpage historique (arbitraire et rétroactif). En effet, les « ères » se chevauchent et se complètent, et (dans une certaine mesure) des modèles sont *novateurs* ou *rétrogrades*.

L'ère technique

La prise en compte du *facteur humain* dans les systèmes opérationnels se développe réellement au cours de la Seconde Guerre mondiale, suite aux travaux de nombreux spécialistes pour l'amélioration de *systèmes (militaires) opérés par l'Homme* opérant sur terre, mer ou dans les airs[137]. Les études portent alors sur la performance de ces systèmes, des problématiques de *présentation* de l'information, les *actions* des opérateurs, l'optimisation des *postes de travail* ou encore, les compétences requises pour réaliser les différentes tâches. La recherche dans ces domaines est stimulée par la difficulté en temps de guerre de réaliser des modifications importantes sur les équipements. L'attention est donc centrée sur l'analyse des opérations, la sélection de l'opérateur, sa formation et l'environnement associé à la *détection* des signaux. Parallèlement, dans l'industrie, l'effort de guerre contraint à orienter les efforts sur l'efficacité, l'analyse des tâches, notamment par des études de temps et des mouvements.

Après la Guerre, les recherches ont pu être élargies à la conception de systèmes. En conséquence, des exigences *facteurs humains* ont été intégrées aux Etats-Unis dans les relations entre gouvernement et industrie de défense. Cela a conduit au recours à des *spécialistes des facteurs humains* par l'industrie qui s'est progressivement généralisé aux systèmes et aux équipements civils. Des secteurs variés se sont emparés de la question du *facteur humain* : le transport, l'architecture, la conception des produits de consommation, l'informatique, les systèmes énergétiques, médicaux, bureautiques, etc. Dans le même temps des programmes d'études supérieures ont été organisés dans les universités américaines et des milliers de postes créés dans l'industrie, les entreprises, les services, le gouvernement et l'éducation. Des sociétés savantes spécialisées (comme l'HFES[138]) ont vu

[137] Une recherche bibliographique approfondie met en évidence quelques travaux antérieurs, comme ceux de Greenwood & Woods en 1919, consacrés aux accidents industriels et mettant en évidence un phénomène qualifié d'« *accident proneness* » (déterminants individuels rendant certaines personnes plus susceptibles que d'autres de causer / d'être victimes d'un accident à iso-exposition aux risques). Ces travaux précurseurs sont rares (voir aussi Froggatt & Smiley, 1964) et leurs enseignements ont été majoritairement réfutés lors de « l'expansion FOH » de la seconde moitié du XX^{ème} siècle.

[138] L'HFES (*Human Factors and Ergonomics Society*) est une organisation à but non lucratif interdisciplinaire de professionnels qui sont impliqués dans le domaine des facteurs humains. La Société favorise la découverte et l'échange de connaissances sur les caractéristiques des êtres humains qui sont applicables à la conception des

le jour et commandité des conférences, des ateliers et des publications afin de promouvoir le partage de connaissances.

L'individu est, à cette époque, perçu comme un *composant variable des systèmes* dont le comportement sur le long terme (imprévisible et non uniforme) est à l'origine des accidents. Dans sa théorie de l'accident (*théorie des dominos*), Heinrich (1939) considère l'individu comme le point faible d'un système[139]. L'accident est décrit comme « *the natural culmination of a series of events or circumstances* » (*op. cit.*) dont les éléments (environnement social, faute professionnelle, acte ou situation risqué, dommages) s'activent en cascade (à la manière de dominos). Une meilleure compréhension du fonctionnement individuel doit, selon ce postulat, permettre son *optimisation* (autrement dit, la *suppression* des erreurs). L'étude et la recherche de maîtrise des variabilités humaines est également faite à des fins de production : éviter les défauts, les mal fonctions et les accidents qui causent des pertes financières pouvant être considérables. En écho aux théories de l'*organisation scientifique du travail*, les premiers ingénieurs qui s'emparent de la question du *facteur humain* contribuent à formaliser un cadre technique et organisationnel *idéal* où l'opérateur aurait accès à tous les éléments nécessaires à son activité. Les mesures mises en œuvre comprennent la rédaction de nombreuses procédures, de détrompeurs ou la mise en place de *fonctions contraintes*. La responsabilité des accidents est naturellement attribuée à l'opérateur[140] (Desmorat, 2012).

Dans cette optique, un certain nombre de *méthodes* sont développées pour estimer, en fonction des tâches à effectuer, les probabilités de réussite ou d'échec. Elles vont accompagner le passage de l'ère *technique* à celle de *l'erreur humaine*.

L'ère de l'erreur humaine

Durant les années 1960 et 1970, l'intérêt pour l'étude des *erreurs humaines* est notamment porté par le développement de l'industrie nucléaire et la modernisation des transports aériens. A cette période se développent les méthodes dites HRA (*Human Reliability Analysis*, directement inspirées des PRA, *Probabilistic Reliability Assessment* utilisées sur les composants *techniques*). En 1963, Swain pose les bases de ce qui deviendra la méthode THERP (considérée comme la première méthode HRA). Cette méthode fournit des tables de probabilités *nominales* d'erreurs déterminées par simulation ou observation (dans le secteur nucléaire). Il s'agit, pour l'utiliser, de construire un arbre (logique) décomposant l'activité étudiée en *tâches élémentaire*s, de leur associer des probabilités *nominales* d'échecs pour enfin *calculer* la *probabilité d'erreur* de l'activité (Swain & Guttman, 1983). Parallèlement au développement des méthodes HRA, les psychologues produisent des théories et des modèles du fonctionnement cognitif humain. Après le développement de la *cybernétique* et l'application de ses principes et méthodes au champ de la communication (Watzlavick *et al.,* 1975), la

systèmes et appareils de toutes sortes. L'HFES a vu le jour en 1955, en Californie du Sud, avec un comité mixte réunissant l'*Aeromedical Engineering Association* de Los Angeles et de la *Human Engineering Society* de San Diego. Le comité représentait les domaines de la psychologie, de la physiologie, de l'ingénierie et de la médecine. L'édiction de ses principes et la première réunion annuelle de ses membres a eu lieu le 25 Septembre 1957. Cette date peut-être arbitrairement retenue comme celle de la formalisation du concept du *facteur humain* au sens contemporain du terme : un corps de connaissances issues de différentes sciences techniques et humaines visant à assurer l'adéquation entre l'Homme et sa tâche.

[139] Pour Heinrich 88% des accidents sont causés par des « *unsafe acts of people* », 10% par des « *unsafe actions* » et 2% par les « *acts of God* » (*op. cit.*).

[140] L'individu est réduit à sa propension à l'erreur (écart aux procédures, conduites dangereuses, etc.), ultimement, le recours aux sanctions apparaît comme une mesure de correction/prévention des défaillances.

question du traitement de l'information par un individu trouve une application dans la gestion de la sécurité. D'abord *séquentiels,* les modèles proposent des actions dirigées vers les différents stades de *traitement*[141] ou vers les composantes *structurelles* de l'information[142]. Progressivement, les psychologues voient dans l'étude des *erreurs* une source intéressante de données sur le fonctionnement du cerveau (Reason, 1977).

En 1972, Newell et Simon proposent la première modélisation informatique de résolution humaine de problèmes avec le GPS (*General Problem Solver* ; Newell & Simon, 1972). L'ambition de ce programme d'*intelligence artificielle*, dont la conception débute dès le milieu des années 1950, est de pouvoir résoudre tout problème *symbolique* formalisé (comme des démonstrations de théorèmes, des problèmes géométriques ou encore des parties d'échecs) comme le ferait un humain[143]. L'utilisateur définit un objectif (ex : placer le roi adverse dans une position de *mat*), les différents éléments du problème (les différentes pièces) et les opérations qu'ils peuvent subir (les déplacements autorisés). Le GPS génère ensuite des heuristiques (règles de types « SI... ALORS... ») qui permettent de résoudre itérativement le problème. Bien qu'il soit éloigné, dans ses intentions, des problématiques de sécurité industrielle, ce programme impactera grandement les modélisations de la cognition humaine et de ses mécanismes d'erreur associés. Par exemple, le modèle GOMS (Card *et al.,* 1983) qui s'intéresse aux objectifs (*Goals*), aux heuristiques (*mental Operators*), aux méthodes de résolution de problèmes (*Methods*) et à la sélection des règles mentales (*Selection rules*) et qui renseigne sur les *connaissances nécessaires* à la bonne réalisation d'une tâche donnée. La même année, Rasmussen (1983) marque une avancée fondamentale dans la modélisation du traitement de l'information par l'Homme. A la suite de ses travaux sur l'accident de *Three Mile Island* (1979) il propose un modèle (*modèle SRK*[144]) des activités cognitives en trois niveaux. Un premier niveau (*skill-based level*), peu consommateur en ressources, produit de façon semi-automatique des réponses motrices aux stimuli de l'environnement. Il est utilisé dans les situations *familières* et connues. Un second niveau (*rule-based level*) s'active lorsque la situation n'est plus totalement familière mais possède toujours certains aspects connus. Le cerveau applique alors des règles mentales de type *SI… ALORS…* pour agir et faire évoluer la situation vers un état familier (retour au niveau précédent). Si ces règles se montrent inefficaces, un dernier niveau (*knowledge-based level*) s'active et mobilise des *connaissances générales* pour tenter d'inférer de *nouvelles* règles applicables à la situation (retour au niveau précédent). Très coûteux en ressources mentales, ce troisième niveau ne s'active que pour faire face à des situations totalement nouvelles dans lesquelles aucun automatisme ni aucune règle pré enregistrée ne s'avère efficace. Ce modèle sera largement repris ou adapté pour sa capacité à rendre compte des accidents[145]. Le modèle SRK a été repris et étendu par James Reason (1988) avec le modèle GEMS[146], décrit dans la section suivante consacrée à ses travaux.

[141] Modélisés avec la séquence : sensation, perception, accès aux informations mémorisées, décision et action par Welford (1968).
[142] Modélisées avec les éléments : source, canal, message, bruit et récepteur par Lehto & Miller (1986).
[143] *i.e.* en appliquant des schémas mentaux et des règles (ou heuristiques) de sélection.
[144] Pour *Skills, Rules, Knowledges.*
[145] En 1986, Rasmussen établi un lien entre de nombreux cas d'accidents et l'inadéquation de la *situation* (familiarité) et du *niveau de guidage* (S-, R-, ou K-), démontrant empiriquement l'intérêt de sa théorie.
[146] *General Error Modelling System.*

La compréhension des erreurs qu'offrent ces différents modèles est marquée par un postulat faisant résider la source de l'erreur dans le traitement individuel de l'information (dans le cas des accidents industriels : l'opérateur). Une série d'accidents survenue au cours des années 1980 et les analyses qui les ont suivis ont progressivement contribués à démontrer qu'au-delà de caractéristiques individuelles l'erreur ou la performance humaine doit aussi être étudiée en considérant les conditions dans lesquelles l'activité est réalisée.

Safety culture decade et l'ère organisationnelle

L'expression « *safety culture decade »* est entrée dans la littérature anglophone comme désignant une série de *grands* accidents survenus au cours des années 1980 (crash aérien de Tenerife, 1977 ; accident nucléaire de Three Mile Island, 1979 ; accident chimique de Bhopal, 1984 ; accident nucléaire Tchernobyl et explosion de la navette spatiale Challenger, 1986 ; naufrage du Herald of Free Enterprise et incendie dans le métro de Londres à la King's Cross Station, 1987 ; incendie sur la plateforme pétrolière Piper Alpha, 1988). Les enquêtes et les analyses suivant ces accidents amènent à dépasser l'explication des accidents uniquement basée sur l'*individu*. Les paradigmes des safety sciences évoluent et l'opérateur n'est plus considéré comme initiateur (unique) de l'accident mais comme héritant des conséquences de décisions prises en amont.

James Reason contribue à cette évolution en proposant la notion d'*accident organisationnel* qu'il définit comme accident aux « *causes multiples impliquant plusieurs personnes agissant à des niveaux différents dans une même organisation* » (Reason, 1997). Cela implique, pour comprendre et/ou prévenir l'accident, de considérer également des *conditions environnementales,* des *conjonctions défavorables d'éléments* (appelées *conditions latentes*[147]) et la défaillance de *barrières de protection* du système (qu'elles soient techniques, humaines ou organisationnelles).

Suite à l'analyse de l'accident de Tchernobyl par l'AIEA[148], le concept de *culture de sécurité* est formalisé (AIEA, 1991). Ce concept permet de comprendre les accidents comme la défaillance *généralisée* des références à la sécurité. Transverse, il implique tous les échelons organisationnels (de la direction à l'opérateur). L'explication d'un accident, et/ou de l'*erreur* qui contribue à l'initier, devient collective.

Les modèles de la psychologie cognitive vont alors être complétés par des modèles visant à expliciter les interactions entre des dimensions *techniques*, *humaines* mais aussi *organisationnelles*. L'un des plus connus et des plus utilisés est étudié en détail et discuté dans la section suivante (le SCM, voir 2.2). Les considérations *facteur humain* sont étendues aux facteurs *organisationnels* et donnent naissance à l'appellation FOH.

Bien que largement exploités[149] par les personnes en charge de la gestion de la sécurité (*practitionners*), les modèles *FOH* sont rapidement critiqués sur le plan théorique[150] par un ensemble de chercheurs (*researchers*). Pour Amalberti, par exemple, l'avènement des FOH ne fait que de

[147] Voir section 2.2.
[148] Agence Internationale de l'Energie Atomique.
[149] Et selon nous *utiles.*
[150] Un grand nombre de ces critiques sont directement adressées ou illustrées sur le SCM. Nous les discutons dans la partie 2.3.2.

déplacer le prisme d'analyse de la sécurité et l'attribution du blâme de l'opérateur de première ligne vers les concepteurs ou managers du système (Amalberti, 2001).

La compréhension des accidents a considérablement progressé avec les apports de la *psychologie* mais montre (naturellement) ses limites. Elle va être complétée par des approches *sociologiques*. Avec ces nouveaux éclairages se dessinent deux *écoles* de pensée de la sécurité et des accidents dans les systèmes sociotechniques : la *Théorie des accidents normaux* (NAT[151]) et celle des *Organisations Hautement Fiables* (HRO[152]).

Accident « normal » ou organisations « hautement fiables »

La NAT est popularisée par l'ouvrage éponyme de Charles Perrow. Celui-ci propose, à la suite de Turner (1978) un regard organisationnel sociologique sur les risques majeurs. Perrow se base sur l'étude d'un grand nombre d'accidents dans des domaines aussi variés que le nucléaire, le transport, l'armement, les barrages, les mines. Il propose une caractérisation des systèmes qui repose sur les notions de *couplage* et de *complexité* (Perrow, 1984). Les accidents sont le fait d'incidents ou de défaillances *locales* qui vont (de proche en proche) interrompre ou porter atteinte au système *global.* Un des arguments fondateurs de la NAT est que la présence dans certains systèmes de redondances, de centralisation (ou à l'inverse, de décentralisation) ou encore de boucles de rétroactions augmente le *couplage* et la *complexité* jusqu'à un état où l'Homme ne peut plus anticiper l'ensemble des scénarios de défaillances, percevoir précisément l'état du système à un instant donné ni maîtriser les défaillances *locales* « à temps ». Perrow note enfin que les efforts pour réduire les risques d'accidents dans certains systèmes (comme la mise en place de redondances visant à palier des défaillances *locales*) peuvent augmenter la *complexité* du système et ainsi s'avérer contreproductifs. Pour Perrow, au-delà des hommes et des organisations, c'est donc la *nature des systèmes* qui conduit à des accidents en *situation normale* (par opposition aux *situations de fonctionnement dégradés*).

En réponse au *déterminisme* de la théorie de Perrow[153], Todd, Laporte, Consolini étudient un ensemble d'organisations parvenant à maintenir un très bon niveau de sûreté de fonctionnement sur une longue période de temps dans un environnement (et avec des processus) « à risque ». Observant le fonctionnement de portes-avions, centrales nucléaires, centres de contrôle aérien, ils caractérisent progressivement les facteurs de réussite de ces *organisations* d'*hautement fiables* (Laporte et Consolini, 1991). La théorie HRO postule qu'une organisation peut éviter les accidents, en compensant les limites cognitives des individus, si elle est correctement conçue et dirigée (pilotée, gérée, managée). Les chercheurs identifient plusieurs invariants : la fiabilité et la sûreté sont des priorités pour les dirigeants, des redondances sont mises en place pour pallier les dysfonctionnements matériels ou humains, l'autorité n'est pas diffuse et elle garantit la formation et l'entraînement continu des individus, enfin l'organisation est *auto-apprenante* (elle recourt à des simulations, des exercices et entretient le retour d'expérience). Ces invariants conduisent l'*équipe HRO,* menée par Karl Weick, à proposer cinq *piliers* des HRO : l'attention portée aux défaillances, le refus des interprétations simplistes, l'attention portée aux opérations, à la résilience, et à l'entraînement (Weick *et al.*, 1999).

[151] *Normal Accident Theory*, nous retiendrons l'acronyme anglais NAT.
[152] *High Reliability Organizations*, nous retiendrons également l'acronyme anglais HRO.
[153] Ce déterminisme s'exprime au moins dans la *forme* ; des études récentes sur le *fond* et l'ensemble des ouvrages publiés par le sociologue tendent à montrer que la lecture dominante de Normal Accident est réductrice (Le Coze, 2015).

Ces deux approches, conceptuellement opposées (voir Tableau 12), constituent un cadre théorique bien ancré depuis la fin des années 1990. Elles ont respectivement accompagné de nouveaux regards sur les problématiques de sécurité industrielle et contribué à la naissance de nombreuses notions comme les *signaux faibles,* les *précurseurs,* la *période d'incubation, les lanceurs d'alerte,* etc. Elles semblent toutefois montrer leurs limites tant elles éclairent, sans permettre réellement de trancher, les mêmes situations. Ainsi, Leveson soulève-t-elle la question de savoir si l'inventaire des presque accidents liés à l'armement nucléaire dressé par Sagan (2004) témoigne qu'un accident systémique arrivera ou aurait pu arriver s'il n'en était de la chance, postulat NAT ou au contraire que le système est éprouvé et peut être considéré robuste et bien défendu, postulat HRO ? (Leveson *et al.*, 2009).

Tableau 12 : Principales différences entre les théories HRO et NAT (adapté de Sagan, 1993 ; d'après Hardy, 2010 p. 42).

Théorie HRO	Théorie de l'accident normal
Les accidents peuvent être évités par le biais d'une bonne gestion et d'une bonne conception organisationnelle.	Les accidents sont inévitables dans les systèmes complexes et fortement couplés.
La sécurité est la priorité organisationnelle.	La sécurité est un des nombreux objectifs de l'organisation.
Les redondances améliorent la sécurité.	Les redondances sont souvent à l'origine des accidents.
Des processus de réponse décentralisés sont nécessaires pour permettre des réponses adaptés aux surprises.	Contradiction organisationnelle : une décentralisation est nécessaire pour la complexité mais une centralisation est indispensable pour les systèmes fortement couplés.
Une culture de la fiabilité améliorera la sécurité en encourageant des réponses adéquates et uniformes.	Un modèle militaire de discipline, de socialisation et d'isolement est incompatible avec des valeurs démocratiques.
La continuité des opérations, l'entraînement et la simulation permettent de maintenir des opérations hautement fiables.	Les organisations ne peuvent pas s'entraîner dans le cadre d'opérations incertaines.
Les procès et les erreurs des accidents peuvent être efficaces et peuvent être complétés par des simulations ou des mesures d'anticipation.	La non-prise de responsabilité face à l'accident paralyse les efforts d'apprentissage organisationnel.

L'ingénierie de la résilience

Tentant de faire évoluer l'aspect bipolaire de l'opposition entre HRO et NAT, de nouveaux axes de recherche émergent au début des années 2000.

> « *The two prevailing organizational approaches to safety NAT and HROs, have made important contributions to theory by focusing attention on a variety of industries that deal with hazardous situations* […]. *Yet both approaches limit the progress that can be made toward achieving highly safe systems by too narrowly defining the problem and the potential solutions* […]. *Sociologists and engineers need to be working more closely together with more shared definitions and assumptions.* » (Leveson *et al.*, 2009).

Ces courants de pensée plaident pour le rapprochement des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines en vue d'une considération intégrée et systémique des questions de sûreté des installations. Une nouvelle approche inter-organisationnelle (Groeneweg, 2002) émerge dans le domaine de gestion de la sécurité. Cette approche vise la réduction de l'écart existant dans de nombreux secteurs industriels entre l'attention portée aux formalismes *descendants* (prescriptifs sur les conditions d'exploitation), l'étude des *responsabilités* des opérateurs (plus que de la contribution de l'organisation et du management) et l'attention (insuffisante) portée à la *réalité* des situations d'exploitation.

Si les formalismes, les procédures et l'organisation du travail préparent à des évènements qui ont été anticipés, il surviendra toujours dans l'exploitation des situations qui n'ont pas été appréhendées. La réponse du système dépendra donc des ressources localement disponibles (équipes et management) et de leurs capacités[154] à réagir. Or, comme le souligne Mathilde Bourrier (2011).

> « *We know so little about the functioning of complex organizations. We are only looking at the tip of the iceberg. Deep below, complex work is done, people are toiling, and complex decisions are made every day, with few paying attention to them. We depend on these invisible webs of teams, decisions, technology, infrastructures, and yet we know almost nothing about their daily operations* » (Bourrier, 2011).

Ainsi, le concept de *résilience*[155] s'intéresse, pour un système ou une organisation à sa « *capacité à anticiper, détecter précocement et répondre adéquatement à des variations du fonctionnement du système par rapport aux conditions de référence, en vue de minimiser leurs effets sur sa stabilité dynamique* » (Hollnagel *et al.*, 2006). Adapté aux systèmes sociotechniques, il se démarque radicalement de l'approche *individuelle* et cherche à formaliser les caractéristiques permettant à une organisation de répondre à une perturbation (crise, évènement naturel, etc.). Ainsi, Flin (2006) pointe explicitement le rôle du *management* définit la résilience comme « *l'*[ensemble] *des caractéristiques relatives à la manière de manager les activités d'une organisation pour anticiper et éviter les menaces envers son existence et ses buts premiers. Ceci se traduit par la capacité d'une organisation à manager des pressions importantes ainsi que des conflits entre la sécurité, les objectifs de production et/ou les objectifs de performance* » (cité par Desmorat, 2012). La *résilience* a été formalisée autour de quatre piliers : anticiper les accidents, être attentif aux signaux faibles, avoir une réponse adaptée aux évènements et enfin, capitaliser en apprenant suite aux évènements[156] (Pariès *et al.*, 2012).

Les ouvrages sur l'*ingénierie de la résilience* proposent un certain nombre de pistes pour l'application des préceptes de résilience dans les organisations productives comme la méthode FRAM (*Functional Resonance Analysis Method* ; Hollnagel, 2012) ou la méthode STAMP (*Systems-Theoretic Accident Model and Processes* ; Leveson *et al.,* 2006). Ces méthodes visent à opérationnaliser cette théorie mais, du fait de leur complexité conceptuelle et du coût en ressources de leur déploiement, elles ne sont pas encore utilisées à grande échelle (Underwood, 2013).

[154] Savoir et pouvoir.
[155] Ce terme est issu de la physique des matériaux et se rapporte à la capacité d'un objet de reprendre sa forme initiale après avoir subi un choc.
[156] Il s'agit donc d'un modèle *normatif* (voir 2.1.2).

Synthèse

Nous avons dressé un très bref *historique* de la prise en compte des FOH dans les safety sciences. Si les grandes thématiques de l'accident ou de l'erreur humaine ont longtemps été l'objet de questionnements philosophiques, elles sont depuis les révolutions industrielles (et de manière sensible depuis la Seconde Guerre mondiale) prégnantes dans le champ pluridisciplinaire des safety sciences. Le *facteur humain* s'est d'abord constitué en *discipline* puis institutionnalisé aux Etats-Unis. Le développement de l'énergie nucléaire et du transport aérien dans les années 1960 a renforcé sa prise en compte dans la prévention des accidents. S'est alors opérée l'intégration d'approches d'ingénierie, ergonomiques et psychologiques qui ont ouvert le spectre de considérations initialement *techniques* (l'individu considéré comme un *composant* du système) vers des approches *humaines* (essentiellement *cognitives* visant à comprendre les mécanismes de l'erreur d'un point de vue individuel en cherchant à l'*éliminer*). Dans les années 1980 (la *Safety culture decade*), les analyses d'un grand nombre d'accidents majeurs dans différents secteurs montrent les limites d'une approche exclusivement individuelle. Certains sociologues (Turner, Perrow, Vaughan) interrogent le rôle des organisations (système, relations hiérarchiques, culture) dans les évènements négatifs (incidents, accidents). En moins d'un demi-siècle, la compréhension de l'*accident* s'est diversifiée, affinée mais aussi complexifiée. Sur la base de nouveaux modèles d'accident, les méthodes d'enquête (analyse) et de prévention (diagnostic) ont également évoluées.

Dans le champ des FOH, deux théories influentes s'opposent *conceptuellement* : la théorie des *accidents normaux* et celle des *organisations hautement fiables*. Devant le caractère parfois dogmatique du clivage, certains chercheurs se détachent peu à peu de cette dualité pour explorer de nouvelles voies. C'est ainsi qu'émerge, dans les années 2000, le concept d'*ingénierie de la résilience* qui porte sur la capacité d'un système (une organisation, une société, un système automatisé, etc.) à recouvrer un fonctionnement *normal* après avoir subi un *choc* (une crise, une catastrophe, une attaque, etc.). Si les *théories* de la *résilience* semblent prometteuses pour la gestion de la sécurité, il existe un écart entre les productions des chercheurs et leurs applications *concrètes*. Or, comme le rappelle Hopkins au sujet des théories et des modèles d'accidents, « *this is not just a theoretical debate. There are practical consequences for the way we go about accident prevention* » (2001, p.72).

Après des années d'amélioration de la sûreté (*technique*) de fonctionnement et la découverte progressive (et récente) du rôle des Hommes dans les accidents (ou leur prévention), la prise en compte des FOH semble être, aujourd'hui encore, une voie d'amélioration importante pour la gestion de la sécurité. Le rapprochement de nombreuses disciplines a étendu et *complexifié* le champ des FOH. Il existe aujourd'hui un écart (*gap*) entre les *théories* et/ou les *modèles* produits par la recherche depuis les années 2000 et les pratiques des opérationnels (e.g. Okstad *et al.,* 2012 ; Underwood, 2013).

Cet écart nous intéresse et sera (plus ou moins directement) considéré dans le reste de nos réflexions. Puisque les safety sciences génèrent de nombreux modèles pour partager ou opérationnaliser les théories d'accidents, nous orientons notre démarche sur ces objets *communs*[157] pour tenter de répondre à la question suivante. Alors que certains des chercheurs parmi les plus

[157] Dans le double sens de *collectif* et d'*usuel.*

influents du domaine affirment la nécessaire *obsolescence*[158] des théories et modèles d'accidents, comment expliquer que les usages soient toujours dominés par le SCM, développé dans les années 1990 ?

2.1.2. Considérations générales sur la nature et les utilisations des modèles

> « Si la carte n'est pas le territoire, le modèle n'est pas le phénomène qu'il représente »
>
> (Le Moigne, 1987)

« *Le terme modèle est un terme porte-manteau : si on lui accole un adjectif il change complètement de sens. Tentez de rapprocher un organisme-modèle (une souris de laboratoire ou une colonie de mouches drosophiles) et un modèle numérique (un programme informatique capable de numériser les rapports entre plusieurs paramètres et plusieurs objets) : ils ne se reproduisent pas. Mais tous les modèles n'ont-ils pas en commun au moins d'être des objets « abstraits » ? Non, car un « modèle » désigne pour le logicien une assignation d'objets non langagiers – et en ce sens plus concrets – aux termes d'une théorie.* » (Bouaziz & Leconte, 2011). Peut-on alors répondre à la question : *qu'est-ce qu'un modèle* ?

Nous tentons d'apporter des éléments de *caractérisation* de ces objets fondamentaux des sciences que sont les modèles (à défaut de tenter d'en apporter une définition là où de nombreux épistémologues, philosophes, historiens des sciences ou linguistes ont renoncé avant nous). Dans le prolongement de cette caractérisation *ontologique,* nous exposons ensuite différents usages des modèles. Polymorphes et polysémiques, les modèles sont parfois confondus avec les théories scientifiques. Nous achevons donc cette partie en discutant des différences (et des articulations) qui existent entre théories, modèles, méthodes et outils.

Qu'est-ce qu'un modèle ?

Le terme *modèle* provient du latin *modulus* (petite mesure) qui se rapporte à une mesure *arbitraire* qui permettait d'établir les rapports entre différentes partie d'un ouvrage. Il a donc une origine *technique* liée aux métiers d'artisans constructeurs (tailleurs, architectes). Il donne au Moyen-âge le mot français *moule* et l'italien *modello* (étalon, module) qui donnera *modèle* à la Renaissance (Armatte, 2005). La polysémie du mot est forte dans l'usage courant, le modèle est ce qu'il convient de reproduire, la référence ou le prototype (modèle en peinture, top-modèle) ; la maquette (modèle d'architecture) ; un idéal d'une population (l'élève ou l'ouvrier modèle) ; la représentation physique d'une idée abstraite (modèles analogiques) ou encore un formalisme logico-mathématique.

[158] « *We must expect that the methods developed today will* [be] *partly obsolete, not because the methods change but because the nature of socio-technical systems, and therefore the nature of accidents, do*. » (Hollnagel & Speziali, 2008).

Le *modèle* peut donc être un *prototype* (physique) ou un *type* (abstrait). Plus marquant encore, il peut recouvrir successivement (voire simultanément) les deux statuts comme le note Armatte (2005) prenant pour exemple l'*Homme Moyen* de Quetlet qui est autant le modèle (le prototype) qui a *a priori* permis de concevoir les Hommes et le résultat de calculs de moyennes sur un ensemble permettant l'abstraction *a posteriori* (type). Si étymologiquement le *modèle* est alternativement ou simultanément l'objet *modélisé* et l'objet *modélisant*, on considère souvent implicitement la seconde possibilité dans les sciences et les techniques contemporaines. Plusieurs auteurs, historiens, épistémologues et/ou modélisateurs (e.g. Varenne, 2008 ; Armatte & Dalmedico, 2000) l'expliquent au moyen d'études historiques[159] que nous ne reproduirons pas ici, considérant ce *fait sémantique* comme un point de départ.

Il existe dans la littérature de nombreuses tentatives de définition de l'objet *modèle.* L'informaticien Minsky propose une définition largement ouverte : « p*our un observateur B, un objet A* est un modèle d'un objet A, dans la mesure où B peut utiliser A* pour répondre à des questions qui l'intéressent au sujet de A* ». (Minsky, 1965 ; cité par Varenne, 2008). Pour Naslin (1974, cité par Le Moigne, 1994) « *un modèle d'un phénomène ou d'un processus est essentiellement un mode de représentation tel qu'il permette, d'une part, de rendre compte de toutes les observations faites et, d'autre part, de prévoir le comportement du système considéré dans des conditions plus variées que celles qui ont donné naissance aux observations ».* Un modèle est donc une *représentation* qui permet à l'Homme de *connaître* des objets (physiques ou abstraits).

Gallais (2012) propose une autre définition du modèle comme « *une actualisation d'une théorie, ou comme une représentation d'un système cible plus ou moins large, sous la forme d'un ensemble de définitions, d'observations, parfois de lois, etc. Quelles que soient la discipline concernée et la méthode selon laquelle il est élaboré (expérimentale ou inductive par exemple), un modèle théorique peut être vu comme une version d'étude d'un système cible permettant de satisfaire différentes vocations, comme celle de décrire, d'expliquer, ou de prévoir certains phénomènes.* » Ces trois définitions ont été choisies car elles constituent une tentative (délicate !) de précision croissante de ce qu'*est* un modèle. On remarque cependant que la dernière se doit d'associer un qualificatif (*modèle-théorique*) à l'objet qu'elle entend définir universellement (*indépendamment de la discipline ou de la méthode*).

Devant la diversité épistémique, ontologique et sémantique de ces objets, nous préférons (comme Varenne, 2008) l'exercice de *caractérisation* plutôt que de *définition* et proposons de retenir que :

- Un modèle est toujours une *réduction* (simplification ou *facilitation*) du réel puisqu'il ne représente qu'un ensemble *discret* de caractéristiques d'un phénomène, c'est d'ailleurs ce qui motive son existence,
- Ces caractéristiques sont énoncées comme un ensemble de propositions ordonnées et découlant d'*observations* ou de *mesures* relatives à un aspect donné de l'objet (ou phénomène) modélisé,
- Ces caractéristiques sont le fait d'un choix (nécessairement empreint de *subjectivité*, *partialité*) du modélisateur, à tout modèle est dès lors associé un *objectif de modélisation,*

[159] Essentiellement liées à la percolation de l'activité de modélisation entre disciplines (physique, biologie, économie, psychologie, sociologie, informatique, etc.) et aux évolutions épistémologiques souvent induites (positivismes, constructivisme, etc.).

- Un modèle peut être physique ou abstrait, il est un *objet* dans le sens où il est plus qu'une relation analogique et possède « *une existence autonome aux yeux de son utilisateur, tout modèle possède une forte indépendance ontologique qui l'apparente à un objet* » (Varenne, 2012).
- Un modèle est provisoire[160] (il évolue ou est rejeté au gré des évolutions des connaissances sur son objet ou phénomène),
- Un modèle est un *moyen* (et non une *fin*).

Ces *caractéristiques* des modèles nous amènent à considérer l'*usage* (en différenciant autant le cas échéant *usage souhaité* et *usage constaté*) des modèles.

De l'usage des modèles

La proposition de caractérisation des *modèles* à laquelle nous nous sommes livrés doit être complétée par une considération sur les *usages* (ou fonctions) de ces objets qui peuvent être conçus (ou utilisés[161]) pour rendre mémorisable, sensible (accessible aux sens), faciliter l'expérimentation, la compréhension de données, la sélection ou la classification d'entités, la reproduction de comportements, interpréter, illustrer, etc. (Varenne, 2012). Ces usages peuvent être classés suivant différents aspects.

A une échelle la plus large possible (indépendante des communautés d'utilisateurs ou des disciplines scientifiques), on peut distinguer *deux* principaux usages des modèles en termes d'intentions d'une part et de rapport au réel d'autre part (Rey, 2010). Dans le premier cas la référence au *modèle* peut être faite à des fins de discours *partisan,* de valorisation (promotion de normes, de comportements par référence à un *prototype*) ou *a contrario* de *neutralité*, de distanciation (en référence à un *type*, un ensemble non hiérarchisé). Dans le second cas, la référence peut renvoyer à une *réalité objective* ou à une *abstraction.* On retrouve cette opposition *sémantique* sous l'angle *épistémologique* avec Le Moigne qui distingue la *connaissance-objet* (à laquelle il associe, avec Ladrière (1999), le *Modèle-représentation-diplomatique*) de la *connaissance-projet* (à laquelle il associe le *Modèle-représentation-théâtrale*). « [Dans] *le Modèle-représentation-théâtrale* [...] *auteur, acteur, spectateur, cherche[nt] –et souvent trouve[nt]- ce qui n'existe pas encore et qui n'existera peut-être que pour lui*. *Le Modèle-représentation-diplomatique est présumé passif, lettre d'accréditation qui exclut le représentant, tiers présumé transparent entre l'objet (de connaissance) à représenter et le récepteur qui devrait ne trouver dans le modèle que le duplicata fidèle de cet objet re-présenté : métaphore satisfaisante de la modélisation de la connaissance-objet. »* (Le Moigne, 1987). Si cette distinction à portée universelle sur les modèles est intéressante, il faut toutefois reconnaître que cette *dualité* (n')est (qu')une construction théorique car « *les modèles (cliniques, techniques, scientifiques) que nous considérons, élaborons, discutons, que les uns veulent objets clairs et nets, les autres opérateurs actifs et bruyants, ces modèles* [...] *entendus dans* [une] *complexité consubstantielle* [sont] *conjonctions de représentations théâtrales <u>et</u> diplomatiques. »* (*op. cit.*). L'opposition entre l'usage *partisan* et *objectif* des modèles est mobilisée dans la discussion de cette

[160] Cette affirmation sera discutée plus en détail autour des questions de *contemporanéité* ou *d'obsolescence* des modèles d'accidents. Elle nécessite, selon nous, une réflexion sur la distinction entre *validité* et *utilité*.

[161] Nous précisions qu'un modèle peut être utilisé pour *plus*, *moins* ou *autre chose* que ce pour quoi il a été conçu. Ou, pour Le Moigne (1987) « *plus et moins* » à la fois puisqu'une partie des intentions originelles sont perdues (*moins*) dans la transmission à l'utilisateur qui ajoute (*plus*) une partie associée à sa culture (*background*).

recherche. A ce stade puisque cette distinction, en *accolant* un adjectif à « *modèle* », le fait changer de *sens…* on retiendra qu'il s'agit bien d'un « *terme porte-manteau* » (et que, le plus ironique dans cette expression n'est pas son incongruité, mais le fait qu'en utilisant une *analogie* pour exprimer une *idée*, elle est « déjà » *un modèle* !)

Théorie, modèle, méthode, outil…

On note avec Franck Varenne que la caractérisation des *modèles* donnée par Minsky[162], « *comme toute caractérisation large qui ne peut prétendre être une définition, elle ne circonscrit pas les seuls modèles mais parfois aussi les théories* » (Varenne, 2008). Les processus de théorisation et celui de modélisation se ressemblent car ils impliquent tous les deux de collecter, d'ordonner des données, des informations, afin d'interpréter (voire prédire) un phénomène (par exemple, le comportement d'un système). Ces ressemblances contribuent à expliquer que l'on trouve au sujet de certains travaux scientifiques, comme ceux sur l'accident organisationnel, la qualification indifférenciée de « modèle » ou « théorie ». La littérature parle en effet de façon équivalente (*i.e.* en désignant les mêmes ensembles conceptuels) de *modèle d'accident organisationnel* ou de *théorie de l'accident organisationnel.* Pourtant, ces deux objets sont différents.

D'un point de vue philosophique, *modèles* et *théories* ont deux statuts distincts, Barberousse & Ludwig (2000) les considèrent comme deux *représentations* de natures différentes. Les théories sont des représentations *d'une réalité* et peuvent dès lors être *vraies* ou *fausses*, démontrées ou invalidées. Elles se distinguent des *modèles* (que les auteurs qualifient de « *fictions* ») dont la fonction est de permettre l'abstraction de certains concepts pour leurs utilisateurs (des « *interprètes* »). Si la *fiction* se distingue du discours du *vrai* cela ne signifie pas épistémologiquement qu'elle supporte le *faux.* En effet, « *imaginer, c'est former des pensées qui ne concernent pas directement la réalité, au moins en ceci qu'elles portent sur des contextes dans lesquels un certain nombre des propositions tenues pour vraies dans nos meilleures théories sont mises entre parenthèses.* » (*op. cit.*).

D'un point de vue épistémologique, on qualifie de *théorie* un large ensemble d'énoncés (qui peuvent être axiomatisés, formalisés) reliés entre eux. Les inférences rendues possibles par ce système doivent avoir des implications génériques sur un phénomène, ou un objet donné. Si l'ensemble d'énoncés « *se contente de formuler de manière hypothétique l'existence de contraintes formelles plus ou moins locales sur des interactions spécifiques* » (*op. cit.*), il s'agit alors d'un modèle. Le modèle fournit un ensemble restreint de contraintes sur des interactions entre notions ou concepts (Varenne, 2008). Dans la méthode scientifique classique, le modèle est une projection de la théorie et la succède donc. De plus, il ne se rapporte qu'à un ensemble restreint de cas (ou situations), englobés dans la théorie. Le modèle a donc un champ d'application plus restreint. Malgré cela, on constate que les modèles sont de plus en plus souvent utilisés pour construire, interpréter ou utiliser des théories. De plus, « *une théorie devient un modèle à propos d'un phénomène particulier lorsque ses concepts et son point de vue spécifique sur les faits observés ou les résultats d'expériences enrichissent la compréhension de ce phénomène en rendant possible une analyse plus approfondie de ce dernier et une interprétation plus rationnelle et cohérente de ses caractéristiques essentielles.* » (Willett, 1996). La frontière entre *modèle* et *théorie* se trouble donc, presque naturellement lorsqu'elle est confrontée aux usages.

[162] Voir « *qu'est-ce qu'un modèle ?* », 2.1.2 ci-dessus.

Nous proposons de retenir, comme différence fondamentale entre modèle et théorie, la portée (générale ou restreinte) et le rapport au réel. La théorie vise l'extension, la généralisation ; le modèle à la compréhension. On pourrait extrapoler cette idée pour avancer qu'une « *théorie est l'ensemble de ses modèles »* (Bouaziz & Leconte, *op. cit.*). La théorie définit et positionne des concepts, produit des lois générales ; le modèle vise à expliquer un phénomène, en articulant ces *concepts*, à l'aide de formalismes verbaux (des mots), graphiques (des formes) ou logiques (des connecteurs). La confusion existe aussi parfois entre *modèle* et *méthode ou outil.*

Outil est issu du latin « *ustensilia* » (*ce dont on se sert*), l'outil désigne donc (au sens figuré qui nous intéresse) « *tout moyen d'action, ce dont on se sert pour parvenir à un résultat, pour tirer parti de quelque chose* » (Académie Française, 2015). Par *méthode* il convient de désigner « *toute démarche ordonnée, tout ensemble de moyens raisonnés permettant de parvenir à un résultat, d'établir une pratique* » (*op. cit.*). Outils et méthode (démarche d'utilisation de ces outils) peuvent donc être considérés comme des produits du modèle et se comportent comme ses vecteurs d'application. Plusieurs méthodes et outils différents peuvent-ainsi être rattachés à un unique modèle.

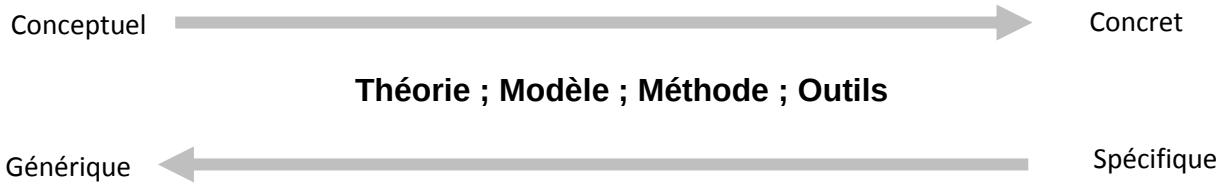

Figure 23 : Proposition de positionnement de différents objets de la connaissance.

Des frontières floues, des usages qui évoluent dans le temps et aussi, peut-être, un manque de rigueur dans le choix des termes, rend délicat la distinction précise des *théories, modèles, méthodes* et *outils.* Cette remarque est particulièrement vraie dans le cas des modèles d'erreur humaine ou d'accidents, liés à la gestion de la sécurité. Si l'amalgame entre ces objets de la connaissance est souvent sans conséquence en ce qui concerne les pratiques, il peut constituer un biais conséquent dans le débat scientifique. L'utilisateur peut se passer de qualifier précisément l'objet qu'il manipule, tant que celui-là produit des effets et que ces effets sont souhaités. En revanche, le débat scientifique repose, en partie, sur la valeur des objets de connaissance qu'elle attribue à leur nature. Ainsi, ne pas analyser précisément la nature de l'objet discuté (théorie, modèle, méthode ou outil) risque de rendre caduque tout le raisonnement élaboré.

Dans le champ de gestion de la sécurité, un débat existe sur la valeur des modèles. Ce débat est en grande partie focalisé sur le SCM or, de très nombreux articles ont été écrits en critiquant le manque de spécificité du modèle (voir 2.3.2). Ce à quoi d'autres opposent que ce modèle n'a jamais été conçu pour être spécifié, que son caractère générique est assumé à des fins de sensibilisation, de communication. Il se pourrait que la question de la nature et du statut des objets de connaissance des safety science n'ait pas été assez approfondie et que cela soit préjudiciable au débat scientifique.

2.1.3. Proposition d'un cadre pour l'étude des modèles d'accidents

Constatant l'absence de consensus sur la nature du SCM (Underwood, 2013), nous avons souhaité conduire une réflexion de fond sur ce modèle. L'intérêt d'étudier ce modèle en particulier découle de sa très large diffusion dans les milieux industriels et académiques. Notre intuition est qu'il fallait nécessairement opérer un « retour aux sources », au sens propre, en se référant aux travaux originaux de Reason présentant le SCM, et au sens figuré en remontant bien plus en amont dans le parcours de l'auteur.

Nous avons progressivement structuré notre démarche, la découverte et l'appropriation d'une nouvelle publication indiquant de nouveaux axes de réflexion, comme de nouvelles influences, de nouveaux collaborateurs, de nouvelles controverses. Pour réaliser une « archéologie du modèle », l'historiciser, en comprendre les fondements épistémologiques et méthodologiques, nous nous sommes engagés dans une approche qualitative-interprétative.

Répondre à la question « *comment le modèle a-t-il été construit ?* » dans une perspective constructiviste demande une approche sans doute plus marquée par le paradigme indiciaire (posture interprétative) pour les modèles d'accidents que pour d'autres modèles, appartenant aux sciences hypothético-déductives (physiques, biologiques, mathématiques). Il est d'usage, dans la Méthode scientifique d'expliciter avec rigueur et méthode ses hypothèses et son positionnement épistémique, mais le champ des safety sciences qui s'est constitué progressivement, de manière récente, a souvent contourné ces questions au prétexte d'un empirisme pragmatique (comme le montre Le Coze, 2013b). Il faut donc, à travers l'étude approfondie d'un auteur, construire son parcours de recherche, étudier les articulations et glissements entre *thèmes de recherches*, *méthodes de travail* voire *disciplines* pour mettre en perspective la ou les publications consacrées « au modèle ». Une telle étude permet également d'affiner la réponse à la question « *de quoi le modèle est-il fait ?* » en renseignant sur les concepts qu'articule le modèle mais également en renseignant sur les formalismes graphiques, logiques, verbaux, employés. L'évolution que connaît généralement un modèle entre ses ébauches et sa version « finale » (à l'instant de l'étude) permet de considérer ceux-ci comme des *choix* (conscients ou inconscients) qui résultent d'ajustements effectués par l'auteur (ou du collectif d'auteur, voire d'une communauté). Ces choix rendent compte de *frictions* entre l'entreprise initiale de modélisation et la *confrontation au réel* de l'objet modèle. La troisième question, « *pour quoi le modèle a-t-il été fait ?* » (qui doit être entendue, nous le répétons, comme une *volonté* du ou des modélisateurs) peut faire l'objet de déclarations formelles ou se comprendre à la lumière des études bibliographiques *génériques* (éléments de réponse au « comment ») et *spécifiques* (évolutions du « quoi »).

Tableau 13 : Proposition d'une méthodologie de caractérisation des modèles d'accidents.

Comment (modélisation)	De quoi (concepts, théorie)	Pour quoi (finalité)
Etude bibliographique *générique* (et compréhensive) centrée sur l'auteur, son parcours, ses postures et thèmes de recherche.	Etude bibliographique *spécifique* des publications dédiées au modèle portant une attention sur les évolutions de formalismes.	Déclaration formelle de l'auteur « *ce modèle est destiné à...* » (bibliographie, entretiens) ou inférence sur la base des études *générique* et *spécifique.*
Le comment doit être, dans le cas des modèles d'accidents, « reconstruit ».	Le *quoi* s'exprime à travers les formalismes (graphiques, lexicaux, logiques).	Le *pour quoi* est une donnée *a priori* qu'il convient de ne pas confondre avec des constats *a posteriori.*

Dans la section suivante, nous présentons une application de ce cadre méthodologique à l'étude d'un modèle d'accident paradigmatique : le *Swiss cheese model* (Reason, 2000b). Cela constitue une itération dans une démarche d'envergure qu'il faudra reproduire sur d'autres modèles, d'autres auteurs (e.g. Le Coze, 2015a, 2015b) afin de reconstruire méthodiquement les six faces d'un *Rubik's Cube™.*

2.2. Les modèles d'accidents organisationnels de James Reason

James Reason fait partie des auteurs qui ont marqué un changement de paradigme mais qui se trouvent être, paradoxalement, plus souvent cités qu'étudiés. Père d'un modèle étiologique d'accidents connu sous le nom de *Swiss cheese model*, il est depuis une vingtaine d'années un incontournable des publications du domaine des safety sciences[163]. Par son succès, le SCM a conduit à négliger l'ensemble des travaux de Reason sur les accidents qui constituent une théorie de l'accident organisationnel.

Revenir sur le parcours de quarante années de recherches de cet auteur, ses travaux antérieurs et postérieurs au SCM, renseigne sur les fondements (ontologique, épistémologique et méthodologique) du modèle, donc sa nature (2.2.1). Dans un second temps, nous resserrons notre étude sur les évolutions des modèles d'accidents organisationnels de Reason dont le SCM est en quelques sortes l'aboutissement (2.2.2). A travers cette relecture, ce travail « d'archéologie du modèle », nous mettons en avant que, contrairement à l'abus de langage fréquent, « le modèle de Reason » est en réalité un ensemble de modèles qui est le produit d'une forme particulière de collaboration entre domaines (recherche, industrie) et disciplines (sciences humaines, sciences de l'ingénieur). En déconstruisant certaines « idées reçues » (Larouzée & Guarnieri, 2014c), on peut alors proposer une « théorie unifiée » de l'accident organisationnel (2.2.3).

Importance et principaux objectifs de cette démarche

La TAO et les *Modèles d'Accidents Organisationnels* (MAO) associés influencent très largement les pratiques de gestion de la sécurité dans de très nombreux secteurs (Perneger, 2005 ; Salmon *et al.,* 2012 ; Collins *et al.*, 2014 ; Larouzée *et al.*, 2014b). Utilisé de façon dogmatique par des acteurs du contrôle, de l'industrie, de la recherche, pour des besoins aussi variés que la communication, l'enseignement, la prévention, l'analyse, le SCM peut être qualifié de *modèle paradigmatique* ou de *sur-modèle* (Rey, 2010). L'étude approfondie de cet objet particulier doit permettre d'identifier des déterminants de son succès :

> *« Il serait intéressant de s'interroger en dynamique sur les conditions d'accès d'un modèle au statut de sur-modèle, c'est-à-dire précisément sur les conditions d'une agrégation simultanée de ses quatre dimensions* [normative, descriptive, empirique et théorique]. […] *En somme, il s'agirait de mieux comprendre comment et pourquoi des objets, relevant de modèles intermédiaires, sont transformés à un moment donné en sur-modèles, et à l'inverse, comment et pourquoi certains sur-modèles retrouvent leur condition de modèles intermédiaires. L'Histoire nous enseigne en effet que la durée de vie d'un sur-modèle est souvent courte, qu'elle dépend d'éléments conjoncturels et de sa capacité à susciter l'intérêt des principaux acteurs porteurs des différents sens du concept »* (Rey, 2010).

Cette démarche comporte donc deux objectifs principaux. Le premier est de contribuer à éclairer les pratiques des utilisateurs du SCM dont il est établi qu'ils exploitent le caractère général du modèle pour l'adapter (de façon plus ou moins légitime) à leurs besoins immédiats (Perneger, 2005). Ce faisant, l'ambition est de participer à une amélioration indirecte des efforts pour la prévention des

[163] Son livre *Human Error* (1990) totalise à lui seul 9030 citations. Ce chiffre peut être comparé aux livres présentant les principaux modèles « concurrents » : STAMP (Leveson, 2012 ; 392 citations), FRAM (Hollnagel, 2012 ; 108 citations) ou encore le livre présentant le *modèle domino,* considéré comme le *premier* modèle d'accidents industriels (Heinrich, 1939 ; 1729 citations). *Google Scholar* – 01 septembre 2015.

accidents et la protection des systèmes sociotechniques. Ce premier objectif commande notamment de conduire une réflexion sur la contemporanéité du SCM. Le second objectif est d'identifier des déterminants du succès du SCM qui pourraient servir de futures entreprises de modélisation des accidents. Afin d'atteindre ces objectifs, il a été nécessaire d'élargir notre démarche, partant de l'objet « modèle » au plus large « processus de *modélisation* ».

> *« Les modèles eux-mêmes sont instrumentalisés par les communautés de modélisateurs, par les décideurs qui mobilisent ces outils dans des cadres de négociation, de décision et de gestion partagée, où les enjeux dépassent ceux de la seule connaissance. La séparation entre « learning about theories » et « learning about the world » n'est plus possible ; ce dernier aspect est en train de dévorer le premier. Dans ce nouveau contexte d'une science désunifiée mise en face d'objets très complexes, et surtout d'enjeux collectifs très importants, il nous semble que la vieille épistémologie des modèles comme instruments de médiation entre théorie et réalité observable ne colle plus à la réalité et se trompe d'objet : l'objet « modèle » est l'objet de toutes les attentions, alors que ce qui lui donne sens, c'est l'activité de modélisation. À se focaliser uniquement sur les objets cognitifs, elle ne rend pas compte des acteurs qui mobilisent ces objets cognitifs dans des cadres politiques et stratégiques bien définis. Les philosophes des sciences qui s'en tiendraient au premier aspect seraient un peu comme un caméraman de télévision qui, dans un reportage d'un match de football, se contenterait uniquement de filmer le ballon en gros plan, sans ne jamais nous montrer ni les joueurs, ni les spectateurs, ni le stade. Bien sûr celui qui ferait l'inverse et uniquement l'inverse nous entraînerait aussi dans un monde totalement surréaliste dans lequel on ne comprendrait pas pourquoi les joueurs courent dans tous les sens*. » (Armatte, 2005)

Méthodologie d'étude

Comprendre le contexte de production du modèle commande de dépasser les publications qui lui sont strictement consacrées pour nous intéresser à un corpus plus large. Nous avons donc identifié plusieurs types de publications : (1) celles de Reason antérieures aux MAO, (2) celles de Reason consacrées aux MAO, (3) celles de Reason contemporaines au modèle mais ne lui étant pas consacrées, (4) enfin les publications d'autres auteurs sur le modèle (Tableau 14).

Tableau 14 : Découpage du corpus bibliographique étudié et nature des apports potentiels.

Découpage du corpus	Publications de Reason antérieures aux MAO	Publications de Reason consacrées aux MAO	Publications de Reason contemporaines mais non consacrées aux MAO	Publications d'autres auteurs sur les MAO et particulièrement le SCM
Nature des informations	Renseignent sur la trajectoire et le background de l'auteur	Renseignent sur sa vocation, son fonctionnement	Renseignent sur les recherches parallèles de l'auteur qui influencent le développement de la TAO et par conséquent des MAO	Renseignent sur les utilisations effectives, les critiques opposées au modèle, les suggestions de modification
Référence indicative	Reason, 1982	Reason, 1997	Reason *et al.*, 1998	Johnson & Botting, 1999 ; Young *et al.*, 2004

Notre démarche a été celle de l'*analyse compréhensive* et *interprétative*, une recherche *qualitative* construite sur la base d'*indices*. L'analyse *compréhensive* implique la « compréhension » qui dépend directement des *connaissances* de chacun, des *méthodes* et *outils* employés. En ce sens, « comprendre » une source, c'est « l'interpréter » dans son *contexte de production*. En ne nous limitant pas à l'étude des publications en elles-mêmes, extraites de leurs contextes, nous espérons pouvoir comprendre des *pratiques de recherche* et *de modélisation* et donc *reconstruire* le cheminement de la pensée. Les rencontres de James Reason et John Wreathall nous ont permis par l'entretien d'infirmer ou de confirmer les éléments de compréhension émergeants des documents écrits. De plus, ces entretiens et la correspondance que nous avons entretenue avec Reason et Wreathall ont permis de collecter des éléments complémentaires originaux relatifs à leur collaboration. Ces éléments ont été très précieux pour notre compréhension de la TAO et, par extension, des MAO car « *toute pratique scientifique est insérée dans un contexte historique, intellectuel et social qui contribue à en définir ses modalités d'élaboration* » (Bouilloud, 2007). Le paradigme indiciaire[164] a donc guidé notre démarche vers l'étude de documents *singuliers* à partir d'*indices, de traces,* avec la volonté de favoriser une analyse *profonde* plutôt que *globale*[165]. Toutefois, cette démarche ne se revendique pas rigoureusement de Guinzburg dans la mesure où elle n'a pas été plus largement guidée par une méthodologie historienne.

Notre démarche se résume donc comme suit : nous avons d'abord repéré l'ensemble des publications de James Reason incluant les articles, les chapitres d'ouvrages, les ouvrages rédigés seul ou en premier auteur, les colloques voire des documents plus originaux comme des supports de cours ou de conférences (soit 136 références ; Larouzée *et al.*, 2015a). Pour étudier ce corpus, nous avons repéré l'introduction de nouveaux concepts, de métaphores, ou de modèles par Reason au cours du temps. Lorsque cela a été possible, nous avons relié ces éléments au cadre plus large des publications dans les safety sciences pour déterminer les auteurs (ou évènements) influençant la pensée de Reason. Nous avons noté les thèmes de recherches auxquels se rapportent les documents (mal des transports, erreurs, accidents, etc.) ainsi que les domaines auxquels ils étaient associés (transport, énergie, médecine, etc.). Une cartographie de la carrière de Reason en cinq *périodes* distinctes a ainsi émergé (voir 2.2.1). Nous avons consacré un intérêt particulier aux *phases (ou périodes) de transition* entre les thèmes de recherches. Les publications relatives aux MAO ont permis de construire une chronologie détaillée de leurs évolutions, chaque nouveau modèle (ou nouvelle version d'un modèle) peut être considérée comme une *cristallisation* de la pensée (autrement *en mouvement*) et donc une opportunité d'analyse objectivée. Enfin, par le biais d'une recherche par mots clefs dans les principales bases de données bibliographiques[166] et en suivant les citations des différents articles, nous avons collecté les éléments relatifs aux utilisations, aux limites, opportunités ou suggestions de développement, de la TAO et des MAO.

[164] D'une capacité cognitive humaine d'inférence (capacité de passer du connu à l'inconnu) l'historien Carlos Ginzburg propose à la fin du XX^{ème} un nouveau paradigme pour les sciences sociales : le *paradigme indiciaire* qu'il décrit comme « *la capacité de remonter, à partir de faits expérimentaux apparemment négligeables, à une réalité complexe qui n'est pas directement expérimentale*. » (Ginzburg, 1989 ; p. 149)

[165] Qui se rattacherait alors plutôt aux paradigmes *nomothétique* ou *structuraliste.*

[166] Google Scholar, HAL, Science Direct et Cairn.

2.2.1. Naissance d'une théorie de l'accident organisationnel

Des renseignements sur la vie et la carrière de Reason peuvent être trouvés dans les préfaces de ses différents livres[167], un certain nombre de notes de bas de pages et dans un livre qu'il qualifie lui-même d'*autobiographique* (Reason, 2013). Cette approche biographique est précieuse car « *nous pensons, parlons et écrivons à partir de nos expériences personnelles, nécessairement.* » (Bouilloud, 2007). Nous avons donc cherché, pour commencer notre étude de ses travaux, à identifier l'homme *derrière* la théorie de l'accident organisationnel.

James Reason naît en Angleterre près de Londres le 1er mai 1938. Il est diplômé de l'Université de Manchester en psychologie en 1962. Jeune psychologue, il travaille sur l'ergonomie des cockpits pour l'Institut de médecine aéronautique de la Royal Air Force à Farnborough de 1962 à 1964 puis à l'Institut de médecine U.S. Naval Aerospace, en Floride. En 1967 il soutient une thèse de psychologie sur le mal des transports à l'Université de Leicester, intitulée « *Relationships between motion sickness susceptibility, motion after-effects, and "receptivity"* ».

De 1967 à 1976, Reason conduit de nombreuses recherches sur la désorientation sensorielle et le mal des transports à l'Université de Leicester avant de rejoindre, en 1977, l'Université de Manchester en tant que professeur de psychologie. En 2001, il devient professeur émérite de cette Université.

La longue carrière scientifique de Reason (1967-2013) lui a valu de nombreuses reconnaissances, il est notamment membre de la Bristish Psychological Society, de la Royal Aeronautical Society, de la Bristish Academy, du Royal College of General Practitioners. En 2003, il est nommé Commandeur de l'ordre de l'Empire Britannique, prestigieuse distinction reconnaissant l'apport de ses travaux dans la réduction des risques dans le milieu hospitalier.

Voici tracée en quelques lignes cinquante années de carrière scientifique. Puisque « *toute recherche, tout travail scientifique contient des éléments autobiographiques sous-jacents, implicites ou masqués, pas tant dans les objets étudiés que dans les processus même de leur analyse* » (Bouilloud, 2007). Ces éléments biographiques sont développés dans les parties suivantes, de manière diffuse, notamment à travers le parcours de recherche de Reason.

Parcours de recherche

Il n'est pas simple de proposer un découpage précis et pertinent d'une carrière académique. En effet, les périodes de recherche se chevauchent et s'appellent mutuellement. Le chercheur est impacté par des facteurs externes (publications d'autres chercheurs, découvertes, évènements d'actualité, etc.) et il est toujours délicat de juger rétroactivement des importances relatives de tous ces éléments. Comme le soulignent Guarnieri et Besnard (2013), « *les avancées d'une carrière se font par petits sauts, lentement, sur des durées de plusieurs dizaines d'années. En tant que lecteur, la clarté de l'exposé aveugle. On ne distingue plus les traces des années de travail. Il n'en reste que les effets visibles : la synthèse et la limpidité du discours* ».

[167] Où il livre notamment des remerciements détaillés à ses collaborateurs qu'ils soient des doctorants ou d'éminents chercheurs.

Pourtant, dès le premier niveau d'analyse du corpus bibliographique que nous avons réuni, une cartographie du parcours de recherche de Reason a émergé. Elle est divisée en cinq grands thèmes (Tableau 15).

Tableau 15 : Principaux thèmes de recherche de James Reason (Larouzée et al., 2014b).

Thème	Période	Publication(s) marquante(s)
Désorientation, mal des transports	1967-1981	*Motion Sickness (1975)*
Erreurs quotidiennes, inattention	1977-1987	*Absent Minded? (1982)*
Classification des erreurs	1987 – 1990	*Human Error (1990)*
Accidents organisationnels, culture de sécurité Violations	1990 – 2000	*Managing the risk of organisational accidents (1997)*
Travaux appliqués en milieu hospitalier, industriels et facteur humain « héroïque »	2000 - 2013	*Human error : model and management (2000)* *Managing maintenance error (2003)*

Les périodes de transition entre les phases sont souvent marquées par la publication d'ouvrages qui reprennent et d'une certaine façon réorganisent les travaux publiés dans les articles. La Figure 24 propose une représentation en histogramme des publications de Reason.

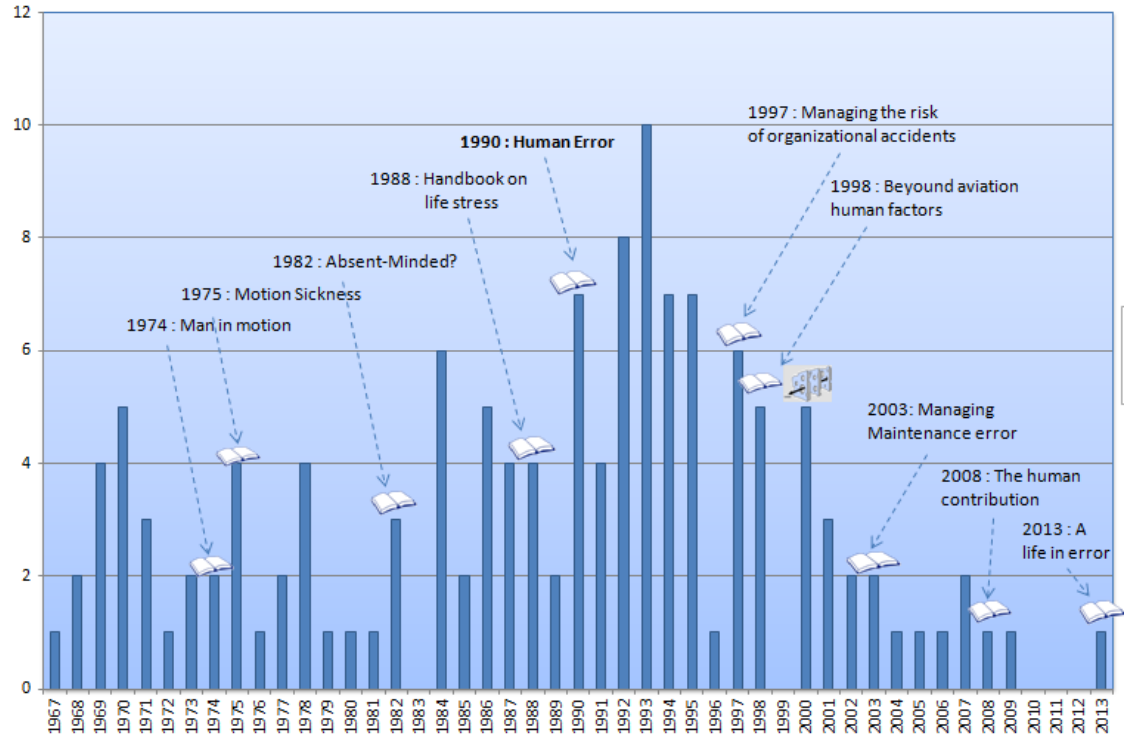

Figure 24 : Représentation alternative du corpus bibliographique. Les publications d'ouvrages marquent l'achèvement de « périodes de recherche » consacrées à un thème principal (Larouzée & Guarnieri, 2015a).

Désorientation, mal des transports (1967 – 1981)

Reason conduit ses premières recherches en psychologie sur le sujet de *désorientation sensorielle* et du *mal des transports* dont peuvent être victimes les pilotes de chasse dans leurs cockpits. Sa thèse, soutenue en 1967, est suivie d'une série de 14 articles qui portent sur l'effet Coriolis[168], la désorientation due aux illusions visuelles et la correction de posture chez l'homme. Les différents résultats de cette période de recherche font l'objet de la publication, coup-sur-coup, de deux livres : *Man in motion* (Reason, 1974) qui reçoit des critiques mitigées par ses pairs, directement suivi de *Motion sickness* (Reason, 1975) un ouvrage beaucoup plus approfondi.

Ces premiers travaux interpellent notamment Reason sur la possibilité de *tromper* le cerveau par le biais des sens. L'expérience qui suscite cette observation est relatée dans l'article *A visually-driven postural after-effect* (Reason *et al*., 1981). Elle consiste à placer une personne debout, face à un large écran qui affiche une image *verticalement mobile*, c'est-à-dire, qui se déplace du haut vers le bas de l'écran en affichant un motif infini. Bien que feinte, une sensation de mouvement est générée chez le sujet (on parle de phénomène de *motion illusoire*[169]). La perception de mouvement conduit le cerveau à tenter de *corriger* la posture du sujet pour éviter la chute. Or, la position étant du point de vue de l'équilibre, *initialement correcte,* sa *correction* entraîne (dans les cas extrêmes) la chute du sujet.

« L'environnement trompe le cerveau, le cerveau commande le corps, le sujet tombe » (Reason, 1990b). Cette association d'idées, apparemment triviale, va entrouvrir la porte d'une nouvelle ère de recherche pour Reason (Reason, 2013). Ce changement de thème est fortement marqué dans sa bibliographie. De 1975 à 1981, Reason publie quelques articles sur le mal des transports (Reason, 1978, 1979, 1981 ; cités par Reason, 1990b) mais, certaines publications montrent les prémisses d'une recherche nouvelle, consacrée à l'erreur (Reason, 1976, 1977, 1979 ; cités par Reason, 1990b).

Erreurs quotidiennes, inattention (1977 - 1987)

> *« Un après-midi au début des années 70, je faisais chauffer une bouilloire pour le thé. La théière attendait, ouverte, sur le plan de travail. C'est alors que notre chat (un Birman très bruyant) hurla famine à la porte de la cuisine. Je dois avouer que j'étais un peu agacé par ce chat et que ses besoins tendaient à devenir des priorités. J'ai donc ouvert une boîte de nourriture pour chat, plongé en dedans une cuillère et l'ai versée … dans la théière. » (Reason, 2013, p.1)*

Cette scène de vie anecdotique constitue le point de départ d'une nouvelle ère dans la carrière de Reason. Dans les instants qui suivent cette mésaventure, il observe que rien dans son erreur n'est lié au *hasard* mais plutôt aux natures *routinières* et *similaires* des deux activités (le thé et le repas du chat). Il comprend également le rôle de la *concomitance* de ces deux activités (les miaulements du chat l'interrompent dans la préparation du thé). Rapidement, Reason émet deux hypothèses, (1) *l'action erronée* n'est pas aléatoire et dépend de la nature de l'activité et de son contexte et (2) l'étude des *erreurs* doit constituer une opportunité d'étudier, par déduction, le fonctionnement *normal* du cerveau.

[168] L'effet Coriolis naît de la combinaison d'un mouvement linéaire (celui d'un avion à réaction en vol, par exemple) et d'un mouvement rotatif (celui de la tête du pilote durant le vol). Cet effet trouble la perception des mouvements « réels » et peut induire une perturbation de l'orientation spatiale.

[169] Ce phénomène est notamment manifeste lorsque, situé dans un train et qu'une rame voisine démarre, le sujet pense que le train dans lequel il se trouve est en mouvement.

L'erreur humaine devient alors un sujet d'étude pour le psychologue et son nouveau thème de recherche. Ses premiers travaux s'inspirent des résultats de Nooteboom sur les erreurs de la parole (Nooteboom, 1980, cité par Reason, 1990b) mais également des travaux de Norman sur les types d'erreurs (Norman, 1981 ; Norman, 1980, 1983, cités par Reason, 1990b) et de Rasmussen sur la cognition (Rasmussen, 1983 ; Rasmussen, 1986). Avec une approche naturaliste[170], il entreprend de consigner dans un journal l'ensemble de ses erreurs quotidiennes et implique rapidement son épouse et ses étudiants en psychologie volontaires.

La *théorie de l'action* de Norman distingue deux types d'erreurs : les *ratés* (*slips*) et les *méprises*[171] (*mistakes*) qui sont liées à la mauvaise *planification* d'une action ou à une mauvaise décision (Norman, 1981). Reason va utiliser ce cadre théorique pour interpréter ses relevés d'erreurs quotidiennes, il va par la suite étendre et préciser la taxinomie de Norman.

A la fin des années 1970, Reason participe à deux ouvrages collectifs dans lesquels il rédige des chapitres consacrés aux erreurs: *skills and errors in everyday life* (Reason, 1977) et *actions not as planned : the price of automatization* (Reason, 1979). Reason applique la même méthodologie aux erreurs du quotidien qu'aux corrections de posture : étudier ce qui ne fonctionne pas pour expliquer ce qui fonctionne. Il écrit à ce sujet : « *slips of action can provide valuable information about the role of conscious attention in the guidance of highly routinized or habitual activities by indicating retrospectively those points at which the attentional mechanism was inappropriately deployed*. » (Reason, 1984)

Les données qu'il collecte et étudie sont essentiellement fondées sur (1) des carnets quotidiens et (2) des questionnaires. Les erreurs *quotidiennes* proviennent du détournement ou les baisses d'attention qui peuvent être induites par la complexité et le dynamisme de notre environnement. Au-delà d'une affinité personnelle de chercheur, la démarche empirique et naturaliste est justifiée par la *vulnérabilité des erreurs* aux *conditions expérimentales* des techniques d'investigation plus contrôlées ou intrusives. Pour Reason, les erreurs sont *impossibles à reproduire en laboratoire* (Reason & Mycielska, 1982).

Entre 1977 et 1987, il publie 17 articles qui portent sur les erreurs du quotidien (e.g. Reason, 1977, 1979, 1982), sur l'inattention (Reason, 1984) puis la *sous-spécification cognitive*[172]. Ce concept repose sur l'idée que les activités humaines, qu'elles soient routinières ou exceptionnelles, demandent des niveaux propres d'activité cérébrale (donc d'*activation*). Une action

[170] Après avoir recouru à la *psychologie expérimentale* pour ses recherches sur le mal des transports, Reason change radicalement de posture au profit de la *psychologie appliquée*: « *In my error collections, I didn't rely on experimental psychology—something I've always resisted: in order to do a sensible experiment in psychology, you have to try to control the related variables—and if you can do that, it can't be a very interesting experiment—yes, there's memory lists, perception etc. etc. And there are some brilliant experiments, but not many. If I had mentors, they would have been Darwin or William James, or Freud. I am by instinct a natural historian. I watch, collect, but rarely manipulate. I'm interested in the 'quotidienne', the everyday, banal events of everyday mental life.* » (Reason, 2015 ; correspondance personnelle).

[171] La traduction française du livre *Human Error* traduit « mistake » par « faute ». La traduction retenue ici sera « méprise » qui semble étiologiquement plus appropriée (*mis-take > mistake* ; *mal-prendre > méprise*) mais surtout moins porteuse de connotation en termes de « responsabilités » (« faute » évoquant « faute professionnelle »).

[172] Voir 2.1.1, la présentation de l'échelle SRK de Rasmussen.

correctement *spécifiée* est une action réalisée au bon degré d'*activation* par le cerveau (voir Rasmussen, 1983 ; Norman, 1981 ; Reason, 1990b).

1985 est une année fondamentale où s'opère le premier rapprochement entre le chercheur et le secteur *industriel* à travers un article intitulé : *Human factors principles relevant to the modelling of human errors in abnormal conditions of nuclear power plants and major hazardous installations* (Reason & Embrey, 1985). Cet article peut être considéré comme l'entrée de l'auteur dans le champ la *sécurité industrielle*, qu'il ne quittera plus. A partir de ce point, la carrière du psychologue va être marquée par la notion de « rencontre » (avec d'autres savoirs, d'autres domaines). Sur le plan académique, ce rapprochement entre *recherche* et *industrie* est accompagné par le développement de méthodes de prévention et de gestion de certains types d'erreurs comme l'omission (Reason, 1986, 1987a) : jusqu'alors théoriques et descriptives, les publications de Reason commencent à afficher une visée *pratique*.

A la fin des années 1980, Reason va combiner les apports théoriques de Norman (distinction entre ratés et méprises) et de Rasmussen (échelle SRK[173] modélisant trois niveaux d'activité du cerveau) pour proposer une nouvelle taxinomie des actes non-sûrs.

Classification des erreurs (1987 - 1990)

La classification des erreurs peut s'envisager sous des aspects *comportementaux*, *contextuels* ou *conceptuels*. Ces niveaux de classification correspondent approximativement aux questions « Quoi ? Où ? Comment ? » (Reason, 1990b). Le *niveau comportemental* permet de classer les erreurs en fonction de caractéristiques formelles de l'action (conséquences observables, caractéristiques de l'erreur : par action, omission, répétition…). Cette approche est cependant limitée, en effet, une même classe peut contenir des erreurs provenant de différents mécanismes causaux (voir Reason, 1984). Le *niveau contextuel* s'intéresse aux éléments de l'environnement local susceptibles de déclencher les erreurs mais il ne permet pas d'expliquer pourquoi deux situations identiques ne mènent pas systématiquement aux mêmes formes d'erreurs. D'une manière générale, Reason (Reason, 1990b) constate que le principal problème dans les enquêtes post-accident est la confusion existant entre l'erreur (l'acte) et ses conséquences (ses effets). A moins d'adopter un point de vue freudien et de considérer qu'une erreur et ses conséquences ont une « motivation inconsciente », il n'y a aucune raison de supposer un lien *psychologique* entre ces deux éléments. Le même type d'erreur (raté de l'action par inattention, par exemple) réalisé dans une cuisine ou dans un cockpit d'avion n'aura pas les mêmes conséquences. Les erreurs ayant des conséquences néfastes (*adverse consequences*) sont une sous-catégorie de l'ensemble des erreurs humaines qui se distingue par des circonstances contextuelles et non par des spécificités psychologiques. Reason s'intéresse alors à *l'approche conceptuelle*, basée sur les mécanismes cognitifs à l'origine de la production d'erreurs.

Il va alors trouver un cadre intéressant dans les travaux de Jens Rasmussen. En rapprochant le modèle SRK à la taxinomie des erreurs humaines sur laquelle il travaille, Reason propose un modèle générique de l'erreur (GEMS) qu'il publie dans un ouvrage collectif en 1987[174]. Ce modèle (Figure 25) est l'intégration des mécanismes de production des erreurs et des différents niveaux de contrôle

[173] *Skills, Rules, Knowledge* (SRK) signifiant *automatismes* (choix de traduction faisant foi), *règles*, *connaissances*.

[174] Dans un chapitre intitulé *Generic Error-Modelling System (GEMS): A cognitive Framework for Locating Common Human Error Forms* (Reason, 1987b).

cognitifs de Rasmussen. Un de ses apports principaux est de permettre la distinction entre les erreurs qui précèdent la détection d'un problème (les *ratés* et les *lapsus* qui surviennent au niveau des automatismes) de celles qui suivent la détection du problème (les *méprises* basées sur les règles ou sur les connaissances). En d'autres termes, entre les erreurs d'*exécution* et les erreurs de *planification* d'une action.

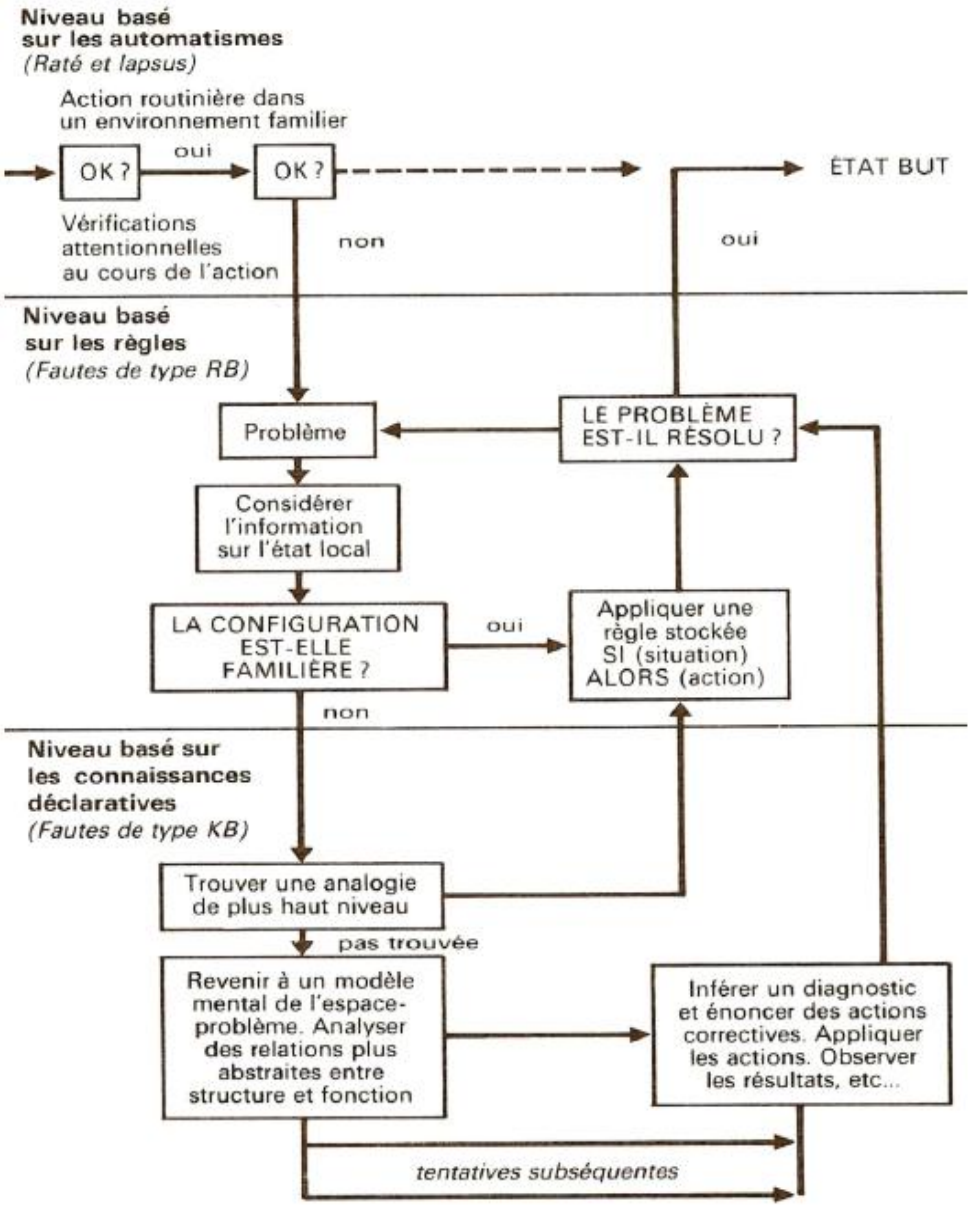

Figure 25 : Modèle GEMS (Generic Error Modelling System). Cette figure représente le traitement cognitif des problèmes. Les trois divisions horizontales correspondent aux trois niveaux de l'échelle SRK. A chaque niveau est associé un type d'erreur. RB signifie « Rule-Based », KB « Knowledge-Based » (adapté de Reason, 1990b).

Le modèle GEMS est un modèle conceptuel destiné aux psychologues cognitifs. Il relie d'une façon originale deux éléments préexistants : l'échelle S.R.K. et la classification des erreurs de Reason. Il est conçu dans l'une des périodes charnières qui nous intéressent : Reason travaille depuis dix ans sur les erreurs quotidiennes et entreprend l'écriture d'un livre destiné à ses pairs synthétisant ses avancées sur la question de l'erreur humaine.

Durant cette période, il propose une *définition de travail* de l'erreur comme « *a generic term to encompass all those occasions in which a planned sequence of mental or physical activities fails to achieve its intended outcome, and when these failures cannot be attributed to the intervention of some chance agency* » (Reason, 1990b, p.9). On pourra dès lors parler d'erreurs pour des actions *planifiées* qui n'atteignent pas l'*objectif désiré* (car elles ne se déroulent pas en accord au plan ou car le plan lui-même est inadéquat pour atteindre l'objectif).

Ces erreurs peuvent survenir soit lors de la planification, soit du stockage ou enfin de l'exécution de l'action. Reason identifie, sur cette base, différents types d'*actions erronées* (cf. Figure 26) :

- Les *ratés* (*slips*) de l'action et les *lapsus*[175] (*lapses*) verbaux. Ces deux types d'erreurs correspondent à un dysfonctionnement lors de l'exécution de l'action (ou du parler) et adviennent pour les activités au niveau de contrôle bas (niveau basé sur les automatismes, tâches routinières).
- Les *méprises* (*mistakes*) correspondent à un dysfonctionnement lors de la planification de l'action. Elles sont liées aux tâches nécessitant un niveau de contrôle plus élevé (niveau basé sur les règles ou les connaissances).
- Reste la distinction importante entre les erreurs et les « violations » (voir Reason, 1994). Une violation est une transgression volontaire d'une règle ou d'une procédure imposée. Les violations peuvent être le fait d'une habitude (souvent facilitée par la tolérance d'une organisation pour ces « ajustements »), d'une nécessité (matériel ou espace de travail inadapté, conflit entre les objectifs de sécurité et de production) ou, dans les cas extrêmes, représenter des actes de sabotage (violation avec intention de nuire).

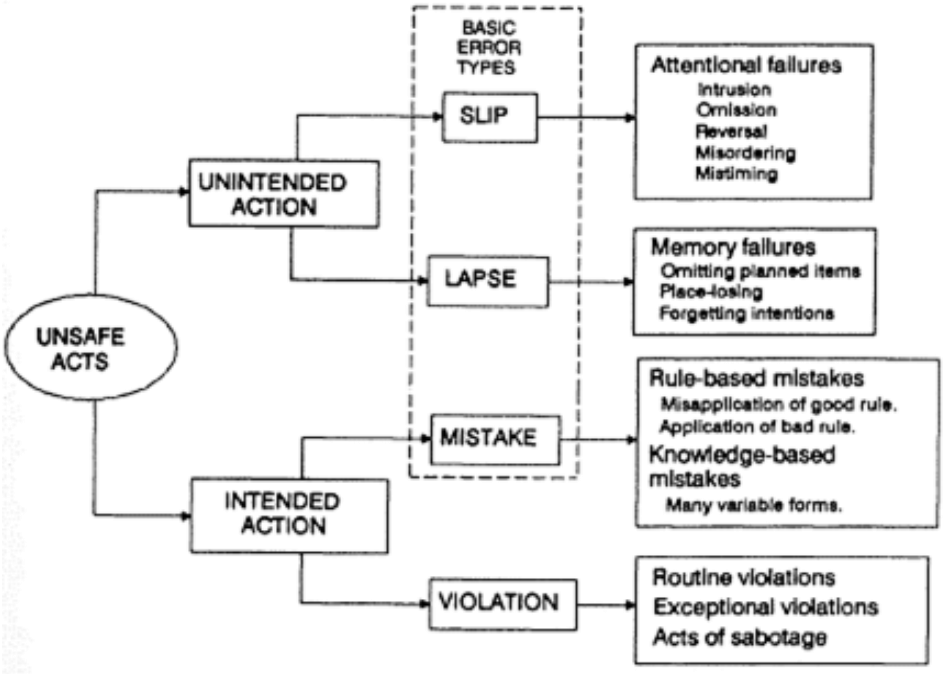

Figure 26 : Taxinomie de l'erreur humaine selon James Reason. La première distinction entre deux actes non sûrs est l'aspect volontaire (ou non) de l'action. Les distinctions suivantes dépendent du niveau de contrôle de l'activité. A chaque type d'erreur sont associés des facteurs explicatifs (à l'extrémité droite de l'arborescence) (Reason, 1990b).

[175] Dans un article publié en 2000, Reason *revisite* le *lapsus freudien.* Il y explicite la distinction qu'il entretient avec Freud par l'absence d'explication psychanalytique de l'*inconscient.*

Cette taxinomie de l'erreur synthétise donc dix années de recherche et l'un des apports principaux à la psychologie cognitive au début de la rédaction du livre *Human Error*. Cependant, au cours des trois années d'écriture du livre, un certain nombre d'évènements vont conduire Reason à dépasser les limites de la communauté de recherche en psychologie cognitive pour durablement marquer la gestion de la sécurité industrielle en proposant un autre modèle, celui des accidents organisationnels.

Création du modèle - La Pomme de Newton et le Fromage de Reason

La naissance du modèle peut-être située entre 1986 et 1988, lors de l'écriture de *Human Error* (Reason, 1990b). Deux évènements sont à l'origine de la création du modèle qui marquera en profondeur les disciplines de prévention et de management des risques. Le premier est le choix de réduire de façon significative la longueur du premier chapitre de l'ouvrage, consacré à l'histoire des études de l'erreur. Le deuxième est plus contextuel, il s'agit de l'importante série d'accidents industriels survenus à partir de la fin des années 1970 jusqu'à la fin des années 1980 qui sera qualifiée de *Safety culture decade.* Ces accidents éveillent un grand nombre de personnes sur les limites des modèles et des pratiques en place dans l'industrie et conduisent à remettre en cause l'explication des accidents uniquement centrée sur l'erreur de l'opérateur.

Reason décide alors de rédiger un septième chapitre entièrement dédié aux accidents industriels qu'il va qualifier d'accidents *organisationnels.* C'est dans ce chapitre qu'il va publier pour la première fois un modèle d'accident qui deviendra le vecteur d'un changement de paradigme dans la gestion de la sécurité. Tout comme la pomme que la légende fait chuter sur Newton, certaines théories semblent s'imposer à leurs créateurs. Dans le cas du SCM, la *pomme* prendrait la forme d'une *rencontre.*

Le renfort des ingénieurs

C'est en se rapprochant du monde industriel et en devenant progressivement familier avec la pensée des ingénieurs que Reason va développer les prémisses de sa *théorie des accidents organisationnels.* Notamment avec un ingénieur nucléaire rencontré au début des années 1980 : John Wreathall.

Rencontre à la croisée des chemins

John Wreathall étudie l'ingénierie nucléaire à l'Université de Lancaster, *undergraduate* en 1969 il obtient un *masters' degree* en *systems engineering* en 1971 après avoir notamment suivi un cours optionnel intitulé « *Systems Thinking, Systems Practice* » dispensé par Peter Checkland. Cette option confronte le jeune ingénieur aux facteurs humains et à la pensée systémique. De 1972 à 1974 il travaille sur un projet de design des sous-marins nucléaires britanniques ; ce qui lui permet d'accéder (via le ministère de la défense anglais) à des travaux de Swain sur les HRA, alors confidentiels. De 1976 à 1981, Wreathall travaille pour le CEGB (l'équivalent anglais d'EDF), comme *design reviewer* pour les systèmes de contrôle puis sur le rôle des facteurs humains dans la sûreté nucléaire. Son

expertise d'ingénieur dans le domaine des FH le conduit à participer aux conférences financées par les Nations-Unies et la Banque Mondiale entre 1977 et 1981 sur l'*erreur humaine*[176].

C'est à Bellagio que Reason et Wreathall font connaissance. Cette rencontre, fortuite, les amène à devenir (selon les termes de Wreathall) « *social friends* ». En effet, toujours selon Wreathall, la « *communion intellectuelle a été rapide avec Reason mais aussi avec d'autres chercheurs en vogue sur les questions de l'erreur humaine à l'époque (Swain, Neville, Norman, ...)* ».

La collaboration entre recherche et industrie

Reason et Wreathall correspondent et se rencontrent au gré des différentes conférences durant les années 1980. Les deux hommes trouvent des projets commerciaux dans lesquels ils s'emploient mutuellement en tant que *professional colleague*s, leurs clients sont alors d'importants groupes industriels tels que British Airways ou US NRC.

C'est aussi à cette période que Reason achève sa classification des actes non-sûrs et entame la rédaction d'un livre consacré à l'erreur humaine, destiné à ses pairs (psychologues cognitifs). Le contexte de *Safety Culture Decade* et le conseil d'un *reviewer* de réduire la taille du premier chapitre[177], vont amener Reason à ajouter un septième chapitre à son livre, consacré aux *accidents industriels*. Dès lors, le livre est aussi bien destiné à la communauté de recherche qu'à la communauté industrielle (qu'il fréquente via ses missions dans le cabinet de Wreathall). Le défi pour le psychologue est de pouvoir utiliser sa connaissance des erreurs humaines (et sa classification originale) pour rendre compte des accidents industriels. Pour cela, il va d'abord avoir recours à une métaphore : celle des *agents pathogènes.*

Un point de départ : la métaphore des agents pathogènes

Les analyses des principaux accidents[178] survenus entre 1979 et 1989 ont permis de comprendre que la performance (correcte ou erronée) des opérateurs de première ligne (*sharp end operators*) est étroitement liée aux conditions de travail (*local workplace conditions*). Les conditions de travail sont elles-mêmes conditionnées par des décisions stratégiques de haut niveau (hiérarchique). Comme Reason le rappelle (Reason, 1990b ; Reason *et al.*, 2006) ce constat n'était pas nouveau à la fin des années 1980. Deux sociologues Barry Turner et Charles Perrow avaient déjà posé de solides bases de réflexion sur la contribution humaine aux accidents industriels en décrivant les interactions complexes, au cœur des systèmes sociotechniques (Turner, 1978 ; Perrow, 1984).

Dans sa taxinomie de l'erreur humaine, Reason propose une distinction entre les erreurs actives et les erreurs dites latentes[179]. Pour démontrer leurs rôles respectifs, il s'appuie sur une métaphore :

[176] L'organisation de ces conférences est l'une des conséquences de la *Safety Culture Decade.* Le livre de Senders et Moray *Human Error* est la seule publication sur la conférence de Bellagio (1981) qui sera appelée « *first Human Error Clambake »*.

[177] Initialement consacré à l'histoire des recherches sur l'erreur depuis la philosophie antique. La version finale se résume à l'histoire des études contemporaines sur le sujet.

[178] Voir les pages 188 à 195 de *Human Error* (Reason, 1990b) pour de brèves descriptions des accidents et un ensemble de références vers des rapports d'enquête détaillés.

[179] Qui seront plus tard renommées « *conditions latentes* » sur les conseils de John Wreathall pour rendre compte du fait qu'une décision peut créer des *conditions latentes* dans le système bien qu'elle n'ait pas représenté une *erreur* à proprement parler au moment où elle a été prise ; entretien avec J. Wreathall du 10/10/2014.

celle des *agents pathogènes* présents dans le corps humain (Reason, 1988). Reason compare les accidents industriels à certaines maladies comme les cancers ou les accidents cardiaques. Les accidents ne sont pas le fruit d'une cause unique. Ils surviennent suite à la combinaison de plusieurs facteurs, chacun nécessaire mais non suffisant pour outrepasser les défenses (immunitaires dans le cas des maladies ; techniques, humaines et organisationnelles dans le cas des accidents industriels).

Filant la métaphore, Reason avance qu'il doit être possible de réaliser le *bilan de santé* d'une organisation en termes de sécurité. Lorsqu'un médecin réalise un diagnostic, il se base sur un nombre limité de paramètres (taux de globules blancs, rythme du cœur, tension artérielle…) : le diagnostic organisationnel pourrait lui aussi être établi sur un nombre limité de variables (Reason, 1988). Cette métaphore permet d'émettre un certain nombre d'hypothèses au sujet des accidents industriels (Reason, 1993a) :

- La probabilité d'un accident est proportionnelle au nombre d'agents pathogènes dans le système et son organisation.
- Plus le système est opaque et complexe plus il peut contenir d'agents pathogènes.
- Les systèmes plus simples et moins défendus peuvent être victimes d'un accident en présence de moins d'agents pathogènes que les systèmes complexes et bien défendus.
- Plus le niveau hiérarchique d'un individu est élevé dans une organisation plus son potentiel à générer des agents pathogènes est grand.
- Les *agents pathogènes* dans un système peuvent être détectés de façon proactive contrairement aux erreurs actives, difficilement prévisibles et souvent constatées de manière rétroactive). Cette prédictibilité implique donc l'intérêt d'orienter les démarches de gestion de la sécurité vers leur recherche et leur élimination.

L'analogie médicale est efficace mais elle comporte certaines limites. Dans toute analyse d'accident il est possible de trouver des *conditions latentes* (*agents pathogènes*), une fois la direction donnée, plus l'enquête cherchera loin, plus elle mettra en évidence des facteurs *profonds* (qui à l'extrême peuvent remonter à la *société* au sens large, son rapport à la production, son état de *santé* économique, etc.). L'apport significatif de la métaphore n'est donc pas de (dé)montrer l'existence de *conditions latentes* mais de suggérer que celles-ci doivent pouvoir être détectées et traitées de façon proactive. Elle ne doit donc pas être rapprochée du *déterminisme* de la théorie de l'*accident proneness*[180].

De la métaphore au modèle

Dans son cheminement intellectuel vers l'explication des accidents, Reason dispose donc d'une métaphore et d'une classification des actes non-sûrs. Il cherche alors un modèle capable de relier ces éléments, comme il a pu le faire très peu de temps avant avec le modèle GEMS. C'est à ce stade que l'ingénieur John Wreathall intervient.

> « *SCM was born at a pub close to where I lived and it was scrawled on paper napkins. Here is how I recollect the birth. John was staying with us, and I was wrestling with 'Human Error'. I was driven by the thought that in order to understand what went wrong, we should be able to say what ought to go right. That was when John started to draw overlapping planes—and I put in the holes. Voila!* » (Reason, 2015 ; correspondance personnelle).

[180] Voir 2.1.1.

Dans ce pub[181], John Wreathall représente le fonctionnement d'une organisation productive *type*. Ce modèle normatif repose sur cinq éléments présents dans tout système productif :

1) Des décideurs de niveau politique : les concepteurs et le haut management du système. Ils définissent les objectifs du système en fonction des données d'entrée du monde extérieur. Ils allouent les moyens (finances, équipement, ressources humaines, temps) en fonction de ces objectifs. Ils cherchent à maximiser la production (donc le profit) et le niveau de sécurité.
2) Une chaîne managériale chargée de gérer la production, spécialisée par départements (maintenance, formation, opérations…). Cette chaîne décline la stratégie des décideurs de niveau politique dans leurs sphères respectives.
3) Des pré-conditions : des opérateurs motivés, formés et entraînés ainsi que le renfort d'une technologie et d'équipements adéquats. A cela s'ajoutent la planification des activités, la maintenance, un guidage approprié du travail (procédures, modes opératoires), un ensemble de valeurs partagées (culture) garantes de l'équilibre productivité / sécurité.
4) Des activités productives : la synchronisation précise des opérateurs et des machines pour produire le bon produit au bon moment.
5) Des défenses : un ensemble de mesures de protections nécessaires quand le système opère dans des conditions à risque (industriel, naturel, etc.).

L'ensemble de ces éléments, articulé et hiérarchisé par Wreathall (Figure 27) permet à Reason d'adosser (et *opérationnaliser*) sa taxinomie et la métaphore médicale afin de décrire où et comment des défaillances s'articulent à différents niveaux organisationnels du système, conduisant à un évènement indésirable (Figure 28).

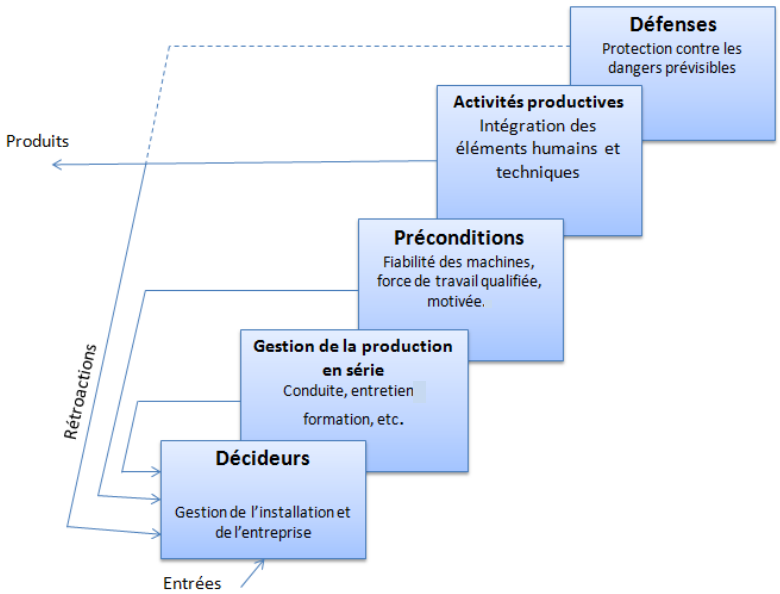

Figure 27 : Eléments basiques de production constituant les éléments invariants, nécessaires, de tout système productif (d'après Reason, 1990b).

[181] Le « Ram's Head » à Disley, Cheshire en Angleterre.

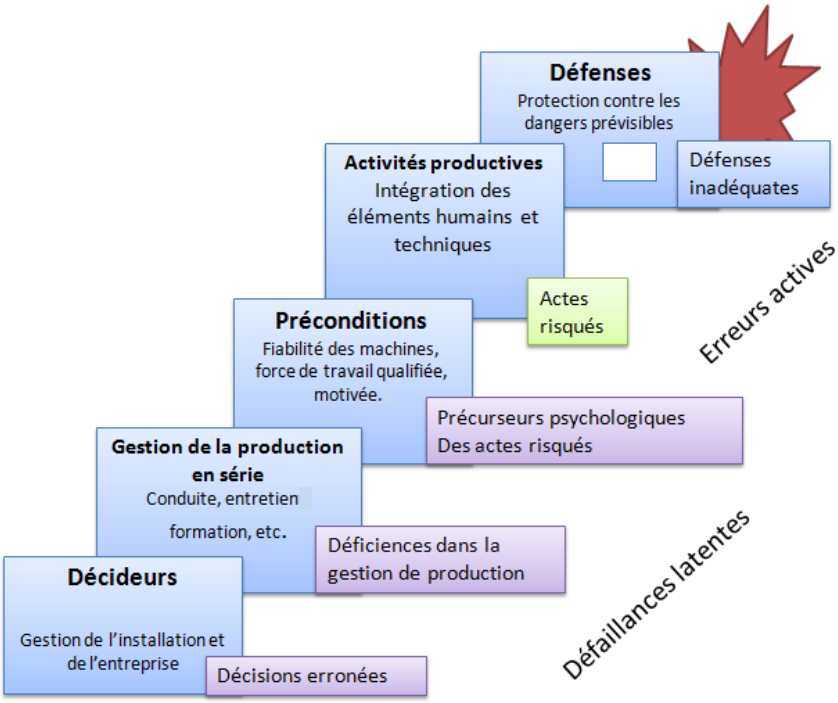

Figure 28 : Différentes sources de défaillances. La distinction est faite entre les erreurs actives et les défaillances latentes. Les faiblesses ou l'inadéquation des barrières (symbolisées par un trou), peuvent être le fait de défaillances latentes et/ou d'erreurs actives (d'après Reason, 1990b).

Dès sa genèse, le modèle évoque (au moins graphiquement) la *défense en profondeur* (DEP), un élément de doctrine de *sûreté nucléaire* introduit par Wreathall et son rattachement d'origine. La schématisation en plaques superposées évoque la notion de *lignes de défenses* qui assurent chacune un rôle indépendant dans la protection globale du système (INSAG, 1996). Une représentation alternative du modèle, également publiée dans *Human error* (Figure 29) porte explicitement un *label* « *defense in depth* » [182]. Au-delà de cette remarque sémantique, cette représentation alternative du modèle Mk I[183] appelle des remarques graphiques.

Le passage à l'horizontale et l'orientation choisie (de la gauche vers la droite, sens de lecture occidental) induisent une représentation chronologique et linéaire, renforcée par la présence d'une flèche, du phénomène accidentel. Ce schéma[184] nous renseigne également sur la représentation qu'a Reason des liens entre les dimensions *techniques, humaines* et *organisationnelles* des accidents. Dans le sens de lecture on trouve d'abord la dimension *organisationnelle,* faiblement intégrée, située en *amont* mais surtout en « dehors » du schéma (*latent failures at the managerial level*). Viennent ensuite deux plaques (*psychological precursors,* et *unsafe acts*) puis un ensemble (indifférencié) de plaques représentant les défenses physiques (*defense-in-depth*). Si la séparation graphique est

[182] Si la version anglaise fait apparaître « *defense-in-depth* », la traduction française de 1993 traduit « *défenses en série* ». Nous soulignons ce point pour soutenir l'importance (et la fragilité) de la démarche de recherche *indicielle.* Le changement (la perte) de sens occasionnée par cette traduction peut en effet se comprendre comme une illustration du *rôle* des acteurs sur la production (*trace*) écrite : si « *défense en profondeur* » est un *concept* pour l'ingénieur (qui ne dissociera pas l'agrégation de mots mais la comprendra comme une *unité de sens*), c'est un « *bloc de mots* » que traduit le psychologue universitaire Jean-Michel Hoc.
[183] Chaque évolution du modèle est identifiée par sa version via l'abréviation anglaise Mk (*Mark*).
[184] Nous choisissons ce terme pour soutenir qu'il s'agit de deux *schémas* (représentation) qui répondent d'une *théorie* identique, afin d'exclure l'ambigüité qu'aurait introduite *modèle* (situé dans un « entre deux »).

évidente (renforcée par l'opposition blanc / gris), l'agrégation des facteurs *organisationnels, humains* et *techniques* dans le même schéma témoigne de la volonté originelle d'intégration et d'articulation de ces éléments.

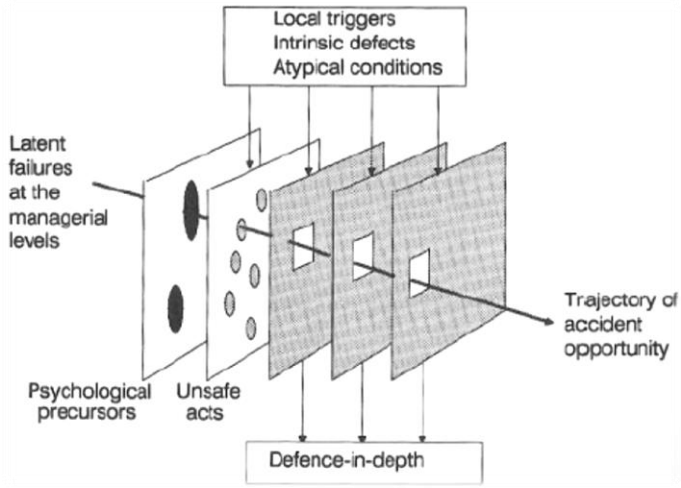

Figure 29 : Version alternative du modèle Mk I (Reason, 1990b). Dans cette représentation, l'accident est vu comme la combinaison complexe de (1) précurseurs psychologiques induits par ce qui sera nommé plus tard des « conditions latentes », auxquelles s'ajoutent (2) un ou des actes « non sûrs » et (3) une défaillance simultanée des barrières mises en places sur le système, articulée selon les concepts de la « défense en profondeur ».

2.2.2. Evolution des modèles d'accidents organisationnels, genèse du Swiss cheese model

Il est courant de parler « du » modèle de Reason en référence à l'ultime évolution de son modèle d'accident organisationnel qui représente les barrières par des tranches de fromages (d'où le nom *Swiss cheese*), cet usage est largement réducteur (Larouzée & Guarnieri, 2014c). En effet, entre le premier modèle publié en 1990 et la version *Swiss cheese*, de nombreuses évolutions du modèle ont été proposées mais également de nombreux autres modèles à côté de la « lignée ». Si certaines variantes ont été rapidement délaissées, toutes renseignent sur l'évolution de la pensée de l'auteur et sa TAO. Puisque le modèle *Swiss cheese* a été critiqué pour sa simplicité et son excessive généralité, il nous a semblé nécessaire de « revenir aux sources » et d'en étudier précisément la genèse.

Mark I : modéliser ce qui fonctionne pour en expliquer les défaillances

Le point de départ du premier MAO de Reason est une modélisation en cinq niveaux d'un système productif *type* « sain ». Les différentes implications humaines et organisationnelles à une défaillance du système, notamment ses défenses, conduisant à l'accident, intègrent la distinction centrale entre les *conditions latentes* (agents pathogènes dans le système) et les *erreurs actives* (erreurs commises par l'opérateur de première ligne). Reason met en avant une forme de percolation des décisions managériales vers les espaces de travail. Les premières portent sur des éléments d'organisation (formation, attribution de ressources, réduction des coûts, planification, maintenance) qui peuvent renforcer ou diminuer la probabilité de défaillances techniques ou humaines. En effet, ces décisions peuvent créer un environnement de travail favorisant les erreurs et/ou le non-respect des

procédures (violations) en générant des défauts d'approvisionnement en outils ou équipements (notamment de sécurité), augmenter la charge de travail, la pression temporelle, produire des procédures inappropriées ou inaccessibles, un manque de connaissances ou d'expérience. Cet environnement de travail va influencer les conditions de réalisation des activités (moral, fatigue, stress, ressources attentionnelles, etc.). Les décisions managériales peuvent également avoir des effets négatifs sur l'efficacité ou l'intégrité des défenses du système (mauvaise maintenance de la technique, absence d'entraînement des hommes, etc.). Cette théorie de l'accident deviendra un paradigme[185] des safety sciences dès le début des années 1990. Elle peut se résumer ainsi (Reason, 1990b ; Reason, 2005) :

- Des conséquences négatives (potentiellement imprévisibles au moment des décisions) de processus organisationnels créent des *défaillances latentes,*
- Celles-ci percolent (via les diverses structures organisationnelles, départements, services…) jusqu'à l'espace *physique* de travail où elles créent des *conditions locales* (sous-effectif, fatigue, problèmes techniques, manque de communication, objectifs contradictoires, etc.),
- Les *conditions locales* augmentent la probabilité que des *actes non sûrs* (les *erreurs actives*) soient commis. Normalement, ces *actes non sûrs* peuvent être *encaissés* (sinon *prévenus*) par les défenses du système (barrières techniques mais aussi humaines et organisationnelles). Ainsi, ils ne conduisent pas fatalement à l'accident.
- Or, les différentes barrières (dispositifs de sécurité, contrôles, normes et procédures) sont simultanément susceptibles d'être affaiblies par les *défaillances latentes* (phase d'incubation) autant que par les *erreurs actives*.

La TAO postule donc que l'évènement indésirable est le fait d'une combinaison complexe de *conditions.* Certaines *latentes* sont présentes en *amont* dans le système et sont le fait de décisions ou d'actions plus ou moins *éloignées* (dans le temps et l'espace) de l'accident. Ce dernier peut survenir si une *erreur active* se combine avec ces *conditions latentes*.

Le modèle, de par sa représentation graphique qui suggère la chronologie (voire la *causalité*) des dites combinaisons pourrait, lui, inciter à déplacer le *blâme,* des opérateurs vers les managers des systèmes. Dès 1990, Reason met en garde contre cette interpretation : « *this is not a question of allocating blame, but simply a recognition of the fact that even in the best-run organizations a significant number of influential decisions will subsequently prove to be mistaken* » (Reason, 1990a ; p. 203). Il précise à cet effet que l'attribution d'un blâme, bien que souvent satisfaisante *émotionnellement*, ne s'avère que très rarement être une mesure corrective efficace. Les différents acteurs (encadrement ou opérateurs) ne choisissent pas de *commettre des erreurs*, Reason suggère qu'ils sont plutôt les *héritiers* de dispositions organisationnelles particulières. Attribuer le blâme à l'opérateur reviendrait à *tuer un moustique* plutôt que de chercher à éliminer le nid : un autre opérateur viendra et subira les mêmes effets de son environnement, le *poussant* à commettre le même type d'erreurs. Attribuer le blâme au *management* n'est guère plus efficient car, comme l'a montré Charles Perrow (1984), tout système est inclus dans un *écosystème* plus large, donc les

[185] En se référant au seul modèle, le paradigme introduit par Reason pourrait être qualifié de « paradigme de l'accident organisationnel ». En faisant référence à l'ensemble des travaux de Reason, le paradigme serait celui de « l'approche système » (qui s'oppose à l'approche selon laquelle l'erreur de l'opérateur est considérée comme cause première d'un accident).

décisions managériales sont elles-mêmes façonnées par des contingences économiques, politiques et financières[186].

Malgré ses mises en garde, Reason constate que son MAO provoque, en pratique, le déplacement du *blâme* vers les sphères managériales: « *despite my original protestations that this was not a way of shifting blame from the 'sharp end' to the board room, it still looks very much like it* » (Reason, 2008). Un fait intéressant nous semble émerger : la force du schéma sur le discours. La théorie est sans équivoque, l'accident est le fait d'une interaction complexe entre composants *techniques* et *humains* du système qui doit se comprendre en lien entre l'organisation du travail, son cadre de réalisation, l'environnement du système et la cognition de l'opérateur. Le modèle, lui, induit un *biais de représentation causale,* essentiellement en raison de ses choix graphiques (flèche, disposition des éléments, orientation spatiale). Malgré une alerte explicite dans la *notice* du modèle, les *usages* cèdent à ce biais et s'orientent vers la recherche « *toujours plus loin* » des causes profondes.

Afin de contrôler les effets produits par son MAO, Reason en publie rapidement une nouvelle version. Celle-ci détaille davantage les différentes contributions humaines et organisationnelles aux accidents.

Mark II : une représentation moins figurative et plus directive

La Mark II du MAO (cf. Figure 30) apparaît en 1993 dans un ouvrage collectif (Reason, 1993b). Si elle est toujours horizontale et orientée de gauche à droite, elle insiste sur la diffusion des conditions latentes au sein d'une organisation.

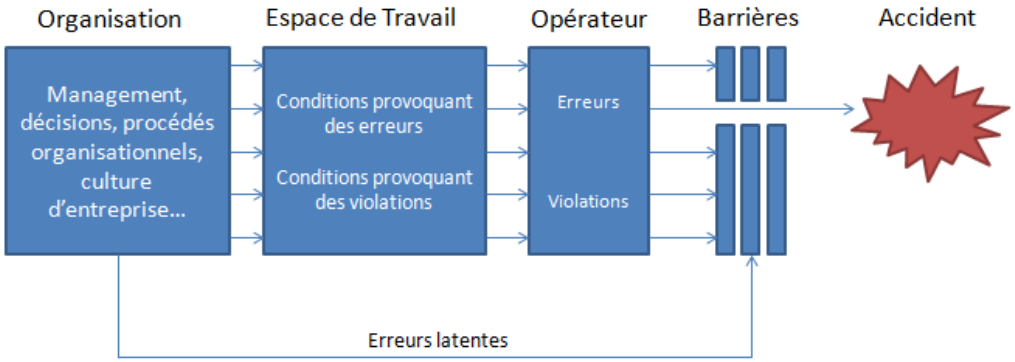

Figure 30 : Modèle Mk II de l'accident organisationnel. Ce modèle suggère que les barrières d'un système peuvent être affectées directement par les décisions managériales (chemin du bas). Cependant ces décisions peuvent également se diffuser dans l'organisation (chemins du haut), créant dans les espaces de travail les précurseurs aux erreurs ou violations (erreurs actives) des opérateurs. (D'après Reason, 1993b).

Cette version est moins figurative et présente des liens logiques entre des blocs de texte (sans représentation symbolique), la multiplicité des flèches (par rapport au « chemin unique » de 1990) soutient l'idée que la percolation des conditions latentes et les erreurs actives ne conduisent à l'accident qu'en cas de défaillances des barrières. Les éléments (plaques) « *gestion de la production* » et « *précurseurs psychologiques* » (distincts dans le Mark I) sont regroupés en un unique bloc nommé « *espace de travail* », qui se rapporte aux conditions locales pouvant impacter l'opérateur. Si on se

[186] Phénomènes notamment observés dans les différents accidents de barrages présentés dans le premier chapitre.

réfère à la seconde représentation du Mark I, la frontière entre *psychologique* et *technique* est désormais estompée. Une autre évolution notable est l'introduction d'un chemin séparé (flèche du bas) qui souligne l'influence directe que peuvent avoir les décisions managériales sur l'intégrité des barrières du système et donc l'accident. Ce chemin rend compte du fait que certains accidents (comme l'incendie de King's Cross ou l'explosion de Challenger) surviennent sans erreur active par la seule présence d'agents pathogènes dans le système. « *Unsafe acts at the sharp end are not essential –though common- for creating defensive gaps and weaknesses, as is evident from the King's Cross Underground fire, for example* » (Reason, 2008, p. 99). Une séparation conceptuelle entre les *erreurs* et les *violations*[187] apparaît également. Ces évolutions sont motivées par une augmentation des préoccupations *opérationnelles* de Reason et une connaissance croissante du milieu industriel. En effet, dès la publication d'*Human error* le psychologue multiplie les travaux industriels avec notamment le développement, financé par Shell, de la méthode Tripod (Reason *et al.*, 1989 ; Hudson *et al.,* 1994). Le bloc « organisation » est détaillé[188] grâce à l'appropriation de l'expérience industrielle et des attentes des opérationnelles par le chercheur et le modèle indique désormais la nécessaire prise en compte de l'influence de la *culture d'entreprise* et des *procédés organisationnels* (maintenance, management, planification, etc.).

Variantes de la Mark II : un modèle en avance sur son temps ?

Comme c'est le cas pour la Mark I, il existe des variantes de la Mark II. On peut mentionner une version (cf. Figure 31) liée à la méthode Tripod qui indique les *General Failures Types* (indicateurs de cette méthode).

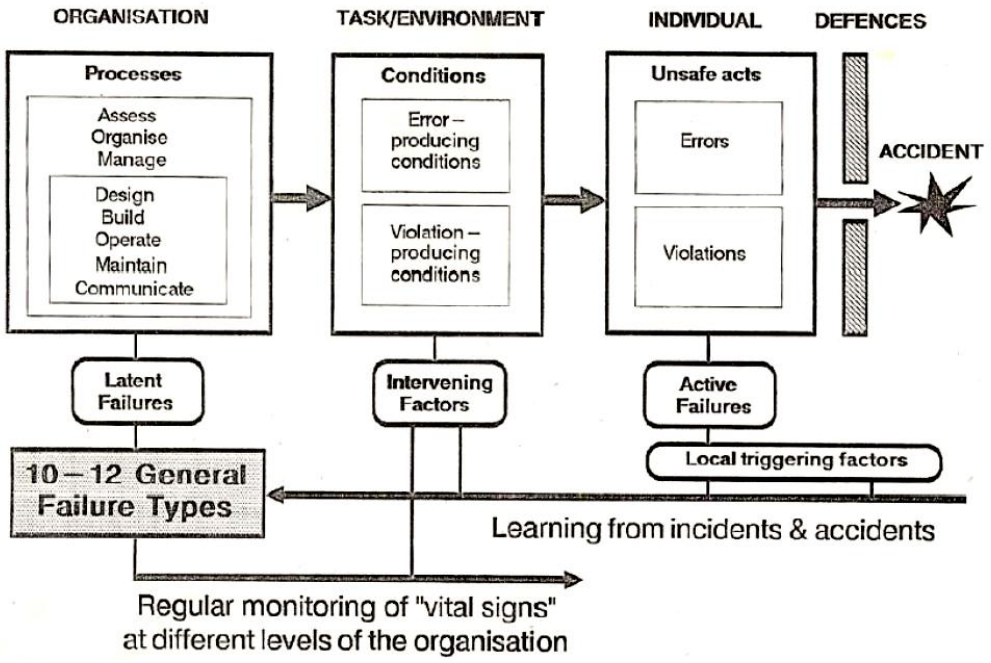

Figure 31 : Version alternative du Modèle Mk II. Cette version intègre les General Failures Types (GFTs) de la méthode TRIPOD (Reason et al., 1989).

[187] Reason attribue la *parenté* de cette distinction à Jerry Williams (Williams, 1996 ; cité par Reason, 2006).
[188] Il se résumait dans la seconde représentation du Mark I à l'inscription (pratiquement *hors cadre*) : « *latent failures at the managerial levels* ».

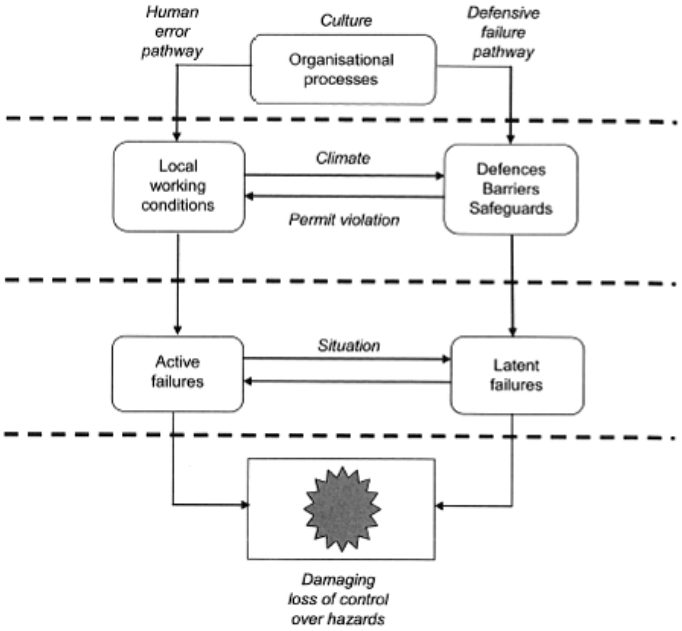

Figure 32 : Autre version alternative du Modèle Mk II. Cette représentation soutient l'aspect systémique de l'OAT en adoptant une orientation verticale et en représentant l'accident comme la perte de contrôle sur les risques (hazards). Elle introduit deux chemins distincts pour les défaillances ainsi que la distinction entre culture et climat. Enfin, les doubles flèches horizontales indiquent les rétroactions existant entre les facteurs locaux et organisationnels, humains et techniques. (Morino, Reason, et al. 1995).

Une autre variante (Figure 32 ; Morino, Reason, *et al.,* 1995), rapidement oubliée, présente deux chemins distincts de défaillance, (1) celui de l'erreur humaine et (2) celui des défaillances des barrières. La trajectoire accidentelle est ici *verticale* et la notion de climat (*climate*) fait son apparition et se distingue de la *culture.* Le *climat* est spécifique aux espaces locaux de travail et peut changer relativement rapidement. La culture est influencée par les décisions des services de direction de l'organisation et possède une *inertie* plus forte. Ainsi, le *climat* est impacté à la fois par les facteurs culturels verticaux et par des facteurs de contexte local (arrivée d'un nouvel outil, d'un nouveau chef d'équipe). L'existence de cette représentation et sa méconnaissance interpellent.

Pour paraphraser John Austin (« *Quand dire, c'est faire* », 1970), on pourrait avancer que « *dessiner, c'est faire* ». Nous avons affirmé que les choix de représentation (*schémas*) utilisés pour assembler et articuler des concepts (*modèle*), induisent de façon subtile des usages (ou, *a minima*, produisent des effets puisqu'ils contribuent au *sens* et aux *représentations*). Il est intéressant de comparer les Figure 30 et Figure 32, en nous intéressant aux effets que produisent les choix graphiques ces deux MAO liés à la TAO de James Reason.

La représentation verticale (Figure 32) présente l'accident comme émergeant des interactions entre différents composants d'un système : processus organisationnels, espaces locaux de travail, défenses, actes risqués, conditions latentes. Sur le plan *sémantique* « l'accident » est qualifié de « *perte de contrôle sur les risques engendrant des dommages* » (l'utilisation du terme *contrôle* traduit une posture fondamentalement systémique ; Hardy & Guarnieri, 2012). Sur le plan *symbolique*, les flèches réciproques (ex : *Climate / Permit violation*) traduisent la notion de rétroaction également fondamentale dans l'approche systémique. Enfin, l'orientation verticale n'induit pas de notion de

causalité mais soutiendrait une vision *structuraliste* hiérarchisant les relations entre les *niveaux* d'une organisation modélisée de façon *normative* (Reason *et al.,* 2006). La représentation horizontale, antérieure de deux ans (Figure 30), donne à voir l'accident d'une façon différente sur le plan *symbolique* bien qu'elle soit concordante sur le plan *sémantique*. Son orientation couplée au sens de lecture de la gauche vers la droite[189] induit un biais de représentation causale. En utilisant le sens de lecture classique, le modèle évoque la *frise chronologique*. On notera également le déséquilibre entre les informations que ces deux modèles fournissent sur l'« *human error pathway* » et le « *defensive failure pathway* ». Ce dernier, situé à droite sur la représentation de 1995 comporte autant de précisions que le « *human error pathway* » mais, situé en bas sur celle de 1993 il ne comporte aucune indication autre que son nom. Ce déséquilibre évoque une attention plus importante portée aux facteurs humains qu'aux contingences systémiques. Ces choix de schématisation soutiennent une lecture *causale, déterministe, linéaire, réductrice,* de la théorie de l'accident organisationnel. Formulé autrement, si la théorie s'est affinée sans rupture conceptuelle, on note entre 1993 et 1995 un passage d'une modélisation *linéaire* à une modélisation *systémique.* Cette dernière aurait pu être délaissée car trop « en avance » sur les pratiques de son temps.

Les choix *sémantiques* (éléments de langage employés) et *symboliques* (choix graphiques et logiques) dans le dessin d'un *schéma* sont donc de première importance. Bien que microscopiques, ces considérations ne doivent pas être négligées. Elles ont des implications macroscopiques puisque le *schéma* sert à communiquer le *modèle*[190] ; un *modèle* est l'articulation de *concepts*, eux-mêmes éléments constituant les *théories*. Modifier le *schéma* c'est modifier la compréhension de la *théorie.*

Mark III : changement d'orientation et retour de la symbolique

En 1997, Reason publie un livre intitulé *Managing the Risks of Organizational Accidents* (Reason, 1997). Contrairement à *Human error,* cet ouvrage est essentiellement destiné aux professionnels chargés de gestion de la sécurité (*practicionner*). En couverture, l'ouvrage présente une nouvelle version (Figure 33) du modèle d'*accident organisationnel* guidé par trois questions (quoi, comment, pour quoi ?) à même d'orienter autant la communication, l'analyse que la prévention des accidents.

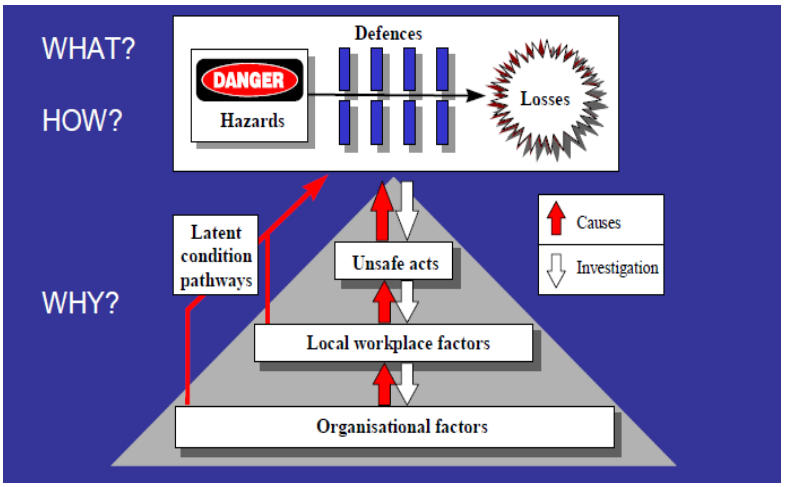

Figure 33 : Modèle Mk III. Présente trois éléments basiques d'un accident (danger, défenses et pertes) et les facteurs de risques pouvant conduire à l'accident en altérant les défenses du système. (Reason, 1997).

[189] Ce qui, fait intéressant, n'est pas le cas de la version de 2000 (version « tranches de fromage ») qui a une lecture horizontale mais de la droite vers la gauche !

[190] Ce n'est pas le cas des modèles purement logiques des mathématiques par exemple.

« It started with the premise that any model of accident causation must have three basic elements: hazards, defences and losses » (Reason et al., 2006). Ces trois éléments sont donc représentés dans la partie haute du modèle : un danger (ou des risques), des défenses (dont les défaillantes sont représentées par des trous) et des pertes (humaines, matérielles, temporelles ou financières). L'ensemble des barrières, défenses, contrôles, est indifférencié, c'est un choix voulu *intégrateur* (non discriminant) : « *it is often very hard to distinguish productive and protective system elements. Many sub-systems serve both goals (e.g. pilots, ATCOs*[191]*, train drivers, etc.).* » (*op. cit.*). La zone triangulaire explicite les facteurs pouvant altérer l'intégrité des défenses, ils sont répartis en trois catégories en fonction de leur éloignement de l'accident (dans le temps et l'espace) et de leur *quantité* dans le système. On retrouve la distinction fondamentale entre erreurs actives et défaillances latentes. La dynamique temporelle de l'accident est toujours délicate, sinon impossible, à représenter graphiquement. Dans la *notice* du modèle, Reason (1997) précise : « *Short-term breaches may be created by the errors and violations of front-line operators. Longer-lasting and more dangerous gaps are created by the decisions of designers, builders, procedure writers, top-level managers and maintainers.* »

Sur le plan lexical, le terme « *conditions latentes* » (Reason, 1997) apparaît en substitution de « *défaillances latentes* » (Reason, 1990a) ou de d'« *erreurs latentes* » (Reason, 1993b). Si toute décision managériale peut produire des effets sur le système à même de se combiner un jour avec des *facteurs locaux* et des *actes non-sûrs*, ces décisions ne sont pas nécessairement des *erreurs* ou des *défaillances* au moment où elles sont prises. En analysant l'accident, l'enquête profonde permettra de remonter jusqu'à elles, mais indiquera aussi souvent qu'elles ont été *nécessaires* et non *suffisantes* à causer l'accident. Considérant les remarques de Wreathall, Reason les qualifie de *conditions* et indique : « *A condition is not a cause, but it is necessary for a causal factor to have an impact. Oxygen is a necessary condition for fire; but its cause is a source of ignition. The use of this term allows us to acknowledge that all top-level decisions seed pathogens into the system, and they need not be mistaken. The existence of latent conditions is a universal in all organisations, regardless of their accident record.* » (*op. cit.*).

Après la publication du livre et du modèle (1997), Reason travaille et publie essentiellement autour de la « *culture de sécurité* », des activités de maintenance dans l'aéronautique ou encore sur les petits collectifs au travail. En 2000, il s'éloigne du champ *industriel* (sans réellement le *quitter*) pour entamer des travaux consacrés à la réduction des risques en milieu hospitalier. Ce changement de secteur va l'amener à publier une ultime version de son modèle d'accident.

De l'erreur humaine au fromage suisse

En 2000, Reason publie dans le prestigieux British Medical Journal (BMJ) un article intitulé « *Human error: models and management* » (Reason, 2000b). Cet article, premier d'une série consacrée à ses travaux sur le facteur humain dans le milieu médical résume pour les professionnels d'un secteur moins *éduqué* que celui des *industries à risques*, plusieurs notions et concepts relatifs à l'erreur humaine. Afin de s'adresser à ce *nouveau public,* Reason souhaite publier une nouvelle version de son modèle d'accidents. Il exploite alors l'analogie suggérée dès 1992 par Rob Lee[192] : représenter les

[191] Air Traffic Controlers, les contrôleurs aériens.

[192] Lorsqu'il était directeur du Bureau of Air Safety Investigation (BASI) à Canberra (Reason *et al.,* 2006 ; Patrick Hudson, 2015, correspondance personnelle).

barrières défaillantes d'un système comme des tranches de fromage (idée inspirée par les trous circulaires dans les premières plaques de la seconde représentation du Mk I[193]). L'article présente donc ce qui sera l'ultime évolution de son modèle d'accidents (Figure 34) et qui lui valut l'appellation Swiss *cheese model*.

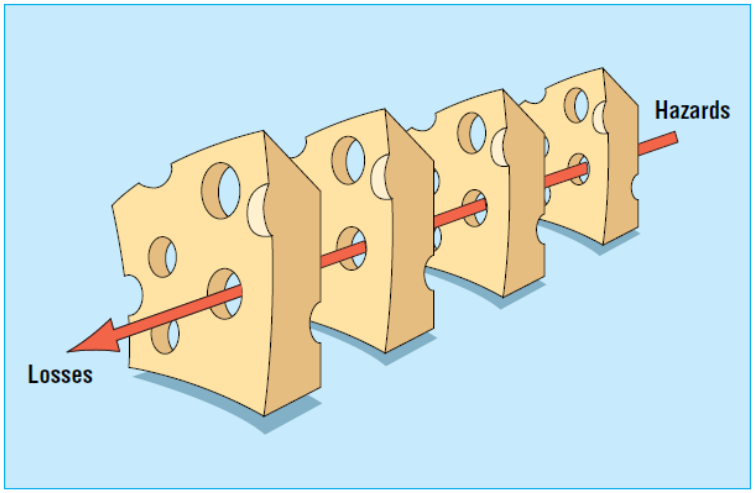

Figure 34 : Le modèle d'accident organisationnel tel que présenté dans l'article BMJ par Reason. Le texte explique la distinction entre erreurs actives et conditions latentes. La représentation graphique, elle, est uniquement produite à des fins heuristiques et ne fait apparaître aucun label (Reason, 2000b).

Chaque *tranche* de fromage représente une défense du système. Les trous représentent les faiblesses ou défaillances de ces défenses créées par des *conditions latentes* et/ou des *actes non sûrs*. En raison de sa puissance heuristique, l'analogie génère un fort *biais de représentation*, de façon contre intuitive, il faut considérer les trous *dynamiques*. En effet, leurs *tailles* et *localisations* évoluent dans le temps (au grè des arbitrages, audits, maintenances, erreurs humaines, etc.). L'accident est rendu possible par l'alignement des trous dans les défenses.

Pour Reason, cette approche de l'accident et du rôle de l'erreur humaine est une approche systémique. Elle se différencie de l'approche individuelle en s'intéressant à l'ensemble des composants d'un système constituant des défenses de celui-ci :

> « *Defences, barriers, and safeguards occupy a key position in the system approach. High technology systems have many defensive layers: some are engineered (alarms, physical barriers, automatic shutdowns, etc), others rely on people (surgeons, anaesthetists, pilots, control room operators, etc), and yet others depend on procedures and administrative controls. Their function is to protect potential victims and assets from local hazards. Mostly they do this very effectively, but there are always weaknesses.* » (Reason, 2000b).

La simplicité de la représentation du MAO « *Swiss cheese* » a donc été rendue possible par une lente évolution de la pensée de son auteur. Dix années consacrées à étudier l'erreur puis dix autres à travailler sur la sécurité des systèmes, des apports d'autres domaines, d'autres disciplines, ont permis à Reason de proposer cette figure dépouillée de « toute science » et capable de marquer les esprits avec une telle force qu'elle a modifé durabement les pratiques. Nous sommes revenus sur les

[193] Entretien avec James Reason, 7 janvier 2014.

évolutions de la TAO à travers les différents MAO publiés par Reason, la Figure 35 propose une synthèse de cette *histoire*. Ce qui *est* n'est pas toujours immédiatement *visible.*

La représentation *Swiss cheese* des travaux de Reason est, sans conteste, le MAO le plus populaire. Ce modèle permet de communiquer simplement des idées complexes. Il va donc significativement contribuer à répandre le paradigme de l'*accident organisationnel* dans de très nombreux secteurs d'activités. En revanche, sa simplicité laisse une large place à l'interprétation de l'utilisateur, ce qui sera bientôt critiqué. Les usages et le temps ont *réduit* les travaux de Reason au SCM (à l'exclusion de ses nombreux autres MAO ou modèles cognitifs d'erreur humaine). Afin de réhabiliter ses autres travaux et de resituer le SCM dans un ensemble cohérent, il nous apparaît opportun de parler, non pas « du » mais « des » modèles de Reason.

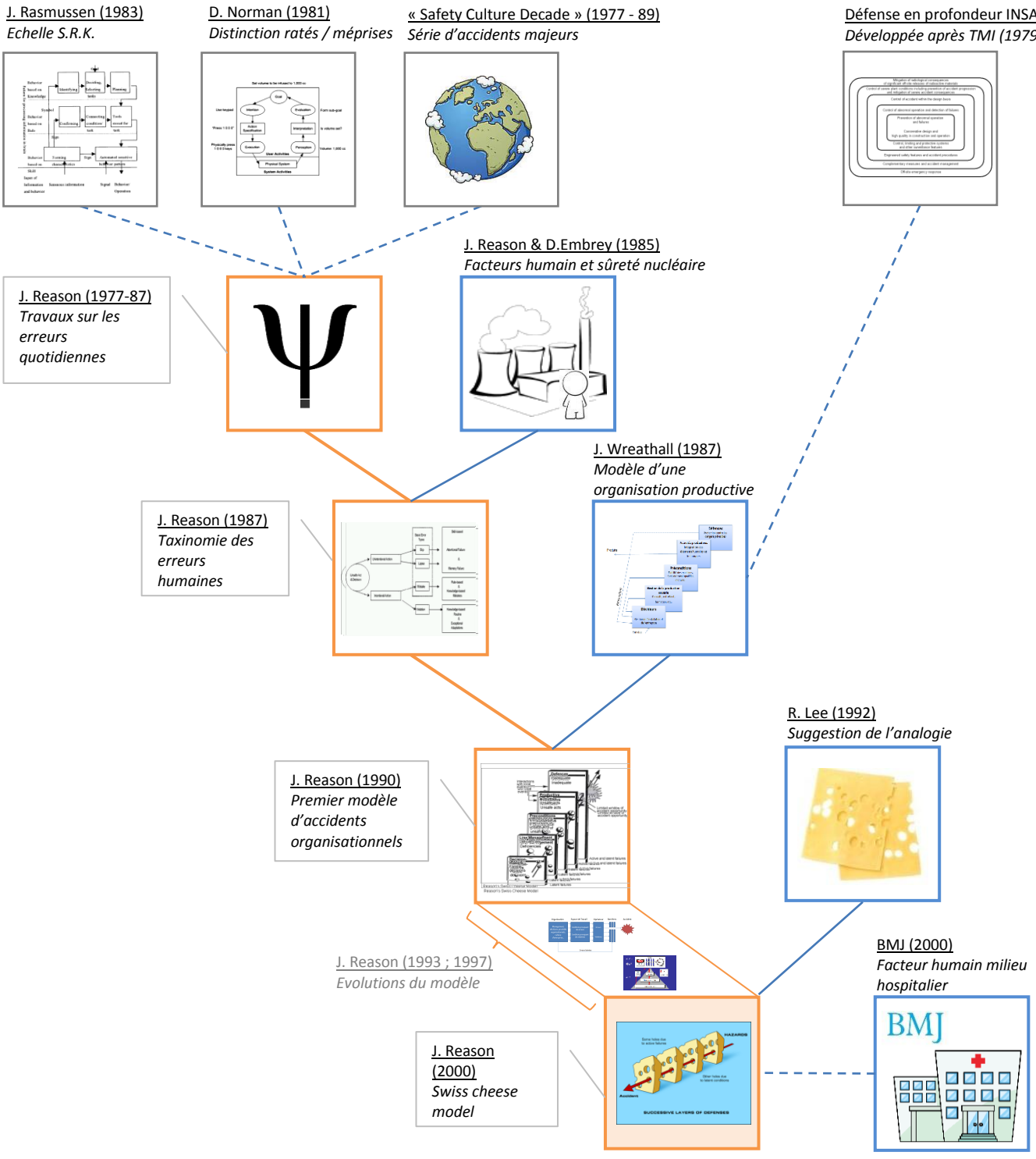

Figure 35 : Genèse du SCM. Présentation des principales collaborations et influences dans la conception du modèle paradigmatique d'accident organisationnel de James Reason (en orange, le « chemin direct » ; en bleu les influences et contributions).

2.2.3. Vers une « théorie unifiée » de l'accident organisationnel

Nous avons suggéré ailleurs (Larouzée & Guarnieri, 2014c) qu'il serait plus approprié de parler *des modèles* plutôt que *du modèle* de Reason. On pourrait rétorquer à cela que les différentes évolutions que nous avons présentées jusqu'alors, puisqu'elles se rapportent à la même TAO, peuvent toutes être indifféremment qualifiées de « modèle de Reason ».

Cette facilité d'usage comporte plusieurs limites. Considérer tous les MAO égaux ne permet pas, comme nous venons de le faire, de rendre compte de l'évolution de la TAO, progressivement façonnée par Reason[194]. Or, nous avons établi (2.1.2) qu'un *modèle* ne devrait pas être dissocié de la *théorie* à laquelle il est lié. Deuxièmement, en avançant que « *dessiner, c'est faire* » et mettant en évidence certains effets produits par les choix graphiques, symboliques ou sémantiques des modèles, nous soutenons qu'il serait incorrect de considérer tous les MAO publiés par Reason entre 1990 et 2000 équivalents. Enfin, le(s) modèle(s) d'accidents organisationnels ont été épaulés par de nombreux autres modèles (moins connus). Pour montrer comme ces « *autres* modèles de Reason », s'ils ne sont pas dans la *lignée directe* des MAO, en sont les parents ; nous en présentons trois qui une fois articulés, permettent de reconstruire la vue d'ensemble (« *the big picture* ») de la TAO de Reason.

Modèle d'arbitrages managériaux entre protection et production (1990)

La Figure 36 présente le contexte dans lequel les décisions managériales sont construites. Selon Reason (1990b) « *all organizations have to allocate resources to two distinct goals: production and safety. In the long term, these are clearly compatible goals. But, given that all resources are finite, there are likely to be many occasions on which there are short-term conflicts of interest.* » Ainsi, les ressources allouées aux objectifs de production peuvent réduire celles disponibles pour la sécurité. Le modèle présente les arbitrages managériaux comme responsables du (dés)équilibre *délicat* entre ces objectifs.

Certains facteurs peuvent expliquer que la balance ne soit pas toujours optimale. (1) Les résultats produits par l'allocation de ressources à la production sont relativement tangibles, estimables ce qui n'est pas vrai (au moins à court-terme) pour les effets des ressources allouées à la sécurité[195]. (2) Les *rétroactions* obtenues par les efforts dirigés vers la production sont souvent rapides, non ambiguës et encourageantes ; à l'inverse, celles produites par les efforts de sécurité sont souvent négatives, contraignantes et intermittentes sauf dans les cas (heureusement rares) d'accidents majeurs. En conséquence « p*roduction feedback will, except* [after a major accident] *always speak louder than safety feedback.* » (*op. cit.*) ce qui rend le management de la sécurité par une *direction* extrêmement difficile. Enfin, le modèle présente (dans sa partie basse) des *filtres défensifs* représentant la perception possiblement *biaisée* des indicateurs (de performance et de sécurité) par les décideurs.

[194] Et d'autres auteurs qui ont influencé sa compréhension de l'accident (Turner, Perrow, Norman, Hollnagel, Woods, etc.)

[195] Reason explique ce fait par l'importance de facteurs aléatoires dans la causalité des accidents.

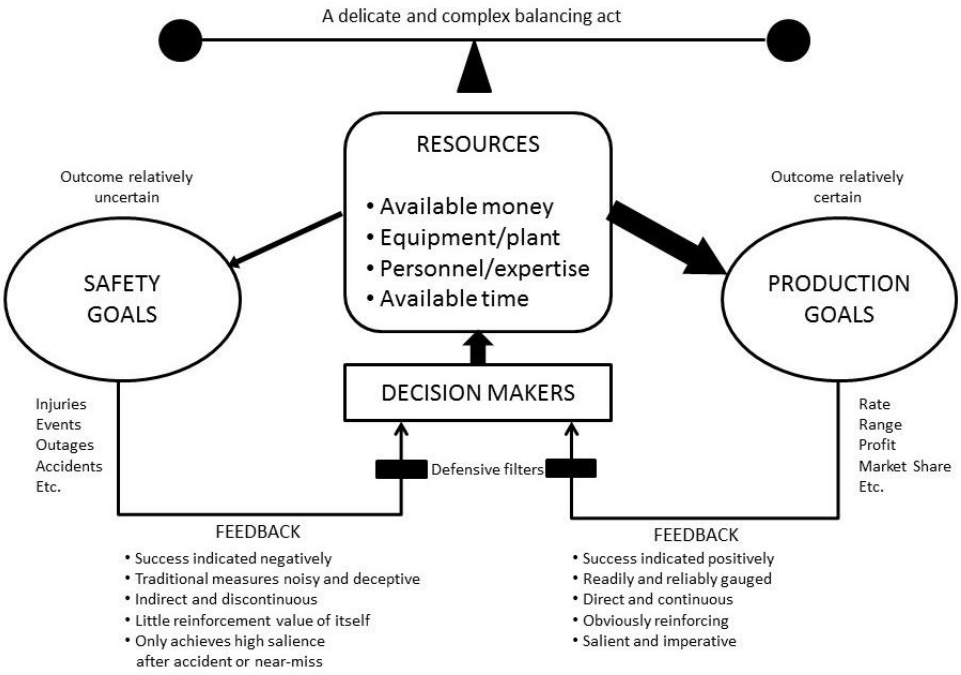

Figure 36 : La balance entre production et protection expliquée à travers les facteurs influençant les décisions du haut management d'une organisation (Reason, 1990b).

Modèle de l'évolution d'une organisation dans l'espace « production – protection » (1997)

En 1997, dans le livre *Managing the risks of organizational accidents*, Reason propose une autre illustration (Figure 37) des effets d'un déséquilibre entre les objectifs de production (horizontalement) et de production (verticalement). Deux manifestations *extrêmes* sont la catastrophe et la banqueroute.

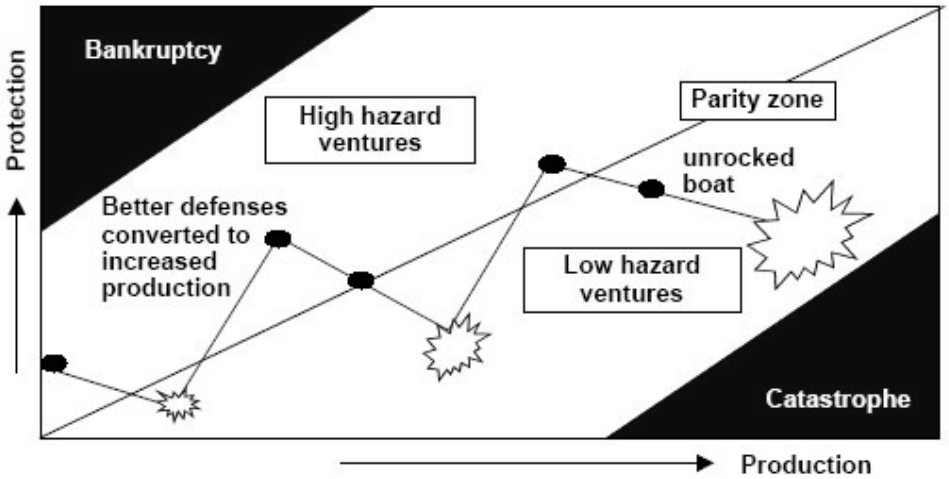

Figure 37 : « Itinéraire » d'une organisation hypothétique dans l'espace « production - protection » (Reason, 1997).

« *The history starts towards the bottom left-hand corner of the space where the organization begins production with a reasonable safety margin. As time passes, the safety margin is gradually diminished until a low-cost accident occurs. The event leads to an improvement in protection, but this is then traded off for productive advantage until another, more serious, accident occurs. Again, the level of protection is increased, but this is gradually eroded by an event-free period. The life history ends with a catastrophe.* » (*op. cit.*, p. 5).

L'ouvrage de 1997 a été pensé comme un « *guide pratique* » à l'attention des professionnels en gestion de la sécurité. Il présente ce récit (fictif) et son *modèle* dès l'introduction. Il est intéressant de comparer la place de ce « modèle » dans l'œuvre de 1990, *Human error* (où il était un résultat du septième chapitre) et celle de 1997 où il accède au statut de prémisse. On note aussi que le modèle détaillé (Figure 36) est devenu une représentation heuristique (Figure 37). Cette lecture historicisée illustre un phénomène de « montée en généralité » des travaux de Reason entre 1990 et 1997, qui corrobore l'idée qu'un travail de théorisation (qui suite celui de modélisation) de l'accident organisationnel s'opère.

Modèle « pathogène » de l'accident (1993)

Un troisième « modèle cousin » témoigne d'une des étapes de construction intellectuelle de la TAO. Dans un chapitre intitulé « *managing the management risk: new approaches to organizational safety* » (Reason, 1993a), une nouvelle distinction conceptuelle entre « *types* » et « *tokens* »[196] fait son apparition. Ces deux *familles* de défaillances humaines se distinguent par leur degré de spécificité et leurs origines. Les *types* se rapportent aux défaillances managériales ou organisationnelles et sont considérés comme la principale source *systémique* d'agents pathogènes, les *tokens* aux défaillances plus spécifiques liées aux individus ou aux interfaces Hommes-Machines (Figure 38).

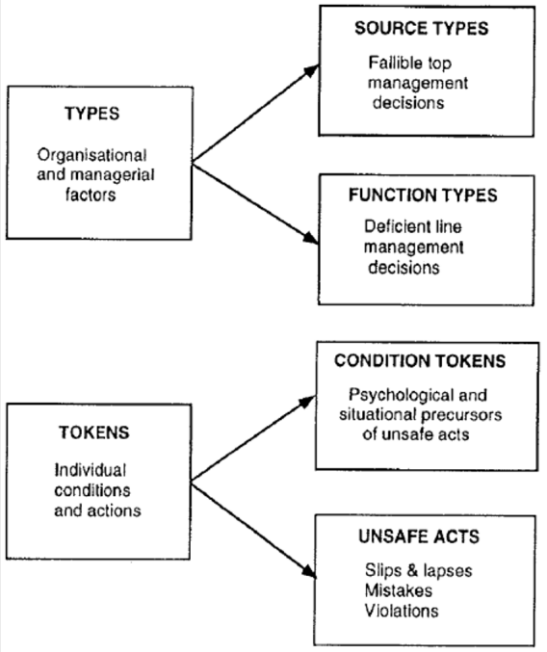

Figure 38 : Classification des types et token inspirée par Patrick Hudson lors du développement de la théorie Tripod au début des années 1990 (Reason, 1993a).

Cette nouvelle distinction est à la base du modèle « *pathogène* » des accidents (Figure 39) qui a pour but d'illustrer les différents modes de diffusion des agents *pathogènes* au sein d'un système et de sa

[196] Littéralement *jeton*, nous choisissons de conserver ici le terme anglais dont on doit préciser qu'il donne son origine au « *tokenism* » que l'on pourrait traduire par « trompe-l'œil », « cache-misère ». On comprend ici le choix du terme exprimant avec d'autres mots l'analogie de l'iceberg où l'« erreur humaine » n'est que la « face émergée » d'un processus plus profond / global. « *The principal advantages of the type-token distinction […] [is that] it directs us away from the dangers of "tokenism" – the tendency to treat human failures at a local level rather than within the global context of the organization* » (Reason, 1993a).

structure organisationnelle. On retrouve, sur la partie droite du schéma, les cinq *plaques* du MAO Mk I publié trois ans auparavant dans *Human error.* La partie gauche développe l'aspect systémique de la TAO.

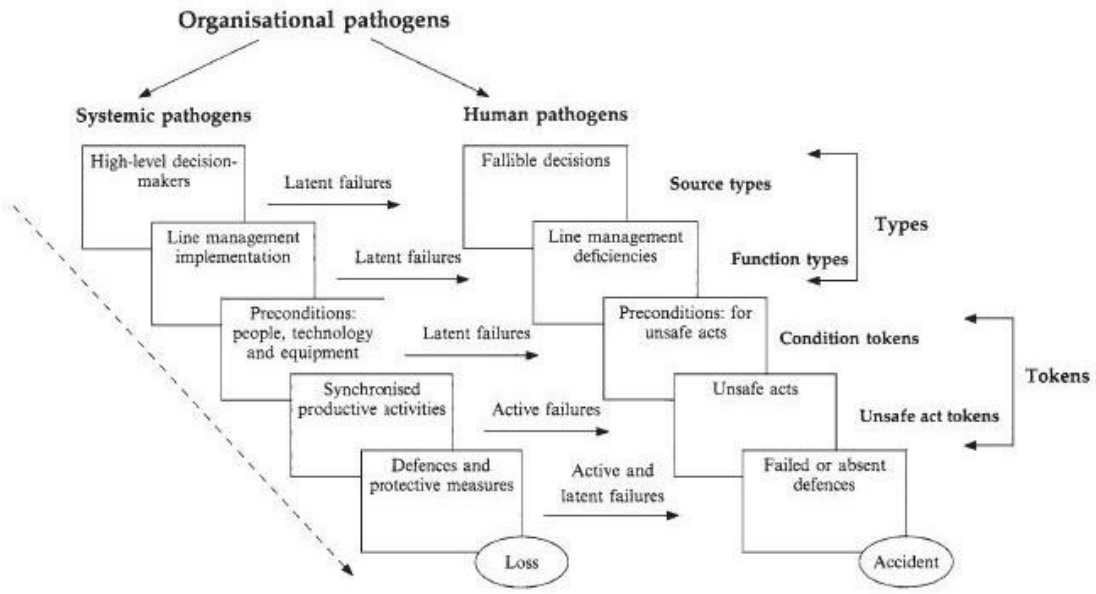

Figure 39 : Modèle « pathogène » d'accidents (Reason, 1993a).

Ce modèle qui demeure essentiellement théorique a probablement été délaissé au profit du modèle d'accident organisationnel *Mk II,* qui lui est contemporain mais s'avère plus opérationnel. Il témoigne pourtant de l'effort de conceptualisation des modes d'action des différents agents pathogènes au sein d'un système, à même de créer les conditions locales aux actes-non sûrs.

Complémentarité des modèles : vers une théorie intégrée

L'*itinéraire* d'une organisation dans l'espace « production - protection » (Figure 37) se situe à une échelle *macroscopique* de la TAO de Reason et propose un cheminement qui aboutit à l'accident. L'*accident* est ensuite expliqué à une échelle *mésoscopique* par le MAO Mk III (Figure 33) comme une défaillance combinée des défenses d'un système permettant à un danger d'atteindre des enjeux et causer des pertes[197]. Cette altération est enfin conceptualisée sur la base d'un triptyque : facteurs organisationnels, facteurs locaux et actes risqués. Or, à une échelle *microscopique*, le modèle d'arbitrage (Figure 36) explicite les modes de production des agents pathogènes, le modèle pathogène (Figure 39) en détaille les modes de diffusion dans l'organisation et la taxinomie des actes non sûrs (Figure 26) nous renseigne sur les différentes erreurs possibles.

La TAO n'est donc pas tant « le SCM » qu'une articulation de ces différents modèles dont nous présentons une visualisation Figure 40.

[197] Le SCM (Figure 34) est en somme un « zoom » sur les défenses altérées.

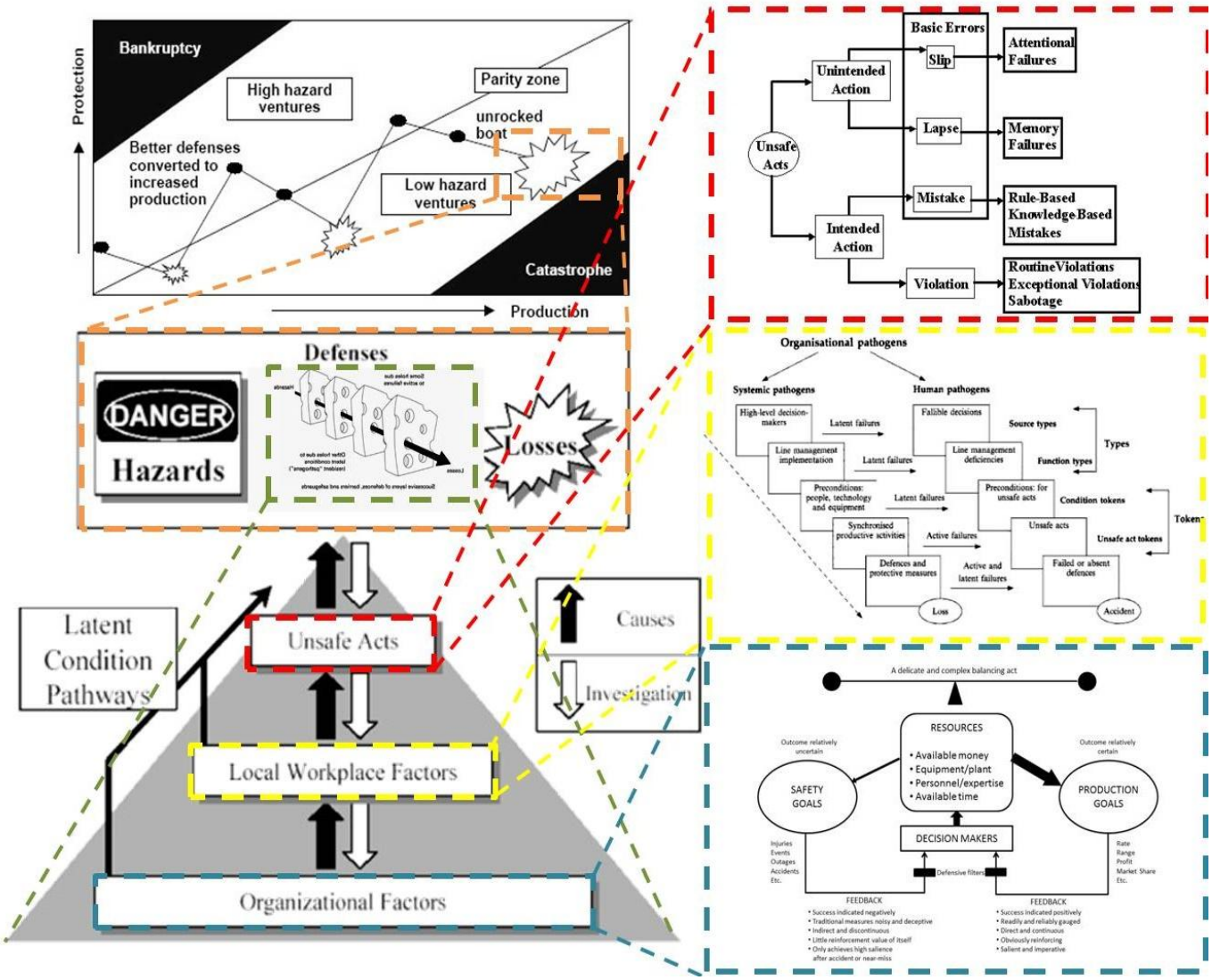

Figure 40 : Agrégation de différents modèles de Reason (1990b, 1993, 1997, 2000). En orange, le lien entre la vision macroscopique et mésoscopique de l'accident. En vert, une explication mésoscopique des défaillances dans les barrières (N.B. : le « SCM » (2000) a été replacé dans la version Mk III (1997) où il s'insère parfaitement). A droite, en bleu, jaune et rouge, les modèles « microscopiques » permettant de finaliser la chaîne. Nous illustrons ici l'idée « qu'une théorie est l'ensemble de ses modèles ».

2.3. La popularité en question : usages, limites et critiques du Swiss cheese model

Si la TAO a été développée dans la durée et a donné lieu à plusieurs MAO, le SCM en est l'ambassadeur. Les usages qui en ont été faits sont très variés : guide pour l'enquête accident, pour le diagnostic proactif ou encore comme support de communication (2.3.1). Pourtant, son *intention originelle* était uniquement didactique : représenter l'accident comme la combinaison d'un ensemble de défaillances, organisationnelles, humaines ou techniques. « *The model was intended to be a generic tool that could be used in any well-defended domain – it is for the local investigators to supply the local details* » (Reason *et al.*, 2006). Cette précision, formulée près de vingt ans après les premières réflexions de Reason sur l'accident organisationnel, est fondamentale. En effet, « *la première étape d'une modélisation consiste en la formulation précise de la question préalablement posée, ainsi que de l'objectif de modélisation »* (Varenne, 2009). Un modèle ne peut être indépendant ni d'un utilisateur[198] ni du questionnement particulier de cet observateur auquel le modèle sert à répondre. Nous proposons donc une revue des usages faits du SCM, mais aussi d'un ensemble de travaux proposant des méthodes ou des outils pour rendre opérationnels les concepts de la TAO (2.3.2). Malgré la popularité de ces outils, il existe depuis de nombreuses années un débat académique remettant en cause le caractère contemporain du SCM et plus globalement, la valeur théorique des MAO (2.3.2). En considérant que les modèles de gestion de la sécurité ne doivent pas être « détachés » du réel et discutés « en théorique », nous défendons l'intérêt contemporain des MAO (2.3.3).

2.3.1. Revue des usages, méthodes et outils adossés au Swiss cheese model

Nous avons considéré l'articulation entre théories, modèles, méthodes et outils d'un point de vue théorique (2.1.3). Nous allons maintenant estimer la pertinence empirique de cette réflexion à travers la présentation de différentes méthodes et outils dérivés des modèles d'accidents organisationnels et particulièrement du SCM.

Outil de communication

Le SCM offre une grande souplesse pour la communication en matière de gestion des risques ou de partages d'expériences. Le principe physique de la barrière représentée par une plaque à trous et de l'accident représenté par un faisceau (ou une flèche) est intuitif. La simplification du modèle laisse la liberté d'étiqueter les *tranches* et de les dupliquer autant que nécessaire pour adapter le modèle aux besoins (Figure 41).

[198] Un modèle n'est modèle *que* pour un utilisateur, doté de sa subjectivité et ses problématiques.

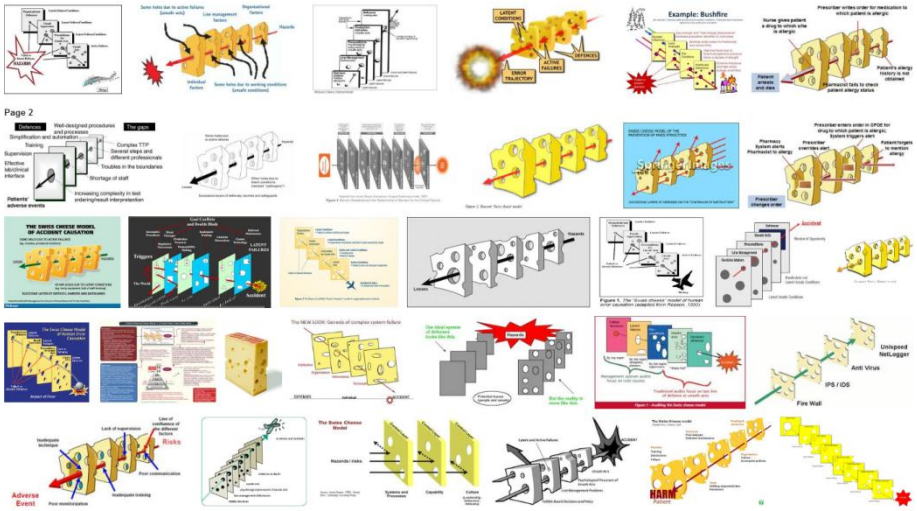

Figure 41 : Quelques appropriations du modèle de Reason. Le nombre de tranches, le niveau de détail, l'orientation, les différents labels, sont adaptés par les utilisateurs du modèle. (Google Image ; mots clés Swiss Cheese Model, 2014).

Outils d'analyses

Tout au long du développement de la TAO, Reason et ses collaborateurs ont cherché à concevoir des outils et des méthodes permettant des applications spécifiques.

Analyses rétroactives

La première initiative remonte à la fin des années 1980 avec le développement de la méthode Tripod BETA[199] (Doran & Van Der Graaf, 1996). Cette méthode a été conçue par Willem-Albert Wagenaar, James Reason et Patrick Hudson dans le cadre d'un important programme financé par Shell. Elle propose un guide pour construire des arbres des causes après un accident, partant des faits (constat de l'accident) pour retracer les causes (enchaînement de décisions et d'actions) avant de lister l'ensemble des barrières et défenses qui ont défailli. Le travail de l'enquêteur consiste ensuite à déterminer les raisons de l'absence ou du non fonctionnement des différentes défenses.

Pour l'analyse, une autre méthode (HFACS[200]) a été développée pour l'Aviation Civile américaine. Elle se base sur le modèle Mk I et incite les enquêteurs à élargir leur approche, généralement uniquement *explicative* et *individuelle* des erreurs humaines. « *What makes the 'Swiss Cheese' model particularly useful in accident investigation is that it forces investigators to address latent failures within the causal sequence of events as well.* » Shappell et Wiegmann fournissent un exemple d'adaptation à l'aviation et à un cadre d'analyse donné (ici l'enquête, rétroactive, d'accident) du modèle de Reason. En constatant que « [*The 'Swiss cheese' model*] *is simply a theory with few details on how to apply it in a real-world setting* », les auteurs proposent de fixer un périmètre dans lequel ils peuvent specifier la métaphore : « *this paper will attempt to describe the "holes in the cheese".* […] *using over 300 naval aviation accidents* ». (Shappell & Wiegmann, 2000).

[199] Pour BEtter Tool for Accident Analysis (Patrick Hudson, 2015 ; correspondence personnelle).
[200] Ou Human Factors Analysis and Classification System.

Diagnostics proactifs

La théorie de l'accident organisationnel repose, comme nous l'avons vu, sur la métaphore des *agents pathogènes.* Un de ses postulats est qu'il doit être possible de représenter *l'état de sécurité* d'un système sur la base d'un nombre limité de variables (ou d'indicateurs). Définir ces indicateurs et leurs implications dans la gestion de la sécurité est l'objectif des *outils de diagnostic organisationnel* dérivés des modèles de Reason.

Dans les *premiers stades* de développement d'un incident, le diagnostic est délicat, il est toujours plus aisé de *relire* un évènement que de le *prédire* mais les opportunités de solution sont nombreuses dans ces stades primitifs. *A contrario*, dans les *derniers stades* de développement, bien que le diagnostic soit facilité par la multiplication des signaux, la mise en place des solutions est souvent plus coûteuse (en temps, ressources humaines ou financières). L'approche proactive de l'ingénieur consiste souvent à lister *tout ce qui pourrait aller mal*, examiner les conséquences et les probabilités de défaillances (scénarios) pour tenter de *contrer* les plus probables (plans d'action). Cette approche est limitée par l'imagination et l'expérience des acteurs impliqués, de plus leur habilité à anticiper l'ensemble des problèmes est d'autant plus restreinte que le système est dynamique ou complexe.

La méthode Tripod DELTA[201] a été développée pour contrer les limites de l'approche par scénarios. Sa conception s'est faite, entre 1989 et 1992, suite à de nombreuses études d'accidents mortels survenus sur terre ou en mer dans le groupe pétrolier Shell mais aussi d'observation des conditions réelles de travail complétées par des entretiens avec les opérateurs et le management (Reason *et al.*, 1989 ; Hudson *et al.*, 1994). La philosophie de la méthode (Figure 42) est que la gestion de la sécurité est essentiellement une problématique de contrôle organisationnel. Les *actes risqués* et les accidents découlent de l'association de *défaillances types* (en anglais *General Failure Types* ou GFT) et de facteurs déclencheurs locaux. Seuls les *défaillances types* peuvent être identifiées (et donc, potentiellement maîtrisées, contrôlées) à l'avance. Une gestion de la sécurité efficiente doit donc reposer sur un effort constant pour traquer et traiter les *défaillances types.*

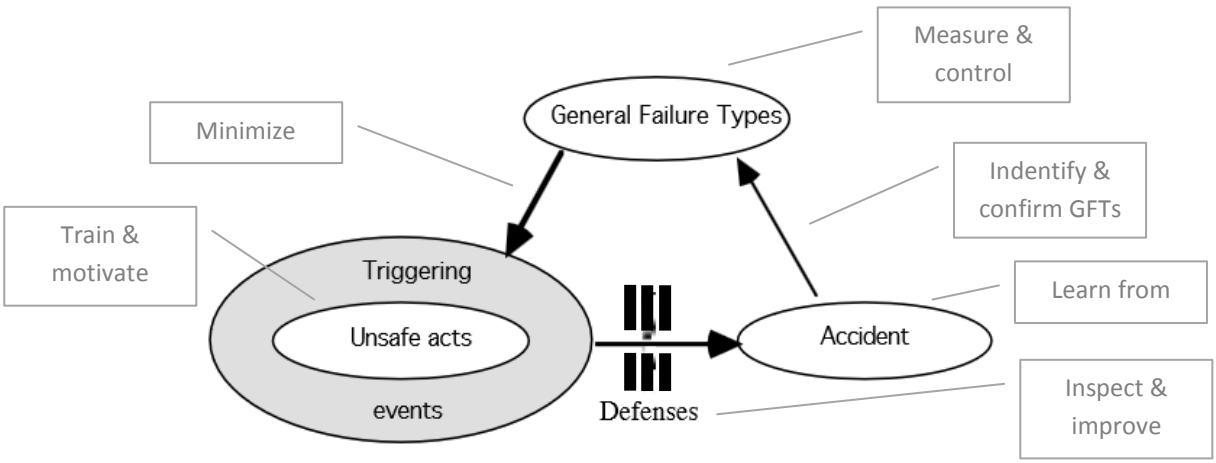

Figure 42 : Les trois éléments fondateurs de la philosophie Tripod (d'après Reason, 1997).

[201] Diagnostic and EvaLuation Tool for Accident prevention.

Tripod DELTA propose de faciliter ce processus sur la base de onze *indicateurs* appelés GFTs (Figure 44). Le diagnostic, conduit par un groupe de travail (composé de managers, d'opérateurs, de responsables sécurité), est réalisé à l'aide d'un ensemble de checklists et de questionnaires auxquels l'ensemble du personnel du site est invité à répondre anonymement. Ces questionnaires permettent d'étudier le niveau de maîtrise ou de non-maîtrise, au moment du diagnostic, des GFTs. Le résultat est présenté sous forme d'un histogramme (Figure 43) qui sert de guide à l'établissement de plans d'actions à court ou moyen terme. Pour mesurer l'effet de ces plans d'action, l'enquête Tripod DELTA peut (doit) être reconduite périodiquement sur chaque site.

Hardware	HW
Maintenance management	MM
Error-enforcing conditions	EC
Incompatible goals	IG
Communication	CO
Defenses	DF
Design	DE
Procedures	PR
Housekeeping	HK
Organization	OR
Training	TR

Figure 44 : Les onze GFTs de la méthode Tripod BETA

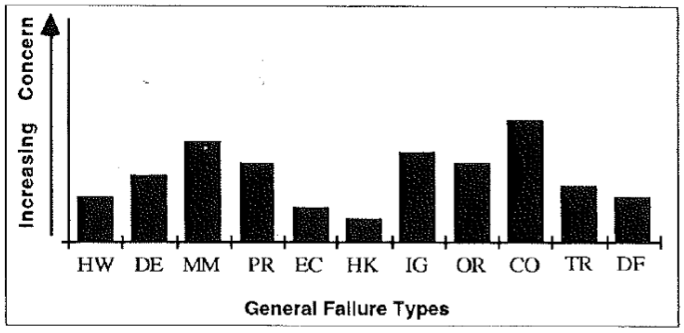

Figure 43 : Diagramme d'état d'une unité opérationnelle diagnostiquée avec la méthode Tripod DELTA. Plus une barre est grande plus il importe de considérer le GFT dans les mesures de prévention. (Hudson et al., 1994).

D'autres outils ou méthodes de diagnostics s'inspirent directement de la théorie de l'accident organisationnel. Certains sont génériques comme les méthodes ICAM (Incident Cause Analysis Method) et IDM (Influence Diagram Methodology) qui peuvent être utilisées pour l'analyse post-accident ou le diagnostic proactif (De Landre, *et al.,* 2006), la méthode de diagnostic proactif HEART (Human Error Assessment & Reduction Technique). D'autres sont spécifiques à certains secteurs comme c'est le cas des méthodes PAOWF (Industrie nucléaire américaine), REVIEW (British Rail), MESH (British Airways et Singapore Airlines Engineering, méthode spécialisée pour le management des erreurs de maintenance)[202] (Reason, 1997 ; Reason *et al.*, 2006).

Domaines d'application

L'importance des travaux de Reason pour la gestion de la sécurité est telle qu'il est probablement impossible de fournir une liste exhaustive des domaines d'influence ou d'application de ceux-ci. La théorie de l'accident organisationnel et les modèles d'accidents qui lui sont associés (en tête le SCM) ont connu une très importante diffusion depuis le milieu des années 1990. Le livre *L'erreur humaine* a été traduit dans cinq langues. Depuis sa publication, James Reason a donné près de 300 conférences sur la théorie de l'accident organisationnel autour du monde et publié plus de 30 articles ou chapitres d'ouvrages s'y référant. A titre d'illustration, le Tableau 16 présente une liste de différents domaines marqués par les travaux de Reason.

[202] Les méthodes REVIEW et MESH sont directement inspirées de la méthode Tripod DELTA, nonobstant une adaptation à leurs secteurs respectifs, elles exploitent les mêmes principes.

Tableau 16 : Liste non exhaustive des milieux d'application des travaux de James Reason (Larouzée et al., 2014b).

Domaine d'application	Référence bibliographique	Modèle ou méthode spécifique
Aviation	- Maurino (1993)	- SCM [(1)]
	- Shappell (2000)	- HFACS [(2)]
	- Walker (2003)	- ATSB [(3)] Model
	- Reason *et al.* (2006)	- MESH
Maritime	- Ren *et al.* (2008)	- SCM, réseaux Bayésiens
Médecine	- Vincent *et al.* (1998)	- Méthode ALARM
	- Carthey *et al.* (2001)	- SCM
	- Lederman & Parkes (2005)	- SCM
	- Stein & Heiss (2015)	- SCM
Militaire	- Jennings (2008)	- DOD [(4)]-HFACS
Nucléaire	- Reason *et al.* (2006)	- SCM, PAOWF
Pétrole	- Reason *et al.* (1989) ; Hudson *et al.* (1994)	- TRIPOD DELTA
	- Doran & Van Der Graaf (1996)	- TRIPOD BETA
Rails	- Reason *et al.* (2006)	- REVIEW
	- Baysari *et al.* (2008)	- SCM, HFACS
Routes	- Salmon *et al.* (2005)	- SCM
Autres domaines	- Henderson (2007) livraisons	- SCM
	- Lubnau *et al.* (2004) pompiers	- SCM
	- Holtermann (2010) justice	- CCPS [(5)]

(1) SCM : Swiss Cheese Model / (2) HFACS : Human Factor Analysis and Classification System / (3) ATSB : Australian Transport Safety Board / (4) DOD : Department of Defense / (5) CCPS : Comprehensive Crime Preventive System.

Bien connu, bien employé ?

Dans un article publié en novembre 2005, Perneger (Perneger, 2005) cherche à déterminer si la métaphore du fromage Suisse est comprise de manière identique par les différents professionnels de la santé qui l'utilisent. Il réalise une enquête par questionnaire auquel il joint une représentation graphique du modèle (Figure 34). Pour les besoins de son enquête, les termes *dangers* et *pertes* sont supprimés de la représentation et le modèle est donc présenté dépouillé de tout label écrit.

Une première question, portant sur la familiarité du répondant avec le modèle, lui a permis d'analyser uniquement les réponses des personnes se définissant comme « à l'aise » et « très à l'aise » avec le SCM (N = 85). Les cinq questions principales de l'enquête portaient sur les différents éléments du modèle : une *tranche* de fromage, un trou, la flèche, la représentation d'une *erreur active* et ce qui permet de rendre le système de santé *plus sûr* selon le modèle. Les réponses étaient des choix multiples.

> « *Most respondents interpreted the slice of cheese as intended by J. Reason (barrier that protects patients from harm), and inferred correctly that this would include a defense that prevents the occurrence of an error. However, only few recognized that procedures that alleviate consequences of an error may also appear as barriers. Majorities interpreted a hole as suggested by Reason – a weakness in defenses, but only few respondents understood that a hole is either a latent error or an unsafe act. The most obvious interpretation of the arrow (path from hazard to harm) was chosen by only half of the respondents. The majority choice (series of events leading to an error) is not entirely correct, as it is patient harm, not an error that is represented by Reason at the tip of the arrow (however, the error may be equivalent to patient harm, as in wrong site surgery). Only three out of ten*

> *respondents identified correctly an active error as one of the holes. Making the system safer by plugging a hole was correctly selected by most respondents, but the solution of adding a barrier (a slice of cheese) was not.* » (Perneger, 2005).

Si les résultats peuvent paraître satisfaisants, le panel retenu (personnes à l'aise voire très à l'aise avec le modèle) devrait conduire à un taux plus élevé de réponses correctes. Le principal résultat de Perneger est que le SCM n'est pas univoque. Par conséquent « *invoking the Swiss cheese model will not necessarily lead to effective communication, even among quality and safety professionals.* […] *The danger is that people today use the label « Swiss cheese model » without realising that its meaning varies from one person to the next* » (Perneger, 2005).

Cette étude soulève un ensemble de questions autour du partage du sens, de la communication et de la confiance que l'on peut placer dans un modèle pour expliquer le réel. Bien que sa popularité soit indéniable, le SCM a reçu plusieurs critiques en ce sens depuis le début des années 2000. Nous les passons en revue avant de les discuter à la lumière des éléments présentés dans cette section.

2.3.2. Discussion des limites et des critiques du Swiss cheese model

Dans son livre *Managing the risks of organisational accidents*, Reason attire l'attention sur une dérive potentiellement induite par son modèle : la recherche toujours plus loin, voire trop loin, de causes profondes. « *The pendulum may have swung too far in our present attempts to track down possible errors and accident contributions that are widely separated in both time and place from the events themselves.* » (Reason, 1997 ; page 234). Cette alerte lancée par Reason dix ans après le début de ses travaux sur la TAO est la toute première critique publiée sur ses MAO. « *Ironically, it seems that the only person to question the use of Reason's Swiss Cheese model is Reason himself!* » (Shorrock *et al.*, 2005). La puissance heuristique du SCM, l'un des facteurs de son importante diffusion, semble avoir aussi entraîné une utilisation dogmatique de celui-ci.

> « *It may be the case now that industries and organizations have latched on to the model in a far too rigid and dogmatic fashion. As a consequence, investigations based on the Reason model can easily turn into a desperate witch-hunt for the latent offenders when, in some cases, the main contributory factors might well have been 'human error' in the traditional sense.* » (Young, *et al.*, 2004).

Après une phase de conception d'une dizaine d'années (1977 – 1988), une phase de déploiement et d'évolutions aussi longue (1989 – 1997), le milieu des années 2000 est une première période de remise en cause du modèle. Nous proposons de grouper les critiques publiées à l'égard du SCM en deux catégories : (1) la représentation statique et linéaire de l'accident et (2) le manque de spécificité ou l'excès de généralité du modèle.

Une vision statique et linéaire de l'accident

L'une des critiques les plus fréquemment formulées à l'égard du SCM est qu'il donne une vision statique, figée, des organisations et des accidents.

> « *Reason's model shows a static view of the organization; whereas the defects are often transient i.e. the holes in the Swiss cheese are continuously moving. The whole socio-technical system is more dynamic than the model suggests.* » (Qureshi, 2007).

A cette critique est souvent associée l'idée de linéarité causale :

> « *The Swiss cheese* [model] *subsequent layers of defense with holes in them, may unintentionally sustain and propagate* [some] *decomposition assumptions. The sub-systems (e.g. layers of defense) are represented independently, the entire system is assembled straightforwardly from a series of layers, and their interrelationship is linear (the "accident trajectory" through them is a straight line, going through one layer after another). If these assumptions were valid for the systems we inspect and regulate, then looking for the quality of individual components or sub-systems would suffice. But they aren't and it doesn't.* » (Dekker, 2006).

Ces deux extraits pointent explicitement le biais de représentation induit par l'analogie avec les tranches de fromage et la présence d'une flèche droite conduisant à l'accident. Notons que ces remarques constituent plus volontiers des avertissements destinés aux utilisateurs du SCM qu'une remise en cause de ses fondements. D'autres auteurs, souvent en se référant à la classification des modèles d'accidents d'Hollnagel (4.2.2), qualifient le SCM de modèle séquentiel et lui reprochent une simplification excessive de l'étiologie des accidents (e.g. Hollnagel, 2012, p.14; Leveson, 2012, p.19). A l'extrême, ces critiques décrètent l'obsolescence du SCM en le comparant (par exemple) au modèle *dominos* d'Heinrich publié au début des années 1930 et depuis largement remis en cause :

> « [The] *Swiss cheese model is simply another version of Heinrich's Domino Model with different terminology (slices of cheese rather than dominos) and the idea of barriers or defenses from the process industry. Note that independence of the barriers is assumed and some randomness in whether the "holes" line up. Also, as in the Domino Model, a human (operator) "unsafe act" is seen as the final event while ignoring other types of "active failures" at the time of the accident. Finally, the underlying causes of the events are ignored other than a lack of barriers to prevent their propagation*. » (Leveson *et al.*, 2011).

> « *The only significant difference between the Swiss Cheese Model and the previous models by Heinrich, Adams, Bird and Loftus, and others was the substitution of Swiss cheese slices for dominoes or other graphics. The holes represent failed or absent barriers or defenses. In an accident scenario, they are considered to line up randomly, which assumes that each slice is independent, which is highly unlikely in any real system.* » (Leveson, 2013).

> « *The Reason Swiss cheese is no longer adapted to anticipate today's accidents.* » (Leveson, 2004).

Cette dialectique est souvent utilisée par des auteurs proposant leurs propres modèles comme des solutions aux *manques* ou aux *limites* du SCM (e.g. Leveson 2004, Hardy, 2010).

Un modèle (trop) général

La seconde grande famille de critiques adressées au modèle portent sur son caractère généraliste.

> « *The Swiss cheese analogy is useful to think about the complexity of failure* […] *but it does not explain: where the holes are or what they consist of, why the holes are there in the first place, why the holes change over time, both in size and location, how the holes get to line up to produce an accident. This is up to you, as investigator, to find out for your situation.* » (Dekker, 2002).

> « [T]*he Reason model, in its current form, fails to provide the detailed linkages from individual to task/environment to organization beyond a general framework of line management deficiencies and psychological precursors of unsafe acts.* » (Luxhøj & Maurino, 2001).

> « *In many ways, Reason's 'Swiss cheese' model of accident causation has revolutionized common views of accident causation. Unfortunately, however, it is simply a theory with a few details on how to apply it in a real-world setting. In other words, the theory never defines what the 'holes in the cheese' really are, at least within the context of everyday operations.* » (Shappell & Wiegmann, 2000)[203].

> « *Reason's model of accident causation broadened the area of accident investigations beyond psychological and technical errors to the latent conditions leading up to an accident, thus opening up their multifaceted nature. However, the nature of errors has remained underspecified, since the model does not target errors in their activity.* » (Arminen *et al.*, 2010).

> « *One of the disadvantages of the Reason model is that it does not account for the detailed interrelationships among causal factors. Without these distinct linkages, the results are too vague to be of significant practical use.* » (Luxhoj & Kauffeld, 2003).

Tout en reconnaissant les apports du SCM, c'est donc la simplicité de sa représentation qui est identifiée comme une limite. Si la version de 2000 assume une simplicité extrême qui peut être légitimement discutée (bien qu'elle ait été souhaitée par Reason !), on note que les deux dernières critiques sont adressées au « *modèle de Reason* » et cèdent ainsi à la *réduction* des travaux de Reason au SCM. Or, dans la bibliographie de l'auteur de nombreux autres « modèles de Reason » sont explicitement destinés à décrire, à différent niveaux, les mécanismes de production des conditions latentes ou des actes risqués (les trous), leurs relations (voir Figure 40, p. 139). C'est également le cas des nombreuses méthodes que nous avons présentées (e.g. Tripod DELTA, Tripod BETA) qui sont directement destinées aux usages pratiques de prévention et de protection. Ces critiques négligent la distinction essentielle entre *théorie, modèle, méthode* et *outils* (2.1.2).

Des critiques à réorienter ?

L'étude approfondie des travaux de Reason offre une perspective différente sur les critiques que nous avons exposées. D'une part, nous avons noté que l'objet *visé* par la critique n'est pas toujours explicitement défini. Il est difficilement concevable que deux *modèles* de natures différentes[204] puissent être discutés au même niveau et épistémologiquement hasardeux de confondre *théorie, modèle* ou *outil*. D'autre part, si les critiques liées aux biais de représentation du SCM sont parfaitement recevables, afin d'aider leurs lecteurs à dépasser ces biais, elles devraient renvoyer aux autres travaux de Reason et ses collaborateurs qui *pallient*, point par point, les « manques » du SCM.

> « *The model is a heuristic tool that assists analysts to reverse engineer the safety critical aspects of interaction in complex socio-semiotical systems. It helps the analyst to address latent context of the problems that have become actively relevant for the ongoing action-in-interaction, thereby allowing the analysis of local interaction to be connected with wider aspects of the mobility system.* » (Arminen *et al.*, 2010).

[203] Cet extrait illustre le flou existant entre théorie et modèle que nous avons évoqué dans la partie 2.1.2.

[204] On peut par exemple parler de modèle de Reason pour désigner une taxinomie des erreurs humaines ou une analogie heuristique à but didactique sur l'étiologie des accidents ou encore une représentation *normative* d'une organisation productive et de ses défaillances.

Nous avons suggéré (2.1.2) qu'en se *libérant* du positivisme scientifique qui encourageait la modélisation-représentation-diplomatique, les sciences humaines et sociales ont induit la disparition de l'idée de « *modèle fini, clef en main, à utiliser en respectant soigneusement le mode d'emploi* » (Le Moigne, 1987, p. 10). On peut alors exprimer la valeur et la force du SCM en ces termes :

> « *No qualitative model of error can be perfect. No matter what model it is, the ultimate goal is to encourage insightful discussion about issues and limitations of the design of safety systems, as well as to encourage broader thinking in incident analysis after the fact. What both cheese models do is provide a shared language, as well as a worked-out way of conceptualising what would have been blind spots in thinking.* » (Li & Thimberli, 2014)

Nous proposons donc de reformuler les critiques portées au(x) modèle(s)[205] de Reason à la lumière d'une meilleure connaissance de sa TAO et de ses nombreux *modèles* et leurs *méthodes* ou *outils* associés. Les MAO de Reason, comme tout modèle, sont des simplifications réductrices du réel. Il a été montré que la structure *réelle* d'une organisation diffère de sa structure *formelle* (Crozier & Friedberg, 1977). Dès lors on doit reconnaître que la portée du modèle *normatif* (Figure 27) utilisé dès 1987 pour le développement de la *théorie de l'accident organisationnel* ne peut être *universelle*. Le SCM a largement contribué à un changement de paradigme par sa force heuristique, en déplaçant l'explication d'une approche individuelle de *l'erreur* à une approche systémique. Toutefois, il est essentiel que les professionnels en charge de gestion de sécurité n'occultent pas, par son biais, l'importance du facteur humain. « *Latent conditions may be significant, but occasionally people really do just slip up* » (Young *et al.*, 2004).

Nous pouvons également éclairer la discussion sur la nature épistémologique de la TAO de Reason. L'approche *systémique* de l'accident peut être résumée selon quatre caractéristiques essentielles : (1) la structure, (2) les fonctions et (3) les processus articulés dans (4) un environnement donné. Dans une vision *systémique*, les activités des opérateurs interagissent avec les processus et les différents niveaux d'une organisation subissent des contrôles. Ces interconnexions impliquent que « *dès qu'un système fonctionne, les décisions prises à ses niveaux supérieurs se propagent dans les niveaux inférieurs. Rétroactivement, les informations relatives aux actions des niveaux inférieurs peuvent remonter le long de la hiérarchie. Cette rétroaction est cruciale pour le bon fonctionnement du système […].* » (Hardy, 2010, p.57). Ainsi, « *les modèles d'accident systémiques permettent de mieux décrire et de mieux comprendre les liens entre les différents facteurs à travers différents niveaux hiérarchiques* » et « *permettent la description du processus d'accident comme un ensemble d'évènements interconnectés et complexes alors que les modèles séquentiel et organisationnel se contentent d'une description linéaire de l'accident »* (*op. cit.*, p.65). En somme « *dans les modèles systémiques, un accident survient lorsque plusieurs facteurs (humain, technique, environnemental) coexistent en un lieu et un temps spécifique* » (Hollnagel, 2004 ; cité par Hardy, 2010, p. 65).

L'approche systémique des accidents recouvre donc plusieurs des caractéristiques présentées par les modèles de Reason : *interconnections* entre les niveaux d'une organisation, *complexité* des interactions, importance des *rétroactions*. L'illustration la plus parlante de cette dimension systémique est selon nous la version alternative du modèle Mk II (Figure 32). Si la version publiée en

[205] Nous maintenons l'indétermination du/des modèle(s) en considérant qu'il convient effectivement de discuter de la version la plus populaire, la plus citée et la plus utilisée : celle publiée en 2000. Toutefois, nous considérons également que les références aux autres travaux de l'auteur sont non seulement utiles mais aussi nécessaires dans une tentative de discussion.

2000 induit un biais de représentation linéaire[206], « *'Swiss cheese' is primarily about how unsafe acts and latent conditions combine to breach the barriers and safeguards.* […] *I still think of it as a systemic model* […] *Just as there are no agreed definitions and taxonomies of error so there is no single 'right' view of accidents. In our business, the 'truth' is mostly unknowable and takes many forms. In any case, it is less important than practical utility* » (Reason, 2008 ; p. 94-95).

Le MAO SCM a permis une large diffusion des idées de l'auteur par sa simplicité et sa puissance heuristique mais il comporte des limites liées à sa simplification. Selon nous, cette simplification peut effectivement être considérée comme une *réduction*, non au sens épistémologique mais au sens *culinaire* du terme. Comme le cuisinier *réduit* une sauce, la *réduction* graphique et lexicale du SCM concentre l'essentiel par une évaporation. Pour atteindre ce résultat, il faut néanmoins réunir l'ensemble des ingrédients (des idées, des concepts) et les travailler dans la durée.

Le goût et l'aspect ainsi créés peuvent rendre plus délicate l'identification de ces ingrédients mais leur présence est toutefois indispensable.

Des évolutions, pas de révolution

Le SCM est-il obsolète ? Cette question est soulevée par James Reason lui-même dans un titre de conférence : « *Ueberlingen : Is Swiss cheese past its sell-by date ?* » (2004).

Après une période d'utilisation dogmatique des MAO de Reason, l'adoption rapide et très large du SCM, de nombreux auteurs en questionnent aujourd'hui les limites et le caractère contemporain. Bien que ces critiques cèdent généralement à l'amalgame entre « *le modèle de Reason* » (entendre le SCM), « *les modèles de Reason* » et « *la théorie de Reason* », elles sont généralement formulées autour du biais de représentation statique, causale et linéaire de la version *Swiss cheese*. La lecture des autres travaux de la TAO, consacrés aux accidents ou aux erreurs humaines, nous amène à conclure que ces critiques pourraient être adressées aux utilisateurs plutôt qu'au modèle lui-même : « *we would just like to see an increased awareness amongst investigators of the spirit of the model, rather than following the letter of Reason's 'bibles' so dogmatically. Without wanting to return to the dark ages of 'human error' being the company scapegoat for all accidents* […] » (Young et al., 2004).

Comme Reason l'indiquait en 2008, l'utilité prévaut sur la validité dans le cas des modèles d'accidents. Ainsi, le SCM a fait l'objet de plusieurs publications comparatives visant soit à déterminer un modèle plus *utile* qu'un autre ou à comparer et discuter les différents résultats produits par différents modèles d'accidents (e.g. Lundberg *et al.,* 2009 ; Hickey, 2012 ; Underwood & Waterson, 2014). L'on trouve aussi des tentatives de rapprocher le SCM d'autres modèles existant afin d'en dépasser les limites respectives (e.g. Harris & Li, 2011). De nombreux rapprochements peuvent être imaginés comme dans cet article qui propose d'unifier les méthodes *Nœuds papillons, Tripod BETA* et *Tripod DELTA* :

> « *The Swiss cheese model has proven to be one of the dominant safety metaphors of our time. Over the years, multiple barrier based methods have been developed using this metaphor, often with slightly different goals and interpretations of the original Swiss cheese model. However, because most still*

[206] Voir la réflexion sur le lien entre représentation et compréhension, ou « quand dessiner c'est faire » (« *Variantes de la Mark II : un modèle en avance sur son temps ?* » ; 2.2.2).

> *share enough commonalities, these methods can be combined to create a unified model that combines the benefits of each individual method.* » (CGE Risk, 2013).

Ou cette initiative qui combine le cadre théorique du SCM avec des outils d'analyse quantitative :

> « *To make good use of Reason's model, one way is to use quantitative analysis tool to enhance "Swiss cheese" model. Particularly in exploring causal relationships in offshore safety assessment, conventional tools have been widely used including Fault Tree Analysis (FTA), Event Tree Analysis (ETA), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), and Hazard and Operability Studies (HAZOP).* » (Ren *et al.*, 2008).

En parallèle des tentatives de combinaison, d'autres auteurs proposent des évolutions du SCM à travers des modifications du modèle ou la mise en place de véritables « modules complémentaires » :

> « *It is important to find the characteristics of holes theorized in the Swiss cheese model created by Reason when preventive measures are taken. Reason does not explain where the holes open and how the holes move and shut. The objectives of this research are to find the characteristics of a hole, visualize the development of the hole and propose accident preventive measures to shut the hole*. (Fukuoka, 2015)

L'un des développements le plus souvent utilisé et cité est celui de Shappell et Wiegmann appelé *HFACS* : « *Human factors analysis was designed to describe the holes in the cheese, as a response to gaps in Reason's model* » (Shappell and Wiegmann, 2000).

Johns propose l'élargissement du cadre conceptuel et théorique du SCM en proposant un rapprochement avec la *Pensée Critique* : « *Critical Thinking (CT) training reduces normal human decision error in individual and group processes. Individual CT can reduce or, in a specific case, close a hole in the Swiss cheese model. CT can also move the hole out of alignment.* » (Johns, 2009).

Arminen *et al.* suggèrent, sur la base d'une analyse *sémantique*, de modifier certains termes du SCM pour mieux en contrôler les effets produits. « *These studies on the coordination of talk and action may complement Reason's model in a significant way, helping us to re-specify the nature of work processes, including the emergence of failures and troubles.* » (Arminen *et al.*, 2010).

Besnard et Baxter proposent d'expliquer la formation des trous dans les plaques du modèle de Reason à l'aide de la théorie de Randell (2000 ; cité par Besnard & Baxter, 2003).

> « *The resulting integrated model offers a richer description of socio-technical failures by suggesting a mapping between sequences of events (a fault-error-failure chain) and holes in the layers of a system. We believe that our approach has some intrinsic interest since it constitutes a step forward in reconciling technical and organisational views on failures in socio-technical systems. In doing so, we position ourselves within a stream of research where dependability can no longer be accepted as a sole technical issue.* » (Besnard & Baxter, 2003).

On trouve enfin des initiatives plus ambitieuses ou du moins, originales. Jones (Jones, 2008, 2009) propose une réingénierie radicale du modèle passant du Fromage au Château Suisse « *Locating the model in the same countryside as the Swiss Cheese model is intended to convey evolution rather than revolution.* » Le modèle (cf. Figure 45) consiste alors à représenter l'opérateur comme le donjon d'un château fort et l'ensemble des *défenses* non plus comme des plaques mais comme le mur d'enceinte

du château. Les opérateurs deviennent alors à la fois la *dernière* ligne de défense mais également un *enjeu* que le système doit protéger. Les trous se situent dans les murs d'enceinte et Jones réfute l'hypothèse selon laquelle ces trous devraient s'aligner pour conduire à l'accident : « *we now recognize that complex systems run broken. A regulatory failure, a management shortcoming, a design flaw goes straight to the sharp end* » (Jones, 2008).

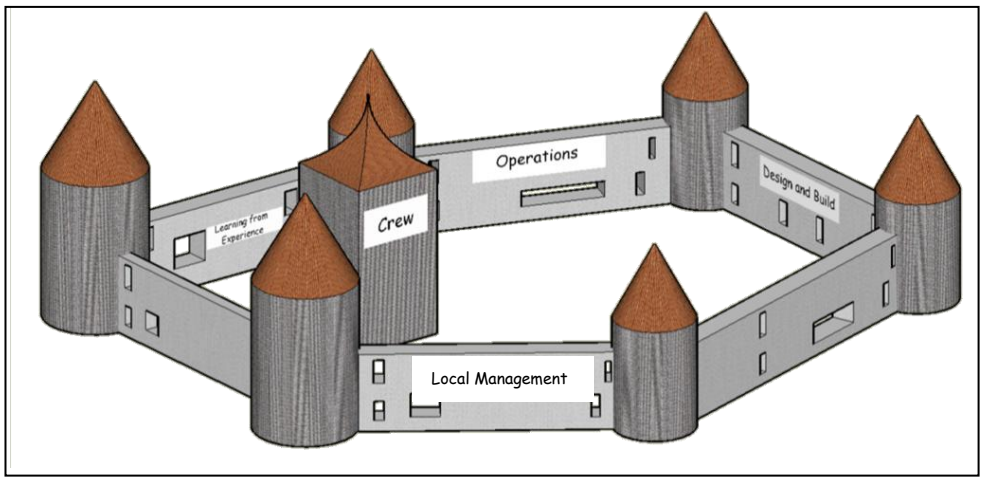

Figure 45 : Le modèle du Château Suisse. L'équipe, représentée par le donjon, constitue à la fois la dernière défense et un enjeu à protéger. (Jones, 2008).

Li et Thimbleby (2014) proposent une extension du SCM qu'ils baptisent HCM (pour *Hot Cheese Model*). Le HCM entend dépasser les biais de représentation du SCM : « *system defenses are visualised somehow as a collection of passive, unchanging, independent features (namely, slices of cheese)* ». Le HCM apporte trois nouvelles notions aux barrières (les tranches) et à leurs défaillances (les trous) qui sont résumées dans la Figure 46.

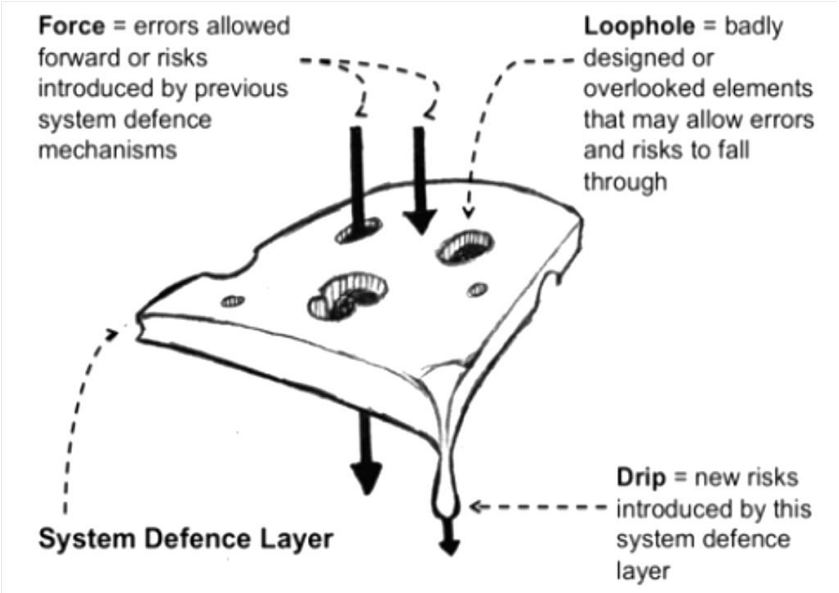

Figure 46 : Le "hot cheese" modèle propose de modifier la représentation des barrières par des tranches horizontales de fromage fondu pour supporter l'effet potentiellement négatif de la mise en place de nouvelles barrières de défense (Li & Thimbleby, 2014).

La principale innovation proposée par le HCM est la notion de *goutte* (*drip*) qui représente la possibilité que la mise en place d'une nouvelle barrière de défense dans un système introduise de nouveaux risques : « *for example, the manufacturer has introduced a sensorenabled history log system to help the patient keep track of his medication. However, the list of skipped medication on Monday and the list of scheduled medication for Tuesday are displayed on the same page in similar font. There is a risk of the patient taking two days' medication at once 'as instructed'. This will cause an overdose, which in some case may be a much bigger hazard.* » (*op. cit.*).

A ce jour, ni le modèle du Château Suisse ni celui du *Hot cheese* ne connaissent d'écho dans la littérature ou de cas d'application concrets permettant de juger leur valeur scientifique et/ou opérationnelle (pratique). Que ce soit en combinant le SCM avec d'autres modèles, outils ou méthodes, en le modifiant ou en lui apportant des compléments originaux voire en proposant une refonte totale de celui-ci, une large communauté d'auteurs contrastent avec les tenants de l'obsolescence du SCM. Ils confirment ainsi l'existence représentative d'une tendance à l'*évolution* plutôt qu'à la *révolution*[207].

2.3.3. De la contemporanéité des modèles de Reason

Dans cette section, nous avons présenté un historique détaillé des travaux du psychologue anglais James Reason. La TAO s'est progressivement imposée comme le paradigme de gestion de la sécurité au cours des années 1990, les notions de *conditions latentes* et *d'erreurs actives* ont trouvé des échos opérationnels dans de très nombreux secteurs. Le *Swiss cheese model,* publié en 2000, est et restera la contribution de Reason la plus reconnue et citée, il pourrait-être qualifié de *modèle ambassadeur*. Ce modèle théorique à portée didactique peut être considéré comme le modèle de référence pour de très nombreux acteurs en charge de gestion de la sécurité (Underwood, 2013).

Depuis le milieu des années 2000, le SCM est critiqué par différents chercheurs comme trop général, présentant une vision statique du système et linéaire de l'accident. A l'extrême, certains considèrent que le SCM n'est plus *capable* d'expliquer les accidents (Leveson, 2004). Afin de discuter ces critiques, nous avons réinscrit ce modèle dans la *constellation* des modèles d'accidents organisationnels publiés par Reason depuis 1990. Cet exercice fait apparaître un ensemble très riche de modèles articulés à des échelles *macro-, méso-, et microscopiques* à même de soutenir le concept d'*accident organisationnel* et d'en expliciter finement les mécanismes (percolation des conditions latentes à travers les structures organisationnelles, dégradation et récupération des fonctions de sécurité par l'Homme, influence de la culture et de l'équation production-protection, etc.). Ainsi mis en perspective, le SCM apparaît bien comme une *réduction*, non pas *épistémologique* mais *culinaire*, des travaux de Reason. Comme le Chef cuisinier *réduit* une sauce par évaporation pour en concentrer les arômes et en modifier la texture, la lente appropriation par le psychologue de l'expérience, de la réalité et des besoins industriels l'a conduit à publier le SCM. Epuré, ce modèle constitue la *substantifique moelle* de la *théorie des accidents organisationnels.*

[207] En référence au titre d'un article de Young « *(r)evolution of human factors* » (Young *et al.,* 2005).

La puissance heuristique et la simplicité graphique du SCM sont directement liées à sa vocation originelle : *communiquer simplement des idées complexes.* Les activités spécifiques d'analyse ou de prévention des accidents devraient utiliser les outils et méthodes associées à la *théorie de l'accident organisationnel,* spécifiquement conçu à ces effets. Nous en avons présenté plusieurs et rappelons ici les méthodes Tripod BETA (pour l'analyse) et -DELTA (pour le diagnostic proactif). Quand bien même ces différents outils auraient besoin d'être révisés pour rendre compte des évolutions techniques et technologiques, cela ne saurait signifier que la *théorie de l'accident organisationnel* est obsolète. Les accidents continuent d'advenir en raison de combinaisons indésirables de défaillances techniques, humaines et organisationnelles.

Si les acteurs politiques, économiques, scientifiques, ingénieurs, etc. continuent de s'informer avec des journaux dont les gros titres affichent « Accident : les enquêteurs suivent la piste de l'*erreur humaine* », le SCM aura toujours un rôle, *a minima* pédagogique, à jouer ; donc, une forme d'intérêt contemporain.

CHAPITRE 3 – NAISSANCE ET VIE D'UN MODELE FOH DEDIE AUX EDD
A LA CROISEE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR ET DES SCIENCES HUMAINES

Notre processus d'ingénierie s'est inscrit à la croisée d'attentes de la direction du CIH, visant à contribuer à une évolution culturelle renforçant les FOH dans la sûreté hydraulique, du projet national EDD pour l'amélioration continue de son référentiel méthodologique et des DREAL pour une meilleure prise en compte des dimensions humaines dans les EDD. Ce processus peut s'apparenter à celui de « développement en cascade » (Royce, 1970), initialement développé par l'ingénierie logicielle et spécifiquement adapté à nos besoins. Nous avons structuré notre démarche en six phases (Figure 47).

Le plan de ce chapitre suit ce processus. La première section porte sur l'organisation de travail de l'équipe de conception du dispositif FOH-EDD (3.1.1), les phases de comparaison de différentes méthodes existantes, d'adaptation de leurs indicateurs à l'exploitation des barrages et au fonctionnement des EDD (3.1.2) et les étapes de conception d'un dispositif de cotation des EI-FH (3.1.3). La deuxième section présente la phase de test de la méthode à travers le choix du site et la construction du test (3.2.1), son déroulement et ses résultats (3.2.2) puis une discussion sur ses limites et les perspectives ouvertes pour le dispositif (3.2.3). Le test utilisateur jugé satisfaisant, notre dispositif a été déployé dans les premières mises-à-jour d'EDD. La troisième section présente cette dernière phase de validation, menée à l'aide d'un dispositif d'observation des usages effectifs du dispositif par les GT-EDD (3.3.1) et ses enseignements (3.3.2) à partir desquels nous dégageons des perspectives industrielles à court terme (3.3.3).

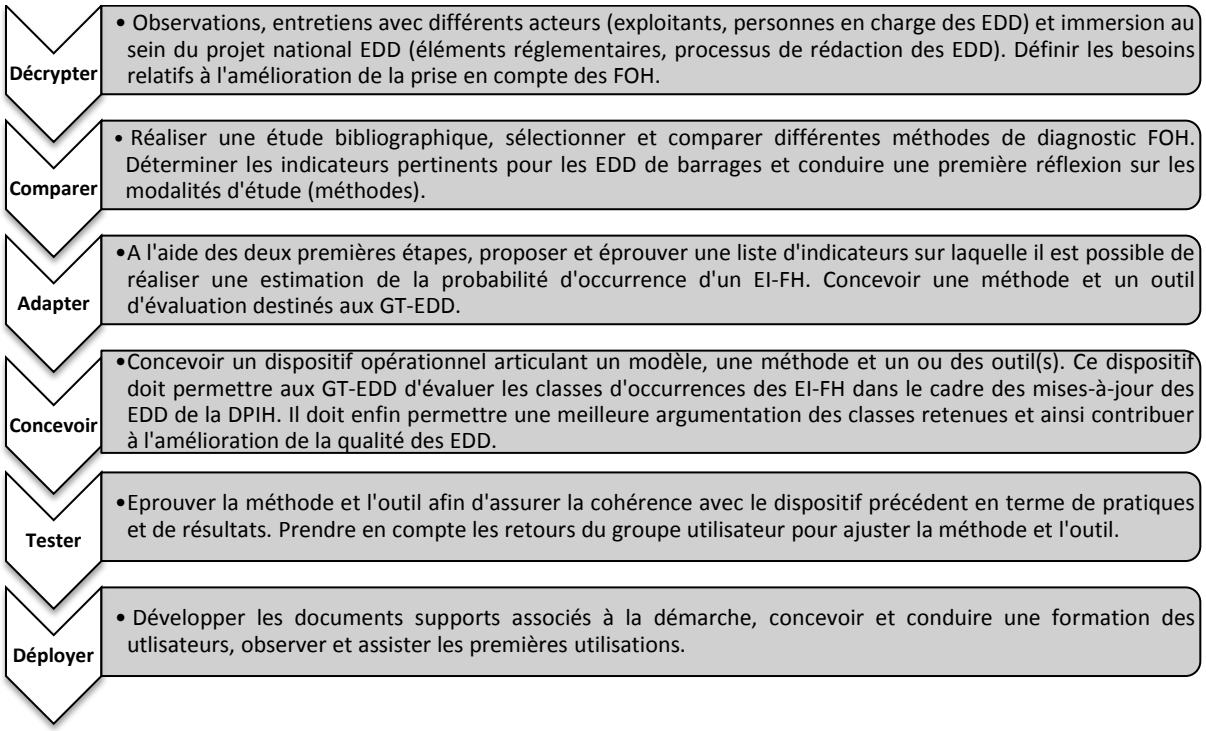

Figure 47 : Processus d'ingénierie d'un dispositif pour améliorer la prise en compte des EI-FH dans les EDD de la DPIH.

3.1. A la croisée des sciences humaines et de l'ingénierie : démarche de conception d'un modèle du facteur humain dédié aux EDD de barrages d'EDF

> « Le problème de l'observateur-concepteur-modélisateur devient capital, critique, décisif. Il doit disposer d'une méthode qui lui permette de concevoir la multiplicité des points de vue, puis de passer d'un point de vue à l'autre ; il doit disposer de concepts théoriques qui au lieu de fermer et d'isoler les entités (physique, biologie, sociologie), lui permettent de circuler productivement... il a aussi besoin d'une méthode qui lui permette de passer d'un point de vue à l'autre [...]. »
>
> (E. Morin, *La Méthode*, T. I, 1977, p. 179)

Le projet de thèse déposé à l'ANRT en septembre 2012 indique que « c'est la création d'une méthode d'analyse des facteurs humains et organisationnels dédiée et adaptée aux EDD et s'inscrivant dans des réflexions à d'autres niveaux (par soucis de transparence et de cohérence nationale) qui motive ce projet de recherche. ». Dans cette optique et afin de consacrer autant de temps que possible aux aspects « dédiés et adaptés aux EDD », il a été décidé, en accord avec le chef de projet EDD, de réaliser une étude comparative (*benchmarking*) de méthodes de diagnostic existantes comme base de travail avant de réaliser, pour le compte des EDD de barrages, l'ingénierie de nos propres modèle, méthode et outil.

3.1.1. Cadre et modalités de conception

Dans cette partie, nous présentons les principaux contributeurs à notre démarche d'ingénierie ainsi que l'organisation qui a été mise en place pour mener à bien ce projet. Nous discutons dans un deuxième temps des différentes modalités d'accès au terrain qui ont été retenues et ont aidé à expliciter puis formaliser l'expression des besoins et un cahier des charges.

Parties prenantes et équipe de conception

Notre démarche d'ingénierie d'un dispositif d'étude des EI-FH s'est trouvée inscrite à la croisée d'attentes et d'exigences diverses. La conception du dispositif a été jalonnée par des réunions de travail mensuelles d'un groupe restreint de cinq personnes qui constituent l'*équipe de conception*. Toutefois, les influences et les effets de ces travaux dépassent largement l'équipe de conception pour s'étendre à différents groupes d'acteurs, voire d'institutions que l'on peut qualifier de *parties prenantes.* Les parties prenantes ont influencé les travaux de l'équipe de conception et/ou ont été influencées par eux, souvent de manière itérative, réciproque et plus ou moins tangible. Pour présenter et situer par rapport à notre projet ces parties prenantes, nous utilisons une matrice de

Martel & Rousseau (1993, p. 23). Adaptée à notre démarche, elle met en évidence la grande hétérogénéité de nature et d'implication de ces acteurs (Tableau 17).

Tableau 17 : Adaptation de la matrice de Martel & Rousseau à notre processus d'ingénierie.

	Participent directement	**Participent indirectement**
Influencent le projet	**- Mission Maîtrise des Risques CIH** **- CRC Mines ParisTech**	- Département Maîtrise des Risques Opérationnels DPIH
Affectés par le projet	–	- Groupes de travail EDD
Influencent et sont affectés par le projet	- Projet-EDD - Groupes de travail EDD	- DREAL

La Mission Maîtrise des Risques (MMR) et le Centre de recherche sur les Risques et les Crises (CRC) ont été les structures les plus influentes dans notre démarche. La MMR est le service du CIH qui a pour objectif d'appuyer la Direction et les autres départements dans leur rôle d'animation et de pilotage du management des risques de l'unité. Elle est rattachée directement à la direction du CIH et couvre trois domaines : sécurité, sûreté et environnement (SSE). Trois des cinq membres de l'équipe de conception sont des membres de la MMR (Tableau 18).

Le Centre de recherche sur les Risques et les Crises (CRC) est un laboratoire de recherche interdisciplinaire des Mines Paristech (PSL) spécialisé dans la réduction des vulnérabilités des organisations (notamment industrielles) et des territoires. Ses travaux visent à améliorer les connaissances et les pratiques de gestion de la sécurité à travers des recherches combinant les sciences de l'ingénieur et les sciences humaines et sociales. Par convention (CIFRE), l'auteur de cette thèse est rattaché à la fois au laboratoire CRC sur le plan académique, pour les développements théoriques, méthodologiques et au service MMR du CIH sur le plan industriel, pour le cadrage et l'opérationnalisation des travaux. La *collaboration* entre industrie et recherche a ainsi été structurelle et pérenne tout au long de notre démarche.

Le Département Maîtrise des Risques Opérationnels (MRO) de la DPIH a également influencé les orientations de l'équipe de conception. Le Département MRO, qui assure au niveau national l'appui à la maîtrise des risques SSE, a contribué aux Comités de Pilotages (CoPil) biannuels de thèse par l'intermédiaire de son chargé de mission sûreté, également Pilote Stratégique du projet-EDD et de son chargé de mission SOH. Ses contributions ont notamment porté sur les choix de conception du dispositif, les modalités de validation des différents livrables et contribué à établir une stratégie de communication et de déploiement, interne et externe à l'entreprise.

Les profils d'acteurs participant aux GT-EDD (exploitants, ingénieurs CVT et pilotes-EDD), ont été impliqués à différents degrés dans notre démarche. Leurs participations aux phases de test, de validation et de déploiement du dispositif ont ainsi permis de recueillir des avis d'utilisateurs à l'aide de questionnaires ou lors d'échanges plus informels. Ces retours des utilisateurs ont ensuite été utilisés pour ajuster notre dispositif aux différents besoins opérationnels. Pour autant, vue leur qualité d'utilisateurs, on peut considérer que les GT-EDD ont essentiellement été *affectés* par notre démarche.

Le projet-EDD, commanditaire du dispositif était représenté dans l'équipe de conception par son chef de projet. Le projet-EDD a joué un rôle prépondérant dans l'établissement du *cahier des charges*

technique du dispositif et dans la définition ou l'ajustement des objectifs opérationnels de notre démarche. Nos livrables, qu'il s'agisse du modèle, de la méthode ou des outils associés, ont été conçus pour intégrer un référentiel méthodologique et des structures régies par le projet-EDD qui a ainsi été aussi bien influent sur la démarche qu'affecté par elle.

Enfin, de manière indirecte, les DREAL ont également influencé le dimensionnement de notre démarche puisque celui-ci s'est appuyé sur un corpus réglementaire normatif et s'est appuyé sur les différents retours de l'Administration au sujet des EDD de première génération (Larouzée, 2012a).

Si la matrice de Martel & Rousseau donne une vision très large des parties prenantes tout au long du processus, la conception du dispositif a été portée par un petit collectif de travail pluridisciplinaire que nous avons qualifié d'*équipe de conception*. Dès la première année de thèse, un groupe de travail (Tableau 18) a été constitué pour assurer la diversité des regards et des participations mais également le suivi et le pilotage de la démarche. Cette équipe s'est réunie au pas mensuel afin de valider l'avancement du processus de conception et ses livrables intermédiaires.

Tableau 18 : Composition du groupe de travail et contributions de ses membres aux EDD de la DPIH.

Nom	Qualité	Contribution aux EDD
P. Codron	Tuteur en entreprise	Rédaction Traitement de réponses à l'administration
B. Delprat	Chef de projet EDD	Pilote opérationnel
F. Guarnieri	Directeur de thèse	Sans objet
J. Larouzée	Doctorant CIFRE, CIH-CRC	Conception méthode FH Traitement de réponses à l'administration
J. Planès	Ingénieur sûreté	Membre du comité de validation des EDD Contributeur vérificateur technique contrôle commande

Ce mode de travail en petit collectif pluridisciplinaire a permis de favoriser l'investissement des différents membres dans la durée. La dynamique collective a été exploitée à travers des méthodes telles que le *brainstorming* ou les *exercices multi-aveugles.* Globalement, le travail en groupe a facilité la percolation réciproque des connaissances académiques et des expériences (ou réalités) industrielles. Les limites de cette approche ont essentiellement été liées aux disponibilités, voire aux coûts de mobilisation, des membres du groupe (pour certains très éloignés géographiquement). Le double attachement contractuel de l'auteur de ce manuscrit (MMR du CIH et CRC des Mines Paristech) a permis de garantir l'implication constante de ces deux parties prenantes principales tout au long du projet.

La conception d'un dispositif FOH pour les EDD recouvre un aspect innovant pour une unité d'ingénierie hydraulique. En témoigne le prix du *Challenge Innovation du CIH*, décerné au Guide FH 2012. Afin d'assurer le caractère pragmatique et opérationnel de nos travaux, nous avons rapidement identifié le besoin de collecter des informations sur le terrain qui permettraient d'orienter nos réflexions. Un dispositif a donc été mis en place afin de permettre l'observation et la remontée d'informations concernant l'exploitation d'ouvrages hydrauliques du parc EDF d'une part et du fonctionnement des GT-EDD durant l'intégralité du processus de production d'une EDD, de son enclenchement à sa livraison.

Accès au terrain

L'accès au terrain a été pensé suivant deux objectifs distincts. Le premier besoin portait sur l'observation *in situ* des réalités opérationnelles d'exploitation des ouvrages hydrauliques comme pré requis à sa modélisation. Le second était d'obtenir la connaissance la plus fine possible du fonctionnement, des enjeux et des moyens d'action des GT-EDD tout au long d'un processus éprouvé que nous devions appréhender, intégrer et en partie modifier.

L'observation des réalités opérationnelles d'exploitation suppose une immersion suffisamment longue au sein d'une équipe donnée pour diminuer les perturbations qu'induit tout observateur étranger, explorer la diversité des situations quotidiennes et ébaucher une cartographie des rôles et responsabilités des différents acteurs de l'exploitation. Idéalement, ce type d'observation doit être étendu et reproduit à différentes équipes en fonction du réalisme souhaité du modèle final. Cet objectif s'est avéré délicat à atteindre pour diverses raisons telles que la charge de travail des équipes d'exploitation diminuant leurs capacités d'accueil d'un observateur ou encore la grande variabilité des activités d'exploitation en dehors ou durant les épisodes de crues, difficilement prévisibles à plus de quelques jours. Une immersion d'une semaine a été réalisée en octobre 2013, dans le GU de Saint Guillerme (UP Alpes). Ce GU a été retenu car il regroupe différents types d'ouvrages et d'usines hydroélectriques. La durée d'une semaine s'est avérée courte au regard des objectifs et a été consacrée à la découverte des installations, des différents métiers et de l'organisation interne des GU. L'accueil très favorable de l'ensemble des acteurs qui se sont montrés ouverts aux échanges et aux présentations de leurs activités a toutefois permis de tirer profit cette immersion pour la modélisation des activités d'exploitation. Une visite annuelle de la DREAL sur l'un des barrages du GU a également permis d'observer l'un des temps concrets de la relation de contrôle, par ailleurs manifestée à travers des échanges de courriers et de dossiers réglementaires comme les EDD.

Affiner la connaissance concrète du fonctionnement des GT-EDD a supposé des modalités différentes d'accès au terrain. L'objectif était de multiplier les séances d'observation participante pour construire une représentation à partir de différents GT-EDD et à différents points du processus de rédaction de l'EDD. Ainsi, entre 2012 et 2015 une dizaine de GT-EDD ont été observés soit de manière transverse (différents groupes, sur différentes EDD pour le même temps du processus) soit de manière suivie (un seul groupe, une seule EDD, de l'enclenchement à la livraison). L'observation participante supposait de contribuer aux échanges du GT-EDD, lors des visites ou des réunions d'analyse des risques, notamment dans le domaine FOH. Ces séances répétées ont permis de renseigner les modalités d'action concrètes des différents membres des GT-EDD, de constater les rapports de force existant au sein de ceux-là, de constater les déterminants des recours effectifs aux documents méthodologiques ou *a contrario,* l'usage d'heuristiques dans les réflexions. Une attention particulière a naturellement été portée sur les modalités d'appréciation des éléments liés au facteur humain, l'utilisation du Guide FH 2012 et plus globalement les « représentations » des acteurs sur « l'objet » FH. Ces immersions ont également fourni les opportunités de nombreux échanges informels avec des exploitants, des CVT, des pilotes-EDD de bureaux d'études. Enfin, un CoVa-EDD a également été observé afin de déterminer les modalités de validation finale des EDD avant leurs livraisons. Ces différents échanges et nombreuses séances d'observation-participante se sont avérés précieux pour définir les besoins, de natures différentes, concernant l'évolution du référentiel méthodologique que devait générer notre démarche.

A posteriori, il est possible de considérer que les nombreuses visites d'ouvrages réalisées avec des GT-EDD ont petit à petit réduit les limites de l'unique immersion en GU. Ces visites, accompagnées par des membres de l'exploitation (techniciens, managers), conduisent en effet à l'évocation des évènements d'exploitation passés (REX), formels ou informels et offrent un temps privilégié de questionnement des exploitants qui se trouvent alors sur leurs lieux de travail.

Tableau 19 : Résumé des modalités d'accès aux terrains, cibles et méthodes.

Cible d'étude	Réalités d'exploitation	Réalités d'exploitation	Fonctionnement GT-EDD
Lieux	Groupement d'Usines	Visites d'ouvrages EDD	Différentes EDD, différents stades
Méthodes	Immersion « temps long » Observation non-participante Posture d'étonnement	Multiplication « temps courts » Entretiens libres Questions de relance	Multiplication « temps courts » Observation participante Grille d'observation

Les données recueillies par ces différents accès au(x) terrain(s) ont été utilisées pour préciser le cadre de conception de notre dispositif.

Expression du besoin et cahier des charges

Notre démarche s'est construite de façon empirique et progressive autour de deux axes forts : les particularités des ouvrages hydrauliques et les contraintes spécifiques à la rédaction des EDD. L'objectif était de produire un dispositif pragmatique et opérationnel, à même de s'insérer, à moindre coût, dans un cadre méthodologique et culturel préexistant.

Spécificités des ouvrages hydrauliques

Les processus en jeu dans la production d'hydroélectricité, l'exploitation des ouvrages et par extension, la gestion de leur sécurité, sont radicalement différents de ceux en jeu dans d'autres secteurs industriels, y compris de l'énergie.

Ce serait un truisme d'affirmer qu'un barrage et une centrale nucléaire sont des systèmes sociotechniques incomparables. Pourtant, certaines différences de ces systèmes sont structurantes pour le développement d'un dispositif FOH, ainsi il convient d'insister à ce sujet. Le processus hydraulique peut être caractérisé par :

- Une *cinétique* des phénomènes pouvant être relativement lente. En ce qui concerne les phénomènes *agresseurs* de l'ouvrage, bien que l'hydrologie et les caractéristiques structurales d'un bassin versant ou d'une retenue induisent une variabilité forte des cinétiques d'exhaussement des plans d'eau, l'unité de mesure de ces phénomènes est l'heure voire le jour. En ce qui concerne les conséquences d'éventuels gestes inappropriés d'exploitation, leurs effets sont graduels[208] dans le temps et fonction, par exemple, de la vitesse d'ouverture d'une vanne. A titre de comparaison on peut mentionner les cinétiques exprimées en secondes ou fragments de secondes dans certaines réactions chimiques présentant des risques (explosion, gaz nocifs) et en jeu dans d'autres processus industriels, par ailleurs classés ICPE au même titre que les grands barrages.

[208] Cette remarque est faite à l'exception des phénomènes de ruptures totales et instantanées d'ouvrages ou d'équipements.

- Une bonne *représentabilité cognitive* des phénomènes. Sur le plan conceptuel, bien que l'exploitation d'ouvrages hydrauliques demande des connaissances et un professionnalisme indéniables, le phénomène d'écoulement de l'eau à travers les conduites et les vannes est plus aisé à représenter mentalement, plus accessible conceptuellement, que des phénomènes en jeu dans la mécanique du vol ou la fission nucléaire. Cette remarque ne saurait être totalement indépendante de la remarque précédente sur la cinétique des phénomènes en jeu.
- Une capacité de *perception physique* des actions sur le système. La plupart des locaux de conduite sont équipés de fenêtres donnant sur l'ouvrage et ses vannes, des dispositifs d'éclairage sont prévus pour l'exploitation de nuit. Certaines actions sont effectuées directement dans les locaux des vannes. Par conception, les barrages offrent donc la possibilité de percevoir[209] directement les effets des actions qui s'ajoutent aux retours *instrumentés* des capteurs et de l'IHM. Ces retours physiques offrent donc une redondance qui n'est pas présente dans certaines *salles aveugles* depuis lesquelles d'autres processus industriels sont contrôlés.
- La *réversibilité* de certaines actions est enfin rendue possible par l'ensemble des singularités exposées ci-dessus. Les cinétiques lentes, la capacité à intellectualiser le processus et surtout à accéder à un *retour physique* d'informations facilitent le rattrapage d'un certain nombre d'actions dont les effets s'avèreraient indésirables. Si le mélange inopiné de deux réactifs chimiques peut conduire à une explosion, irréversible, l'ouverture indésirable d'une vanne peut être corrigée par un ordre à la fermeture.

Ces spécificités de l'hydraulique sont fondamentales dans le cadre de notre démarche. En effet, nous avons rappelé que les travaux sur les FOH ont été historiquement développés par et pour des secteurs industriels tels que l'aéronautique, le nucléaire, les secteurs pétroliers et plus tardivement médicaux (1.3.2 et 2.1.1). Nous avons donc cherché à déterminer dans quelle mesure de telles connaissances étaient transposables directement ou, au contraire, devaient être adaptées pour rendre compte de l'exploitation des barrages de la DPIH.

La comparaison des systèmes sociotechniques proposée par Perrow offre un cadre théorique intéressant, particulièrement dans sa version reprise et modifiée par Hollnagel & Speziali afin de déterminer les méthodes d'accidents qui peuvent-être employées en regard du type de système à étudier. Perrow (1984) propose une première classification des systèmes sociotechniques en fonction de leurs degrés de *couplage*[210] et de la nature de leurs *interactions*[211]. Hollnagel & Speziali (2008) reprennent cette classification qu'ils modifient en remplaçant la notion d'*interactions* par celle de *représentabilité* (*description*) qui varie de *maniable* (*tractable*) à *non-maniable* (*intractable*). Le terme *maniabilité* se réfère en substance à la capacité de *décrire* l'état du système à un instant donné. « *A system, or a process, is tractable if the principles of functioning are known, if descriptions*

[209] Les perceptions peuvent être visuelles (intumescence hydraulique, débit de sortie d'une vanne, écume), auditives (bruit des moteurs des vannes ou des vannes elles-mêmes) ou encore se manifester par des vibrations surtout ressenties depuis les commandes locales (à même la chaîne cinématique de la vanne) lors du passage de l'eau.

[210] Relatif à l'interdépendance des activités et des processus du système, le couplage varie de *large* (*loose*) à *étroit* (*tight*).

[211] Dépendant du nombre de composants du système et de la présence ou non de boucles de rétroactions, les *interactions* varient de *simples* à *complexes.*

are simple and with few details, and most importantly if the system does not change while it is being described. Conversely, a system or a process is intractable if the principles of functioning are only partly known or even unknown, if descriptions are elaborate with many details, and if the system may change before the description is completed. » (*op. cit.*, p. 24). Les auteurs utilisent ces critères pour actualiser la classification des systèmes sociotechniques de Perrow (Figure 48) et exploitent cette nouvelle classification pour associer des méthodes d'enquête accident à certains types de systèmes plutôt qu'à d'autres. « T*he primary concern must be whether an investigation method can do what it is supposed to do, namely produce an adequate explanation or account of why an adverse event (an accident or an incident) occurred. An investigation method is basically a tool, and it is clearly crucial that the tool is well-suited to the task at hand. Although most tools can be used for different purposes – a wrench can, for instance, be used as hammer – it is obviously better and more efficient if the tool fit the job precisely. This goes for physical tools as well as for methods.* » (*op. cit.*, p.23).

Ces travaux sont appliqués aux méthodes d'enquête accident, toutefois, la réflexion proposée par les auteurs sur la nécessaire adéquation entre un *outil* et la *tâche* à réaliser est directement transposable aux méthodes de diagnostics proactifs qui nous concernent.

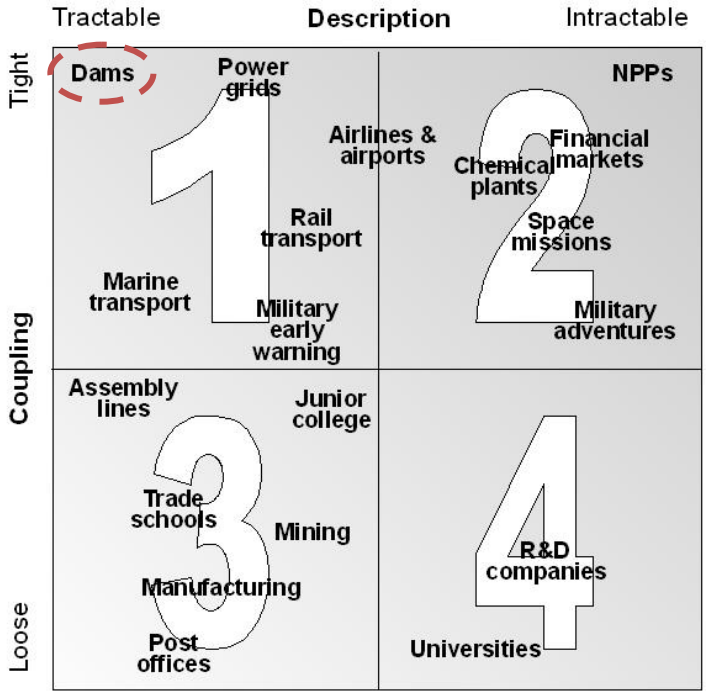

Figure 48 : Classification de différents types de systèmes sociotechniques dans le plan « représentabilité ; couplage ». On remarque la position singulière des barrages (cercle rouge) avec un couplage serré et une importante capacité à décrire l'état du système à un instant donné. D'après Hollnagel & Spieziali (2008).

Les barrages se situent à l'extrémité supérieure gauche de cette classification. Cette position exprime un *couplage serré* (le processus implique des séquences d'activité non interchangeables, un manque d'équipement ou de personnel peut s'avérer rapidement pénalisant) et une grande *maniabilité* qui rend compte d'une des spécificités du processus hydraulique que nous avons développée précédemment (il est aisé de se représenter les principes physiques en jeu et les changements d'état admettent une cinétique relativement lente – les crues, par exemples, peuvent aujourd'hui être prévues quelques jours à l'avance).

L'objectif des auteurs de l'étude est de caractériser les méthodes d'enquête accident en fonction des systèmes pour lesquels elles sont appropriées. C'est-à-dire, lorsque le modèle d'accident sous-jacent à la méthode permet de rendre compte du couplage et de la représentabilité du système étudié.

> « *A simple linear accident model – such as the domino model (Heinrich, 1931) – can be used to account for certain types of accidents and not for others. The domino model is suitable for systems – hence for accidents – that are loosely coupled and tractable. The reason is simply that most systems were of that type at the time it was developed. Nuclear power plants considered as systems are, however, tightly coupled and more or less intractable. They therefore require accident models and accident investigation methods that are capable of accounting for these features. It is therefore reasonable to characterise investigation methods in terms of which applications they can account for.* » *(op. cit.,* p. 27).

Après avoir présenté leurs objectifs et leur modification de la classification de Perrow, les auteurs comparent neuf méthodes d'enquête accident qu'ils situent dans le même plan que les systèmes sociotechniques (représentabilité – couplage). Notons que certaines méthodes d'enquête peuvent également être utilisées pour le diagnostic proactif comme c'est le cas des deux méthodes retenues : CREAM et Tripod (ici SCM).

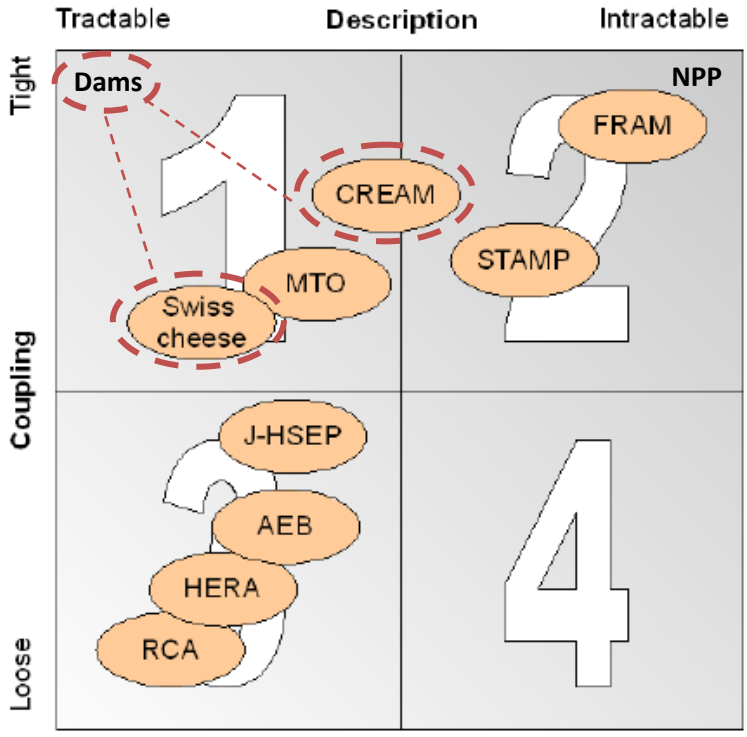

Figure 49 : Classification des méthodes d'analyse d'accidents représentant les barrages (dams) et deux des méthodes exploitées dans notre démarche de conception d'un dispositif FOH pour les EDD : Tripod (SCM) et CREAM. (D'après Hollnagel & Speziali, 2008).

Bien que ce diagramme et cette classification soient discutables[212], ils soulignent les différences entre les barrages et les principaux systèmes sociotechniques qui ont accompagné le développement des connaissances, des modèles et des méthodes FOH (on note l'opposition symétrique, sur l'axe

[212] Nous défendrions, par exemple, que les barrages pourraient voir leur position sur l'axe des ordonnées revue à la baisse (pour les rapprocher du « transport maritime », sur la Figure 48). Cette remarque n'affecte pas le reste de la démonstration.

horizontal, entre les barrages et les centrales nucléaires[213]). Cette différence structurelle et de processus entre les systèmes sociotechniques apporte un élément supplémentaire pour expliquer l'absence d'un solide état de l'art FOH dans la gestion de la sécurité des barrages (1.3.1). Cette classification permet enfin de justifier que nous intégrions certaines méthodes existantes (CREAM, Tripod) dans nos réflexions mais que nous puissions en exclure d'autres *a priori*, notamment celles spécifiquement adaptées aux systèmes sociotechniques à fort couplage et faible maniabilité comme, par exemple, FRAM ou STAMP.

Contraintes spécifiques à la rédaction des EDD

Les EDD s'inscrivent dans un cadre législatif et un référentiel méthodologique industriel que nous avons décrits en détail dans les chapitres précédents (partie 1.2.2). Les EI-FH, comme tous les autres types d'EI, s'évaluent en termes de classes d'occurrences (qui correspondent à des plages de probabilités annuelles d'occurrence des évènements). Cette échelle qui s'étend de A à E est réduite de A à C pour les EI-FH[214].

Notre démarche consistait donc à produire un dispositif permettant d'estimer la classe d'occurrence de l'ensemble des EI-FH d'une EDD, dans le cadre de sa mise-à-jour, par un groupe de travail pluridisciplinaire sans connaissances FOH *a priori*. Le temps de travail en salle nécessaire à l'étude des EI-FH ne devait pas excéder deux heures mais il a été acté que du temps hors séances GT-EDD pouvait être exploité. Enfin, la méthode devait garantir la cohérence inter-EDD, notamment dans la profondeur des études d'EI-FH, la structure et la quantité des éléments retranscrits dans l'EDD pour soutenir le choix d'une classe d'occurrence (notion de *grain* de l'EDD).

Dans ce contexte, il a été nécessaire de penser un formalisme de recueil d'informations en termes d'effets produits sur l'utilisateur. Un formalisme trop simplificateur associé à un très haut niveau de guidage (*check lists*, questionnaire à questions fermées) permet un traitement quantitatif simple et assure une forte cohérence inter-EDD mais exclut au maximum la subjectivité de l'utilisateur et présente un risque d'altérer voire d'empêcher la remontée d'informations essentielles ou encore de démobiliser l'utilisateur. *A contrario*, un formalisme qui offrirait de rendre compte de la complexité du réel par une grande ouverture ou un faible guidage (questions ouvertes et génériques), présente le risque d'une mauvaise gestion du temps imparti aux GT-EDD, de rendre les traitements quantitatifs délicats, de diminuer la comparabilité inter-EDD et risquerait enfin d'*inhiber* un utilisateur qui ne possèderait aucune connaissance FOH spécifique.

En plus des modalités de recueil d'informations, les modalités d'analyses devaient également assurer la comparabilité inter-EDD et la meilleure expression possible du groupe de travail. Notre problématique était de déterminer une méthode et des outils associés garantissant le meilleur équilibre possible entre la subjectivité de l'utilisateur (en réalité d'un groupe d'utilisateurs) et la cohérence globale des résultats. Notons que la subjectivité du GT-EDD ne peut, ni ne doit, être écartée de la méthode car elle conditionne la variété des éléments qu'il est possible de recueillir dans les documents d'exploitation et lors de la visite de l'ouvrage ou encore de faire émerger les échanges pluridisciplinaires sur lesquels repose l'analyse de risques.

[213] NPP pour *Nuclear Power Plants.*

[214] L'équipe de conception a travaillé sur la question d'ouvrir cette échelle à la classe D (improbable). Ce choix a été écarté sur la base d'arguments (plus opérationnels que théoriques).

La méthode a enfin pour objectif de poursuivre le changement de représentation du facteur humain initié par le Guide FH 2012. Dans son fond et sa forme, elle doit donc rendre compte d'aspects potentiellement positifs du facteur humain, diminuer le recours au terme *erreur* et surtout permettre la meilleure expression possible de l'exploitant, de sa connaissance des installations et de ses réalités opérationnelles, dans la cotation des EI-FH.

Le « paradoxe » de l'EDD

La distinction entre *facteur humain* et *facteur organisationnel* a fait l'objet de considérations théoriques et pratiques lors des premières réunions de conception du dispositif. Si l'amalgame de ces deux aspects de la gestion de la sécurité sous le sigle FOH permet un discours (et un regard) intégrateur, l'exercice de conception d'un modèle, d'une méthode et d'outils nous a incité à déterminer une position et un cadre conceptuel pour nos travaux. Le projet de thèse fait état des dimensions « humaines » et « organisationnelles » en jeu dans l'exploitation d'un barrage sans discrimination. Ces deux dimensions sont interconnectées et l'impact des facteurs organisationnels sur les activités des individus (facteur humain) est l'un des fondements de la théorie de l'accident organisationnel (voir par exemple le MAO Mk II – Figure 30, p. 127). Il est donc aujourd'hui largement partagé que la recherche d'efficience dans les démarches de gestion de sécurité ne permet d'exclure aucun de ces deux aspects.

Une distinction entre *humain* et *organisationnel* est toutefois nécessaire dans l'exercice de conception de modèles, de méthodes ou d'outils. En effet, ces deux aspects de la sécurité comportent des différences épistémologiques et donc méthodologiques. L'étude du *facteur humain*, centrée sur l'individu et ses interactions avec son environnement, mobilisera des modèles essentiellement issus de la psychologie cognitive dans une approche microscopique (l'activité, le comportement). L'étude du *facteur organisationnel,* à portée plus macroscopique, s'intéresse aux structures d'un système, à ses défenses et aux dispositions en place pour encadrer les activités de différents acteurs. Elle mobilise donc essentiellement des approches issues de la sociologie des organisations ou de la théorie des systèmes. Il n'existe donc pas de frontière rigide entre ces deux aspects de la sécurité mais des postures différentes.

Nous avons considéré ces deux approches conceptuelles en rapport avec les contraintes opérationnelles de notre projet. Déterminer des classes d'occurrences d'évènements liés à des gestes d'exploitation (EI-FH associés à des *gestes inappropriés*[215]) semble naturellement indiquer une approche *humaine* et plus particulièrement des méthodes de type HRA[216]. Pourtant, la fréquence réglementaire d'actualisation des EDD, fixée à 10 ans, s'avère peu compatible avec l'évaluation de phénomènes aussi dynamiques que les activités d'un opérateur ou son comportement. Cette temporalité tendrait à rendre plus légitime l'étude de structures organisationnelles relativement stables dans le temps et donc, une approche *organisationnelle.* En d'autres termes, la fréquence d'actualisation de l'EDD en fait une démarche de *précaution* plutôt que de *prévention.* En effet, la démarche de précaution s'inscrit dans le temps long et porte sur la gestion de l'incertitude là où la démarche de prévention, inscrite dans un temps plus court, porte sur des risques identifiés. Nonobstant la temporalité, il nous faut exploiter les méthodes et les outils d'analyses de risques

[215] Ou des *erreurs humaines* dans les EDD antérieures à 2012.

[216] *Human Reliability Assessment,* terme générique désignant les méthodes permettant d'estimer de manière probabiliste la réussite ou l'échec d'une action humaine.

préexistant dans l'EDD, les FOH doivent s'insérer dans des nœuds papillon, leurs approches par *scénarios* et estimations de *classes d'occurrences*. La variabilité de l'individu et l'approche microscopique des risques proposée par les scénarios des EDD orientent vers la conception d'une méthode *facteur humain* à fins de prévention (l'EDD propose des mesures de réduction et de non-aggravation des risques). Dans le même temps, la temporalité de l'EDD (mises à jour décennales) et le caractère dynamique des opérateurs, dans leurs activités ou dans leurs carrières, orientent vers la conception d'une méthode *organisationnelle* à des fins de précaution.

Cette opposition entre *facteur humain* et *facteur organisationnel* induit des contradictions logiques, nous parlons ainsi du *paradoxe de l'EDD*. Ce *paradoxe* est un point de départ plutôt qu'une voie sans issue puisqu'il contribue à justifier le caractère *d'ingénierie* de notre démarche qui a visé la meilleure intégration possible entre les considérations conceptuelles, incarnées par les parties prenantes académiques et les considérations techniques et réglementaires, incarnées par les parties prenantes industrielles et les organismes de contrôle, de façon indirecte.

Les *processus d'ingénierie* ou les *méthodes de l'ingénieur* ont été étudiées et définies par Koen (1985) comme relevant toutes de « *la stratégie suivie pour causer le meilleur changement dans une situation mal comprise ou incertaine, considérant les ressources disponibles* » (*op. cit.,* p. 5). Elles se distinguent donc de la *raison* qui est l'aptitude à distinguer le vrai du faux (bon sens cartésien). Koen distingue plusieurs caractéristiques d'un problème d'ingénierie :

- Le changement : le point final d'un projet d'ingénierie est inconnu, tout comme la démarche pour y parvenir. Si le but est connu, l'ingénieur ne peut pas prédire le(s) changement(s) qu'il va causer. Tout au long de sa démarche, il choisit parmi les alternatives qui s'offrent à lui les plus adéquates. Le but même de la démarche peut être amené à évoluer au cours de celle-ci.
- Les ressources : diverses contraintes s'appliquent à l'ingénieur lors de son choix du *meilleur changement possible*. Le temps disponible pour le projet, le coût économique ou l'opinion publique par exemple conditionnent la méthode de l'ingénieur (*op. cit.,* p. 9). L'ingénieur se distingue donc du scientifique car il ne cherche pas *la Solution* mais il formule *une solution*, qui lui semble la meilleure, étant donnés les ressources disponibles (et sa subjectivité).
- L'optimisation : les processus d'ingénierie ne se fondent pas sur la *réalité* mais sur la *représentation sociale* de celle-ci. S'ajoutent donc à la *réalité* des éléments subjectifs comme la facilité d'une méthode de fabrication ou la nécessité économique d'un module particulier. Koen note que l'optimum, le meilleur, pour le concepteur peut ne pas l'être pour l'utilisateur.

D'après ces éléments, Koen affirme : « *si on souhaite provoquer un changement dans une situation complexe et incertaine, que seul le meilleur changement possible est acceptable et que les ressources disponibles sont limitées, on est en présence d'un problème d'ingénierie.* » (*op. cit.,* p. 14). Pour parvenir à ses fins dans de telles conditions l'*ingénieur* recours aux *heuristiques*[217] reconnaissant qu'il n'est jamais face à l'absolu, au garanti ou au déterministe. Dans le cadre de notre démarche de conception d'un dispositif d'étude des EI-FH, nous avons effectué le choix d'une approche *facteur*

[217] Egalement nommées « intuitions », « techniques », « astuces », « pif ». Ces dénominations sont toutes révélatrices de l'*incertitude* qui caractérise l'heuristique qui ne garantit pas de résoudre le problème, peut contredire d'autres heuristiques et dont l'acceptation dépend du contexte spécifique de la démarche, non d'un standard absolu.

humain, centrée sur l'individu ou un petit collectif, concernant la méthode et les outils tout en ouvrant notre modèle aux principales *dimensions organisationnelles.* Ce choix permet de se conformer à l'esprit des prescriptions réglementaires, en étudiant les gestes professionnels tout en adoptant la TAO comme cadre conceptuel.

Face au *paradoxe* (conceptuel) de l'EDD et afin d'optimiser notre travail de conception en favorisant la collaboration au sein de notre groupe de travail pluridisciplinaire, nous avons souhaité rendre univoque certains éléments clefs de notre réflexion. Nous avons donc cherché à adopter ou modifier des définitions des termes facteur *humain* et *erreur humaine,* qui pourraient être partagées. Ces définitions fonctionnelles n'ont pas la prétention de constituer des contributions académiques ou universelles.

Définitions de travail

Pour formuler une définition de travail de *facteur humain* nous avons souhaité revenir sur la définition du terme « facteur ». Il est défini par la 9ème édition du Dictionnaire de l'Académie Française comme « *un des éléments qui concourent à un résultat* » (Académie Française, 2015). Cette première définition renvoie à la notion de « résultat ». Les résultats, ou les effets attendus d'actions, peuvent être multiples (qualité, performance, sécurité…), le terme est lui-même défini comme « *ce qui s'ensuit d'un évènement* » (*op. cit.*) et ne sous-entend donc pas de présupposé positif ou vertueux. Une distinction doit donc exister entre « facteur humain » et « erreur humaine » bien que dans les représentations, les deux idées soient liées. Notre définition souligne donc que le facteur humain peut être ou positif ou négatif :

« *Le facteur humain (dans les EDD d'EDF) est l'ensemble des interactions entre un opérateur et son environnement (naturel, technique, humain, organisationnel et social) dans le cadre de ses activités d'exploitation d'un barrage*[218]*. Ces interactions contribuent le plus souvent à la maîtrise des fonctions de sécurité de l'ouvrage. Plus rarement, elles peuvent concourir à un accident*[219]*.* »

L'erreur humaine peut se définir à un premier niveau comme la *non atteinte* d'un objectif et exprime donc un présupposé négatif à l'exception des cas de sérendipité[220] (Reason, 2013). Dans le cadre de notre projet, nous utilisons la définition de travail d'*erreur humaine* proposée par James Reason (1990b) que nous n'avons pas jugé nécessaire d'adapter ou de modifier :

> « *Le terme d'erreur sera pris en un sens générique, qui couvre tous les cas où une séquence planifiée d'activités mentales ou physiques ne parvient pas à ses fins désirées et quand ces échecs ne peuvent être attribués à l'intervention du hasard* » (Reason, 1990b, p. 33)

L'évolution en 2012 du référentiel méthodologique pour la cotation des EI-FH dans les EDD portait une volonté de limiter l'usage du terme *erreur humaine*. Ce guide précise qu'afin « *d'éviter toute ambigüité sur l'événement initié par le « facteur organisationnel et humain », il convient d'identifier*

[218] Au sens du Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007, barrage de retenue et ouvrages assimilés, notamment les digues de canaux (MEDAD, 2007).
[219] Au sens de l'Arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu (MEEDDAT, 2008).
[220] La sérendipité désigne une découverte ou une invention faite accidentellement, à la suite d'un concours de circonstances fortuit et ceci souvent dans le cadre d'une recherche orientée vers un autre sujet. Des exemples célèbres de sérendipité sont l'invention du velcro ou la découverte de la pénicilline.

clairement, au niveau de l'EI (et surtout de son argumentaire), le geste professionnel objet du dysfonctionnement redouté. Il s'agit donc de privilégier la désignation de l'EI en des termes précisant la situation de travail » et précise explicitement qu'il « *est recommandé d'éviter les formulations qui orientent sur une cause qui désignerait l'opérateur comme cause unique, la philosophie retenue étant que son action s'inscrit dans une activité et une situation de travail dont la part est tout aussi importante dans la cause explicative. Ainsi on évitera d'utiliser les termes de « erreur humaine » ou encore « écart d'application de consigne* ».[221] Cette volonté de maintenir le terme *geste inapproprié* dans nos livrables a été réaffirmée par le projet-EDD.

En termes de posture, nos travaux ont été pensés pour fournir une classe d'occurrence d'EI-FH, ils mobilisent des notions de psychologie cognitive et s'intéressent au comportement humain et aux actions d'un opérateur ; ce faisant, loin d'exclure les apports de l'approche organisationnelle, ils en interrogent certains aspects. Ce choix relève d'une approche heuristique visant à produire le meilleur changement possible tout en considérant nos ressources et nos contraintes, aspects caractéristiques de la méthode d'ingénierie identifiés par Koen.

Après la définition des acteurs, le choix d'un mode de travail, l'énoncé des contraintes contextuelles, du cahier des charges et la définition des termes *facteur humain* et *erreur humaine,* nous avons entrepris l'étude comparative (*benchmarking*) de différentes méthodes de diagnostic FOH.

3.1.2. Etude comparative et adaptation : proposition d'un modèle FOH dédié aux EDD

Pour atteindre notre objectif, il a fallu penser à la fois le développement d'un modèle et une méthode. Le modèle ayant pour but de *représenter* et *mettre en discussion* les FOH dans la gestion de la sécurité des barrages. La méthode, de permettre à un groupe de travail *déterminé* d'estimer selon une échelle *donnée* de classes d'occurrences, la probabilité d'une erreur humaine, d'un geste inapproprié ou encore, d'un « EI-FH ».

Notre démarche, influencée par la TAO[222], cherche à exprimer les influences de l'organisation et des espaces physiques de travail sur l'émergence de gestes inappropriés ou d'actes non-sûrs. En conséquence, le modèle a été construit sur la base d'un nombre limité de paramètres à même d'influencer l'action de l'opérateur (métaphore des agents pathogène de la TAO). La méthode est ensuite destinée à exploiter leurs analyses afin d'estimer une *classe d'occurrence* pour chaque EI-FH.

Pour déterminer le nombre et la nature des indicateurs nécessaires, nous avons réalisé une étude comparative de différentes méthodes de diagnostics proactifs FOH.

Sélection des méthodes à comparer

Il existe un nombre important de méthodes de diagnostics proactifs FOH et des études comparatives sur leurs fondements, leurs domaines d'efficience et leurs modes opératoires ont été produites avec différents objectifs (e.g. Boring *et al.*, 2010 ; Stanton *et al.,* 2013). Dans le cadre de notre démarche,

[221] Extrait du Guide FH 2012, document interne.
[222] À travers l'étude bibliographique de James Reason (2.2) et la percolation de ces connaissances académiques aux différents acteurs du projet.

nous avons croisé des critères *théoriques* et *empiriques*. Vues les contraintes en matière de temps disponible et de compétence des utilisateurs induites par l'exercice EDD, notre choix a été de ne retenir qu'un nombre réduit de dimensions pour construire notre dispositif. En conséquence, les méthodes comparées ne devaient pas présenter un nombre trop élevé d'indicateurs. Pour être retenues, les méthodes devaient correspondre aux barrages selon les critères définis par Hollnagel & Speziali (2008) et en outre faire l'objet, soit d'un retour d'expérience important dans leur utilisation sur des sites industriels, soit avoir été développées par ou pour EDF (Tableau 20).

Dans leur rapport de recherche SKI, Hollnagel & Speziali (2008) indiquent que les méthodes Tripod[223] et CREAM ont des modèles sous-jacents et des modes opératoires compatibles avec les problématiques de gestion de la sécurité des barrages. Nous avons donc retenu ces deux méthodes. Le choix de l'approche FOP correspond au critère de méthode développée pour ou par EDF. Enfin, pour intégrer une méthode spécifique aux barrages, nous avons choisi de retenir la méthode, alors en vigueur, de cotation du facteur humain dans les EDD. Ce dernier choix permettait aussi d'assurer une cohérence entre les EDD de première et de deuxième génération et d'observer plus directement les effets sur l'analyse des modifications apportées par nos travaux.

Tableau 20 : Méthodes sélectionnées et critères de choix. Tripod et CREAM ne sont pas spécifiques aux ouvrages hydrauliques mais « adaptées » par leurs modèles sous-jacents et modes opératoires. La méthode FOP a été développée par la R&D d'EDF et le Guide FH 2012 était, à notre connaissance, la seule méthode dédiée aux barrages.

	Bénéficie d'un REX significatif	Développée par ou pour EDF	Spécif. ouvrages hydrauliques
Tripod	X		X
CREAM	X		X
FOP		X	
Guide FH 2012		X	X

Pour déterminer les dimensions nécessaires à la construction de notre propre modèle et méthode, nous avons examiné ces quatre méthodes, que nous décrivons brièvement[224] ci-dessous, puis comparé leurs indicateurs à l'aide d'un tableau de synthèse.

La méthode Tripod

Dans un contexte de mauvaises performances en matière de sécurité, le groupe Royal Dutch / Shell cherche, dans les années 1980, un moyen d'améliorer son management SSE. D'importants budgets sont alors mobilisés et conduisent en 1986 à la mise en place d'un ambitieux programme de recherche en collaboration avec une équipe de psychologues composée de Reason, Wagenaar et Hudson (Groeneweg & Roggeveen, 1998). Reprenant les travaux sur l'erreur humaine de James Reason et ses réflexions naissantes sur l'*accident organisationnel* ils réalisent de nombreuses

[223] Les auteurs indiquent précisément le « SCM » qu'ils considèrent *de facto* comme une *méthode*. Tripod repose sur la TAO et a comme modèles sous-jacents les MAO de James Reason.
[224] A l'exception du Guide FH 2012 des EDD qui a fait l'objet d'une présentation partie 1.3.3.

observations sur les sites opérationnels du groupe. L'équipe avance l'hypothèse d'un lien entre les erreurs des opérateurs et les environnements de travail. C'est donc sur cet environnement de travail et ses attributs que doivent s'articuler les mesures de diagnostic et de prévention. En analysant les rapports d'accidents et à l'aide d'observations et d'entretiens, l'équipe parvient à regrouper onze *facteurs types de risques* (Basic Risk Factors ou BRF[225]) :

- Formation,
- Communication,
- Organisation du travail,
- Procédures,
- Matériel,
- Conception,
- Ordre et propreté,
- Maintenance,
- Objectifs incompatibles,
- Moyens de défense,
- Conditions favorisant les erreurs

Le modèle d'accident de Tripod est le MAO Mk I de Reason. Les BRF émergent dans l'organisation d'un système et contribuent, via les espaces de travail, à la survenue d'actes non-sûrs. Deux méthodes ont été conçues pour les besoins d'analyse d'accidents (Tripod BETA) et pour le diagnostic de sécurité (Tripod DELTA)[226]. Nous nous sommes donc uniquement intéressés à l'outil -DELTA, en raison de nos besoins.

La méthode CREAM

CREAM (*Cognitive Reliability and Error Analysis Method*) est une méthode de diagnostic de type HRA, développée par Erik Hollnagel dans la seconde moitié des années 2000[227]. Elle s'intéresse à la notion de *performance*[228] humaine et met en relation l'individu en situation de travail et le contexte de réalisation de ses activités. CREAM étudie le comportement des opérateurs pour comprendre comment un contexte défavorable peut générer une erreur ou en aggraver les conséquences. L'approche de l'erreur par le contexte de l'activité proposée par la méthode CREAM peut être rapprochée de la notion de rationalité limitée, appliquée au domaine de la sécurité industrielle, définie comme l'influence du « *milieu organisationnel et social dans lequel se trouve la personne* [prenant] *une décision* [et qui] *détermine les conséquences auxquelles elle s'attendra, celles auxquelles elle ne s'attendra pas; les possibilités de choix qu'elle prendra en considération et celles qu'elle laissera de côté* » (Simons, 1955 ; cité par Desmorat, 2012).

De ce point de vue, l'erreur n'est plus le résultat automatique de l'enchaînement de faits mais trouve sa source dans les perceptions individuelles, définies par un environnement particulier et par les croyances des opérateurs. La méthode repose sur un modèle du degré de contrôle des acteurs sur la

[225] Aussi qualifiés, dans les premières versions de la méthode Tripod, de « *défaillances génériques* » (*General Failure Types,* ou GFT).
[226] Pour un cas français d'utilisation de Tripod, voir Cambon *et al.,* 2006 ; Cambon & Guarnieri, 2008.
[227] Pour un cas français d'adaptation de la méthode CREAM, voir Desmorat, *et al.*, 2013.
[228] Dans le sens anglais où « *to perform* » signifie faire quelque chose.

situation dans laquelle ils agissent (le *contextual control model,* COCOM) et sur une liste de *common performance conditions* (CPC). Les CPC sont des indicateurs génériques, en interactions, proposés par Hollnagel :

- Efficacité de la formation et de l'expertise,
- Efficacité de la communication,
- Qualité de la collaboration,
- Qualité de la structure organisationnelle,
- Temps disponible,
- Disponibilité des procédures et des plans,
- Qualité de l'interface Homme-Machine,
- Conditions de travail,
- Nombre d'objectifs simultanés,
- Période de la journée (jour / nuit).

Leurs impacts sur l'activité étudiée sont ensuite qualifiés suivant le triptyque : favorables, neutres ou défavorables. Ce principe sera retenu dans notre propre méthode d'étude des EI-FH.

Les Facteurs Organisationnels Pathogènes

En 2000, EDF se dote d'une cellule de veille des grands accidents industriels. L'objectif de celle-ci est de « *concevoir une approche organisationnelle de la sécurité qui puisse être opérationnelle pour les sites EDF dans l'optique de compléter les analyses post-accident ou les diagnostics de sûreté et sécurité des installations déjà existantes.* » (Pierlot *et al.*, 2006). Dès 2002, ces études de cas (N = 9) amènent la formulation de six « facteurs organisationnels pathogènes pour la sécurité » ou FOP. Ces facteurs ont été observés comme récurrents dans les crises, accidents ou incidents étudiés.

En 2005, ces premiers travaux sont repris par un groupe de travail incluant Mathilde Bourrier, chercheuse reconnue dans le domaine de la fiabilité organisationnelle. Ce groupe a permis la stabilisation d'une liste de facteurs organisationnels, leurs définitions et l'attribution de « *marqueurs génériques* ». Les marqueurs étant identifiables lors des visites, inspections, enquêtes post-accidentelles ou diagnostic proactifs. Les FOP retenus, au nombre de sept, sont :

- Pressions de production,
- Difficulté à faire vivre un retour d'expérience,
- Faiblesse des organismes de contrôle,
- Insuffisance de la culture organisationnelle de sûreté,
- Défaillance de la gestion quotidienne de la sûreté,
- Mauvais traitement de la complexité organisationnelle,
- Absence de réexamen des hypothèses de conception.

Cette approche ne bénéficie pas, aujourd'hui, de retour d'expérience significatif d'applications opérationnelles mais elle répond au critère de méthode développée par ou pour EDF.

On note qu'elle propose une formulation négative de l'ensemble des critères d'évaluation, fait que nous avons souhaité éviter lors de la formulation de notre propre liste et dans le cadre d'une démarche d'évolution vers des représentations moins négatives du facteur humain.

Synthèse de l'étude comparative

Notre premier objectif était de construire une liste d'indicateurs, nommés *dimensions,* qui une fois adaptée aux barrages et à l'organisation de la DPIH, servirait de base à un modèle et une méthode. Nous avons donc effectué une rétro-ingénierie[229] basée sur les indicateurs des quatre méthodes étudiées (Tableau 21).

Tableau 21 : Références relatives aux quatre méthodes présélectionnées. A titre indicatif sont rapportées les noms et nombre d'indicateurs de chaque méthode.

Méthode	Tripod	CREAM	Analyse FOP	Guide FH 2012
Commanditaire	Shell	-	EDF R&D	Projet EDD EDF CIH
Auteur(s)	P. Hudson, J. Reason, W.-A. Wagenaar	E. Hollnagel	Y. Dien, M. Bourrier, S. Pierlot	J. Planes, B. Delprat
Année	1994	1998	2006	2012
Nombre d'indicateurs	11	10	7	4

Un tableau comparatif a été établi afin de déterminer les recouvrements et les écarts entre les indicateurs (Tableau 22). A partir de ce tableau, nous avons défini des critères, exprimés comme *contraintes techniques*, pour l'adaptation d'une liste de dimensions spécifiques à notre démarche :

- Le nombre d'indicateurs devra être le plus réduit possible, idéalement compris entre 5 et 10.
- Chaque dimension devra être précisément
  - nommée,
  - définie,
  - connectée (à d'autres dimensions),
  - priorisée ou pondérée dans l'analyse.

[229] Défini comme « *le processus d'analyse d'un système sujet pour identifier ses composants et les relations entre eux et créer une représentation du système dans un nouveau format à un niveau plus haut d'abstraction* » (Chikofsky *&* *Cross*, 1990).

Tableau 22 : Comparaison des "indicateurs" respectifs des quatre méthodes présélectionnées. L'ordre des indicateurs correspond, ici, à une volonté de regroupement thématique avec comme méthode de référence Tripod (choix arbitraire), il ne soutient ni l'idée de gradation d'importance des indicateurs, ni celle de priorité d'analyse.

Tripod	CREAM	Analyse FOH	Guide FH 2012
Conception	Qualité de l'IHM	Absence de réexamen des hypothèses de conception	-
Procédures	Disponibilité des procédures et plans	-	-
Matériel	-	-	-
Formation	Efficacité de la formation et de l'expertise	-	Compétence / Savoir et savoir faire
Maintenance	-	-	-
Communication	Efficacité de la communication	-	-
Ordre et propreté	Conditions de travail	-	Situation de travail
Objectifs incompatibles	Nombre d'objectifs simultanés	Pression de production	-
Conditions favorisant les erreurs	Période de la journée (jour / nuit)	Insuffisance de la culture organisationnelle de sûreté	Complexité de la tâche à accomplir
Organisation du travail	Qualité de la structure organisationnelle	Mauvais traitement de la complexité organisationnelle	-
Moyens de défense	-		Capacité d'autocorrection
-	Qualité de la collaboration	Difficulté à faire vivre le REX	-
-	Temps disponible	Faiblesses des organismes de contrôle	-
-	-	Défaillance de la gestion quotidienne de la sûreté	-

Des dimensions vers un modèle FOH de l'exploitation hydraulique

Suite à l'étude comparative des quatre méthodes présélectionnées, nous avons établi une liste de neuf dimensions nécessaires et suffisantes pour proposer un modèle FOH de l'exploitation d'un barrage hydroélectrique d'EDF. Nous avons exploité l'expertise métier de certains membres du groupe de travail et éprouvé nos premiers résultats avec des membres de la filière MRO des unités de production pour adapter les noms et les définitions des dimensions, rétroactivement cette organisation pourrait être qualifiée d'*adhocratique*[230].

[230] Néologisme provenant du latin « *ad hoc* » (spécifique à un besoin). L'adhocratie désigne une configuration organisationnelle qui, dans un contexte complexe et dynamique, mobilise des compétences pluridisciplinaires et transverses pour atteindre des objectifs déterminés (Mintzberg, 1982).

Tableau 23 : Les dimensions retenues pour la construction d'un modèle FOH-EDD et leurs définitions respectives. A un premier niveau, ces dimensions peuvent être regroupées suivant qu'elles portent sur le contexte ou la temporalité de l'activité (vert), sur les interactions entre l'individu et le système technique (orange) ou sur l'organisation de l'activité (bleu).

#	Nom	Définition
1	**Environnement de Travail**	L'environnement de travail est constitué de l'ensemble des facteurs physiques locaux qui influencent un opérateur dans l'exécution de son activité (de manière positive ou négative). Cet aspect physique peut être lié à l'hygiène et la sécurité ou au degré de « confort » (de l'accès, du local et du poste de travail). N.B. Les relations humaines (interrogées dans « travail en équipe ») sont, ici, exclues.
2	**Temps disponible**	Représente le temps dont dispose un opérateur pour réaliser l'activité considérée. Il s'agit ici de réaliser une décomposition sommaire de l'activité en tâches, dont la durée peut être estimée, pour confirmer que le délai attendu de réalisation de l'activité est compatible avec le temps nécessaire à sa réalisation.
3	**Objectifs simultanés**	Il est courant que l'opérateur ait à répondre à plusieurs objectifs dans le cadre de son activité. Dans ce cas, les objectifs peuvent être simultanés (nécessaire partage de l'attention et du temps disponible). N.B. Dans certains cas indésirables, ces objectifs peuvent êtres contradictoires (conflits dans la définition des priorités).
4	**Activateurs**	Nous nommons « activateur » tout dispositif (alarmes, voyants, bips) visant à informer, alerter ou solliciter une action de l'opérateur sur le système.
5	**Interface H-M**	L'interface Homme-Machine est constituée de l'ensemble des dispositifs, logiciels ou matériels, permettant à l'utilisateur d'interagir avec un système technique (relever des informations, saisir des commandes).
6	**Compétences & Formation**	La compétence de l'opérateur est régie par des niveaux d'exigences en lien avec l'activité (ex : des autorisations, habilitations). Il s'agit de vérifier que des seuils existent et sont satisfaits par les opérateurs. La formation permet l'acquisition des connaissances nécessaires à l'exercice d'une activité. Elle peut inclure un volet théorique, et/ou pratique (mise en application, entraînement).
7	**Organisation du travail**	Nous nommons « organisation du travail » l'ensemble des dispositions (communication, remontée d'information, procédures, …) répondant à des besoins ou permettant d'optimiser les moyens (humains, techniques, financiers, …) nécessaires à l'atteinte des objectifs fixés. L'organisation du travail structure les activités des opérateurs.
8	**Procédures**	Les procédures permettent de définir l'activité de l'intervenant (qui fait quoi, comment). Elles peuvent être déclinées en notes d'organisation, modes opératoires et/ou fiches réflexes pour s'adapter à des besoins spécifiques.
9	**Travail en équipe**	Nous nommons « équipe de travail » un groupe de personnes travaillant à une même tâche. Ce mode de fonctionnement particulier peut avoir des effets (positifs ou négatifs) sur la qualité de réalisation de la tâche.

Ces neuf dimensions peuvent-être regroupées en trois catégories, représentées par le code couleur du tableau. Les dimensions représentées en vert sont liées aux éléments de contexte ou de temporalité de l'activité, ces dimensions figurent en premier dans la liste car elles permettent d'accéder rapidement à une représentation mentale de l'activité par l'analyste. Les dimensions représentées en orange portent sur les interactions entre l'opérateur et le système, elles sont simplifiées pour représenter un point d'entrée (*activateurs*) et de sortie (*IHM*) des actions de

l'opérateur sur le système technique. Notons qu'il existe une rétroaction continue entre les actions humaines et l'état dynamique du système technique. Enfin, les dimensions représentées en bleu sont liées aux éléments d'organisation de l'activité, elles apparaissent en fin de liste car elles n'admettent que peu de variation d'une activité à l'autre sur un barrage donné. Vu le choix de conception *facteur humain* effectué par l'équipe de conception du dispositif, elles constituent plutôt des éléments de fond qu'on ne peut se résoudre à exclure de l'analyse sans pour autant leur accorder un caractère *discriminant.*

Nous nommons une dimension *discriminante* si son état peut varier significativement d'un ouvrage à un autre, voire d'une activité étudiée à une autre. Cette variabilité peut s'expliquer en raison de considérations physiques (environnement de travail, hydrologie du site) ou organisationnelles (travail isolé ou en équipe). A l'inverse, une dimension *non discriminante* ne variera que rarement ou faiblement d'un site à un autre. Toutes les dimensions ne sont pas *discriminantes* dans l'étude des EI-FH. Par exemple, la dimension « compétences et formations », bien que fondamentale dans la gestion de la sécurité, ne devrait pas admettre de variations significatives entre deux GU ; encore moins entre deux ouvrages d'un même GU et a priori, elle ne varie pas entre deux activités différentes (EI-FH) d'un même ouvrage. *A contrario*, la dimension « temps disponible » peut varier significativement d'une activité à l'autre sur un même ouvrage voire pour une même activité, en fonction du mode d'exploitation considéré dans le scénario de l'EDD (normal, crue, essais). La recherche combinée du réalisme et de l'efficacité de l'analyse incite donc à prioriser l'étude des dimensions discriminantes pour une activité donnée.

Pour représenter les influences réciproques et interconnectées de ces dimensions, le groupe de travail les a articulées dans un modèle FOH d'exploitation d'un ouvrage d'EDF-DPIH (Figure 50).

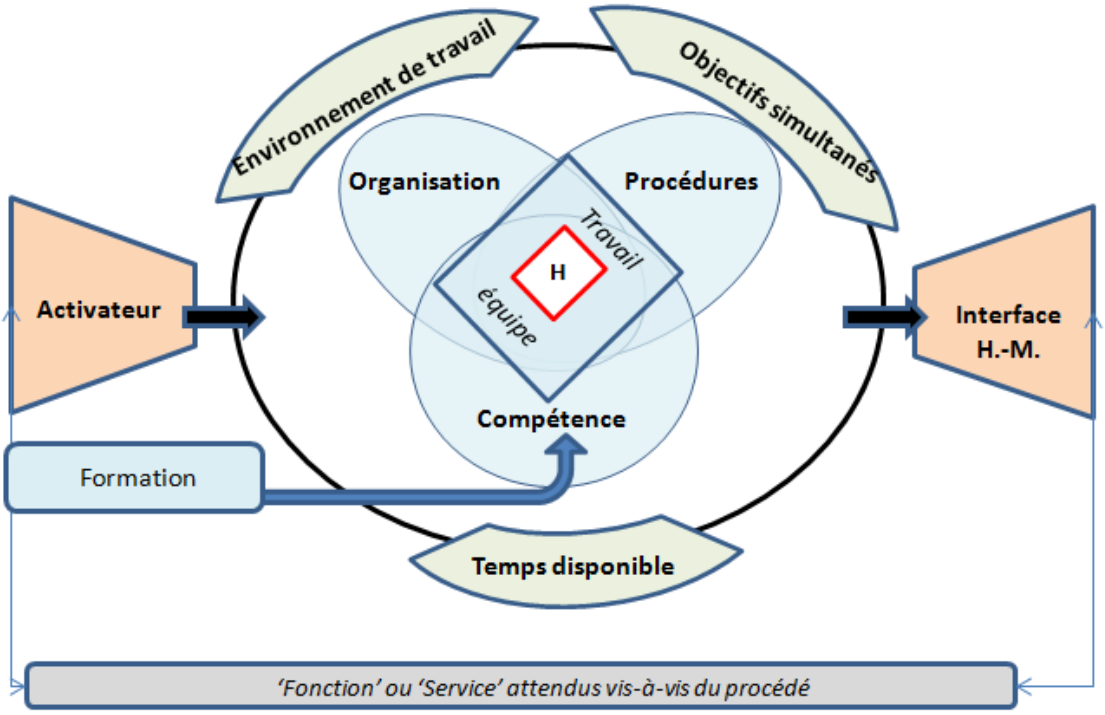

Figure 50 : Modèle FOH-EDD. Deux lectures sont possibles (1) en partant de l'homme (H), du centre vers l'extérieur ou (2) de gauche à droite avec une vision fonctionnelle où l' « activation » précède l'action humaine.

Deux lectures de ce modèle sont possibles l'une du centre (H), vers l'extérieur et l'autre de gauche à droite. La première lecture sous l'angle FOH est soutenue par la représentation centrale de l'Homme, l'opérateur *sharp end* ou le petit collectif d'équipe de travail. Nous réduisons les dimensions organisationnelles à (1) l'« organisation » à proprement dite, (2) des « procédures » régissant l'activité et (3) des « compétences » (qui recouvrent la notion d'expérience et celle de « formation »). De manière plus discriminante, car dépendant de l'activité considérée, cet ensemble central est en interrelation avec un « environnement de travail », le « temps disponible » à la réalisation de l'activité et d'éventuels « objectifs simultanés ». Enfin, la réalisation de l'activité dépend, en amont des « activateurs » (alarmes, voyants…) à même de la déclencher et en aval de l' « interface Homme-Machine » qui permet à l'opérateur d'interagir avec le système technique. La seconde lecture peut être faite sous l'angle *fonctionnel*, elle représente les « fonctions attendues vis-à-vis du procédé » comme des cycles. Elle implique que toute action humaine sur le système est précédée d'une forme d'*activation*. L'activateur peut être technique (alarme, messages du système), organisationnel (activation d'une organisation spécifique à des paramètres hydrométéorologiques) ou humains (sollicitation par un tiers). Les *activateurs* forment une dimension discriminante par leur hétérogénéité et leurs caractères spécifiques à l'activité, ils varient fortement d'une fonction à une autre. Dans la vision *fonctionnelle*, ils sont le point d'entrée du cycle modélisé. Une fois *activée,* la réussite de l'action peut être influencée par l'organisation, les compétences (dépendant en partie de la formation) et les procédures spécifiques comme les modes opératoires. Enfin, pour produire des effets sur le système technique, l'opérateur utilise une interface homme-machine, celle-ci est moins discriminante que les activateurs ou l'organisation du travail car un grand nombre d'activités vont s'effectuer via un seul pupitre de commande (IHM). Enfin, une boucle de rétroaction est présente entre l'action de l'opérateur et l'état du système ; celle-ci permet d'entreprendre des actions correctrices entre la mesure d'éventuels écarts entre les effets *attendus* d'une action et ses effets *constatés*.

Ce modèle a pour vocation de permettre la communication entre des personnes d'horizons et de compétences hétérogènes. Nous l'avons d'abord utilisé pour développer une méthode de cotation des EI-FH et ses outils associés puis, pour expliciter l'articulation des neuf dimensions auprès des différents GT-EDD.

3.1.3. Conception de la méthode et de l'outil ECHO

Une fois les dimensions adaptées, définies et articulées dans un modèle FOH-EDD (Figure 50), il a été nécessaire de définir les modalités de recueil de données, d'analyse et enfin de cotation des EI-FH. Le modèle a donc été complété par une méthode (articulation de techniques et d'outils) conçue pour un GT-EDD, pluridisciplinaire, sans connaissances spécifiques des FOH et dans un temps contraint de deux heures de travail en salle.

Il est rapidement apparu que notre méthode s'apparenterait à guider les GT-EDD dans un exercice de réduction du réel. Afin de renforcer la force de conviction des EDD, cet exercice devrait être séquencé et reproductible. Dans le même temps, il devrait être capable de rendre compte de la variété des ouvrages hydrauliques du parc de la DPIH.

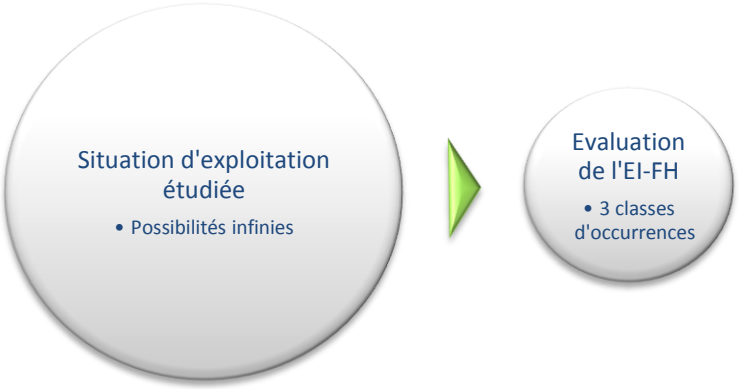

Figure 51 : L'objectif de notre démarche peut être vu comme la détermination d'un dispositif reproductible et justifiable permettant d'attribuer à une situation d'exploitation donnée une classe (de probabilité) d'occurrence.

Etant donné le postulat d'« absence d'expertise FOH dans les GT-EDD », nous avons considéré que la méthode devrait présenter un important niveau de guidage. Dans le même temps, le caractère *prototypique* de chaque ouvrage interdisait à la méthode d'être trop universelle, normative, prédictive et prescriptive. En effet, d'une EDD à l'autre, des données d'entrée comme la nature des gestes d'exploitation peuvent varier, modifiant la pertinence et/ou la priorisation des dimensions. Nous avons opté pour un guidage *non prescriptif* appliqué au recueil des données d'entrées, lors de la collecte documentaire EDD et de la visite de site ; mais pour une approche *qualitative* en deux temps concernant l'analyse de ces données. Le premier temps correspond à des échanges successifs autour de chaque dimension animés par le pilote-EDD au sein du GT-EDD, qui est pour cela assisté par un ensemble de questions de relance (indicatives) qui permettent de stimuler les débats et d'inciter l'expression de l'exploitant. Dans un second temps, sur la base de ces échanges, le pilote-EDD défini un *état* pour chaque dimension à l'aide d'un outil informatique. Les *états* sont des propositions génériques déterminées par choix multiples, présentées dans la partie suivante.

Etats admissibles

La notion d'*états* est inspirée des méthodes Tripod et CREAM, et répond à deux postulats fondamentaux de la *TAO* :

- des éléments de nature *technique, individuelle* ou *organisationnelle* sont en jeu dans la réussite ou l'échec de l'action d'un opérateur,
- l'étude systématique d'un nombre limité de ces éléments doit permettre de gérer la sécurité de façon proactive comme, dans le cas des EDD, en proposant des mesures de réduction ou de non-aggravation des risques.

Nous nous sommes inspirés du mode opératoire de la méthode CREAM en définissant un nombre limité d'*états admissibles* pour chacune des neuf dimensions du modèle FOH-EDD. Le principe de base est qu'une dimension peut être *favorable, sans effet* ou *défavorable* pour une activité humaine. Ces trois qualificatifs (que l'on qualifiera de *triptyque*) présentent deux inconvénients dans notre cas, ils apparaissent trop génériques pour un groupe de travail sans compétences FOH particulières et ils offrent une possibilité d'évaluation médiane (l'état *neutre*) qui peut être porteuse de sens pour une

personne familière des FOH et compétente dans le domaine mais offre au néophyte une opportunité de poursuivre l'analyse en adoptant une stratégie de contournement des difficultés conceptuelles dans l'absence de positionnement ou d'avis. Enfin, nous avons été attentifs à ce que les dimensions soient, autant que possible, porteuses de sens pour les utilisateurs du dispositif. A cet effet, nous avons souhaité que les états admissibles permettent de rendre directement compte d'évènements de REX mettant en jeu les FOH. Nous avons donc exploité une liste d'ESSH sélectionnés sur la base de laquelle nous avons adapté les *états* admissibles par certaines dimensions soit dans leurs intitulés soit dans leurs nombres (le Tableau 24 présente la synthèse des états acceptables par chaque dimension).

La dimension *environnement de travail* n'admet que deux états (*propice / peut gêner*), nous avons choisi de ne pas lui attribuer d'*état* neutre car tous les EI-FH considérés dans les EDD le sont dans le périmètre de l'ouvrage, donc en prise directe avec un environnement physique de travail. C'est la première dimension que le GT-EDD doit étudier, cela le conduit à construire une représentation mentale de l'environnement physique dans lequel est réalisée l'action. Dans l'exploitation d'un barrage, cet environnement physique peut varier de façon significative entre les périodes dites *d'exploitation normale* (activités courantes, contrôles périodiques) ou celles *d'exploitation en crue* (exposition aux intempéries, travail posté, travail de nuit). Cet environnement influence significativement les *états* des autres dimensions, notamment le temps disponible pour la réalisation des activités.

La dimension *temps disponible* admet quatre *états*, en plus du triptyque *favorable (renommé largement suffisant), neutre (suffisant), défavorable (potentiellement insuffisant),* nous souhaitons intégrer des cas où le GT-EDD révèlerait que le temps disponible est *insuffisant* pour réaliser l'activité étudiée. Cet état implique alors un « point d'arrêt », le GT-EDD est contraint par l'outil d'arrêter sa démarche d'évaluation de l'EI-FH pour approfondir sa réflexion et suggérer des actions correctives. En effet, dans l'hypothèse où le temps disponible serait insuffisant, c'est-à-dire où l'opérateur n'aurait pas le temps nécessaire pour effectuer l'action attendue, il ne serait pas adéquat de parler de *geste inapproprié*[231]. Dans ce cas, déterminer la classe d'occurrence de l'EI-FH n'a plus de sens (la probabilité de non réussite de l'action est égale à 1). Si cette situation était rencontrée dans le cadre d'un diagnostic, elle serait révélatrice de conditions latentes préoccupantes qui nécessiteraient une prise en compte immédiate. Dans les autres cas, si le temps disponible est jugé largement suffisant, il peut contribuer à renforcer la réalisation correcte de l'activité : ce temps pourra être utilisé pour l'analyse de la situation avant l'action, la sollicitation d'une tierce personne (collègue, hiérarchique) pour valider les choix ou contrôler l'action ou encore, se référer à un mode opératoire. L'état *suffisant* de cette dimension est jugé sans impact sur la réalisation de l'activité (score nul) il en constitue donc le *neutre*. Enfin, l'état *potentiellement insuffisant* est de nature à impacter négativement la performance de l'opérateur. La contrainte de temps peut en effet générer une augmentation du stress voire des arbitrages contraints entre deux actions ou entre les différentes composantes d'une action.

La dimension *objectifs simultanés* admet quatre *états* qui sont la combinaison de la fréquence et du niveau de cadrage de ceux-ci, par exemple l'existence d'aides à l'arbitrage ou à la priorisation des objectifs sous forme de procédures, de communications ou de formations spécifiques. En l'absence

[231] De plus, l'EDD étant une démonstration de sûreté, EDF ne peut se permettre de diffuser à la DREAL une analyse de risque avec un tel résultat.

d'objectifs simultanés, le postulat est que l'opérateur peut allouer le maximum de ses ressources mentales à la réalisation de la tâche considérée. Cela permet donc d'attribuer à cet état un score positif. Dans le cas où des objectifs simultanés existent de façon régulière et font l'objet d'un cadrage leur existence est considérée sans impact (*neutre*) sur l'activité considérée. Si des objectifs simultanés peuvent être rencontrés sans pour autant être systématiques et font l'objet d'un cadrage, un impact défavorable est possible sur la performance de l'opérateur. Cet impact suppose que l'existence non régulière d'objectifs simultanés les rendront plus délicats à gérer que s'ils étaient réguliers et connus ; ce, malgré le cadrage, car la présence d'une incertitude peut perturber l'intervenant. Si les objectifs simultanés existent (sont habituels, connus, systématiques) sans pour autant être cadrés (par des procédures), on postule que l'opérateur développera des routines professionnelles, liées à son expérience, permettant de traiter ces objectifs simultanés. Cette adaptation individuelle ne sera pas nécessairement optimisée mais aura vocation à être fonctionnelle. Aussi cet état sera considéré plus défavorable que l'état « habituels et cadrés » mais moins que « cadrés mais exceptionnels ». Enfin, le cas le plus défavorable est celui où des objectifs simultanés existent ponctuellement (absence d'adaptation routinière de l'opérateur) et ne font pas l'objet de cadrage spécifique.

La dimension *activateurs* admet les trois états du triptyque. Nous avons déjà avancé des éléments relatifs à cette dimension dans la description du modèle *fonctionnel* FOH-EDD. Des activateurs bien conçus assurent un guidage dans la décision et les actions, dès lors ils sont susceptibles de diminuer les délais d'analyse et de faciliter l'action en la guidant. Cette dimension est toutefois moins pondérée que la dimension « compétences et formation » car si de bons activateurs permettent de diminuer significativement les erreurs mentales de planification de l'action, ils demeurent sans effet sur les risques d'erreurs d'exécution[232]. L'état *neutre* correspond à un système d'activateurs qui permet un niveau de guidage suffisant pour ne pas risquer de perturber l'activité de l'opérateur sans pour autant renforcer la réussite de celle-ci. En revanche, un système d'alarmes mal conçu, présentant des fausses alarmes récurrentes ou sans hiérarchisation des informations qu'il transmet, peut biaiser la représentation mentale d'une situation et ainsi altérer ou déphaser l'analyse, la décision puis l'action de l'opérateur.

La dimension *interface Homme-Machine* (IHM) admet également le triptyque d'états. Bien conçu, il informe sur les besoins en actions (redondance avec les activateurs), sur les modalités d'action à disposition de l'opérateur et *in fine* sur les effets de ses actions. Il peut donc renforcer la réalisation correcte de l'activité. Dans un *état* intermédiaire, il peut être neutre pour l'activité considérée. Enfin, depuis l'accident de TMI, il est établi que l'IHM peut aussi conduire à altérer la réalisation des activités humaines en produisant des conditions d'*actes non-sûrs* (Reason, 1990b).

Les dimensions *compétence et formation* ont été regroupées en un item unique. Nous postulons sur la base du REX DPIH étudié que cette dimension est non seulement à même de renforcer la bonne réalisation de l'activité mais également de pallier (dans une certaine mesure) des précurseurs techniques ou organisationnels. L'état le plus favorable de cette dimension a donc la pondération la plus importante des neuf dimensions. Ce choix conforte également la volonté de valoriser le rôle de l'exploitant dans la maîtrise des fonctions de sûreté d'un ouvrage. L'état « sans impact » correspond à un niveau de compétence et de formation nécessaire et suffisant à la réalisation correcte de l'action considérée. Dans cette situation, s'il est estimé que l'opérateur peut réaliser correctement

[232] Voir la classification des actes non-sûrs de Reason (1990).

son activité professionnelle, sa capacité de réaction face à des situations exceptionnelles ne sera pas optimisée. A l'extrême, enfin, une évaluation négative de cette dimension génère un point d'arrêt pour le GT-EDD. Notre démarche étant basée sur le rôle de l'humain dans le système, si cette dimension est évaluée *négativement,* des mesures compensatoires ou correctives doivent être explicitées et appliquées.

La dimension *organisation du travail* est plus complexe à étudier pour les GT-EDD car l'EDD ne s'apparente pas à un audit organisationnel et en raison du *paradoxe EDD*. Aussi, nous avons opté pour une comparaison à un standard normatif que nous qualifions de *référentiel DPIH.* Notre objectif est de pouvoir discriminer des sites dont les spécificités conduisent les GU à réaliser des entraînements spécifiques, des manœuvres de vannes plus fréquentes, mais aussi les sites où des évènements passés (REX) auraient montré une inadéquation entre l'organisation et les réalités opérationnelles. Le triptyque *positif, neutre, négatif* est donc adapté en accord avec cette notion de *référentiel DPIH,* l'organisation du travail pouvant être « adaptée au référentiel DPIH », « au-delà du référentiel DPIH » ou « potentiellement inadaptée ». Notons enfin que les GT-EDD peuvent s'appuyer pour évaluer cette dimension sur le quatrième chapitre de l'EDD, qui présente la politique de prévention des accidents majeurs et le SGS du barrage.

La dimension *procédures* admet le triptyque de base avec une spécificité pour l'état *favorable*. Une procédure correctement conçue et rédigée ne peut être un support utile à l'activité humaine qu'avec de nombreux prérequis à son utilisation (temps disponible, bonne analyse de la situation, choix de la procédure, disponibilité, etc.). Le niveau *neutre* comprend l'ensemble des cas où la procédure n'est pas nécessaire pour réaliser l'activité. Enfin, les procédures peuvent avoir des effets négatifs sur l'activité attendue si elles n'ont pas été mises à jour ou si leur complexité n'est pas adaptée à l'activité (par exemple, au temps disponible).

La dernière dimension, *travail en équipe,* peut aussi avoir des effets *positifs, neutres* ou *négatifs* sur l'activité. La présence d'un tiers peut être vertueuse pour la réalisation d'une activité, notamment si cette présence est spécifiquement dédiée au *contrôle* de l'activité. Le tiers peut aussi constituer une source de partage de l'attention et faire émerger des objectifs simultanés non prévus et non cadrés. Notons enfin que dans le cas des barrages, les opérateurs sont le plus souvent seuls pour exécuter leurs activités[233], la dimension est alors sans impact.

Ces neuf dimensions sont utilisées comme un intermédiaire dans le processus de réduction du réel. Elles constituent une grille d'analyse qui permet de structurer l'étude des GT-EDD (guidage) tout en offrant un grand nombre de possibilités[234] de restitution de leur analyse (ouverture) et assure la volonté initiale de cohérence inter-EDD dans la mesure où le même nombre limité d'éléments est étudié systématiquement, facilitant la présentation des arguments et des classes d'occurrences qui en résultent. L'étape suivante du processus de réduction du réel consiste à passer de chacune de ces combinaisons possibles à l'une des trois classes d'occurrences méthodologiquement admises pour les EI-FH. Nous nommons « mathématisation » cette phase du processus (en vert Figure 52) qui permet d'atteindre notre objectif d'évaluation suivant l'échelle réduite de classes (A à C) de l'arrêté ICPE (MEDDE, 2005).

[233] Sauf pour le cas des essais ou du travail de nuit, en crue, où l'organisation prévoit la présence de deux opérateurs.

[234] Des neuf dimensions, deux admettent quatre états, six trois états et une n'admet que deux états soit un total de 23 328 combinaisons d'états possibles ($N = 3^6 \times 2^1 \times 4^2$)

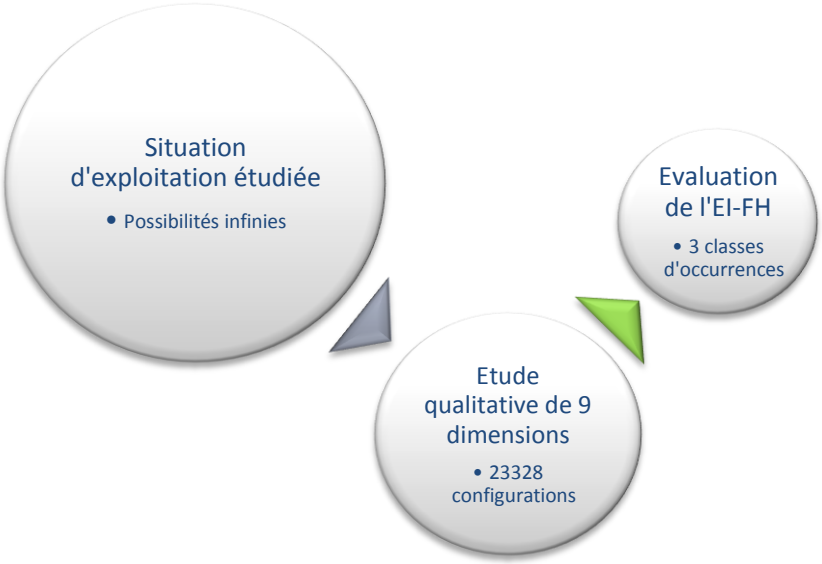

Figure 52 : Les 9 dimensions permettent une première réduction du réel par leur étude qualitative et pluridisciplinaire ainsi que l'attribution, à chacune, d'un « état » par choix-multiples. En vert la phase de mathématisation vise à automatiser le passage des 23328 configurations aux 3 classes d'occurrences.

Première étape de mathématisation : les « scores »

Grâce au nombre limité d'états admissibles nous opérons une première réduction de la réalité opérationnelle. L'étape suivante consiste en une modalité de réduction supplémentaire permettant de déterminer une classe d'occurrence parmi trois, de façon reproductible et argumentée.

Pour assurer la cohérence inter-EDD et optimiser le temps nécessaire pour l'étude des EI-FH dans les GT-EDD, nous avons choisi d'automatiser cette phase. Pour cela, nous associons un *score* à chaque *état admissible.* Le *score* est une transposition quantitative de l'*état* qualitatif. Selon un premier principe, basique, chaque *score* positif correspond à un *état* renforçant la réussite d'une activité ou la performance humaine, chaque score négatif à un *état* les dégradant. Nous avons ensuite cherché à introduire une pondération *empirique* entre les dimensions en fonction de notre étude du REX FOH de la DPIH mais aussi des différentes expertises de l'équipe de conception. Pour cela, nous faisons varier la valeur absolue des *scores,* par exemple, la dimension « compétences et formations » admet pour *score* maximum +2 alors que le score maximum pour la dimension « activateur » est de +1. Nous postulons que la contribution des compétences de l'opérateur à la réussite d'une activité est prépondérante sur la qualité du système d'activateurs. Cette logique empirique de pondération a été reproduite par « paires » de dimensions puis la cohérence globale dans l'importance relative de chaque dimension a été confirmée. Le Tableau 24, ci-dessous, présente les *états* et les *scores* admissibles pour chacune des dimensions.

Tableau 24 : Les neuf dimensions d'ECHO, leurs états admissibles et leurs scores associés.

#	Nom	Etats admissibles	score	MAX	Min
1	**Environnement de Travail**	Propice	1	1	-1
		Pourrait gêner l'activité	-1		
2	**Temps disponible**	Largement suffisant	1	1	-1
		Suffisant	0		
		Juste suffisant (aucune marge)	-1		
		Insuffisant	P.A.		
3	**Objectifs simultanés**	Réguliers et cadrés	0	0	-3
		Occasionnels et cadrés	-2		
		Réguliers et non cadrés	-1		
		Occasionnels et non cadrés	-3		
		Sans objet (n'existent pas)	0		
4	**Activateurs**	Favorable	1	1	-1
		Sans impact sur l'activité	0		
		Peut impacter négativement	-1		
5	**Interface H-M**	Favorable	1	1	-2
		Sans impact sur l'activité	0		
		Peut impacter négativement	-2		
6	**Compétences & formations**	Favorable	2	2	-1
		Sans impact sur l'activité	0		
		Peut impacter négativement	-1		
7	**Organisation du travail**	Adaptée (référentiel DPIH)	0	1	-1
		Au-delà du référentiel DPIH	1		
		Potentiellement inadaptée	-1		
8	**Procédures**	Favorable	0	0	-1
		Sans impact sur l'activité	0		
		Peut impacter négativement	-1		
9	**Travail en équipe**	Facteur supplémentaire de réussite	1	1	-1
		Situation potentiellement perturbatrice	-1		
		Sans objet ou sans effet	0		
		Extrema		8	-12

Cette approche suppose l'étude des effets directs et individuels de chaque dimension sur une activité donnée. Elle n'intègre pas les effets des interactions qui peuvent exister entre les dimensions elles-mêmes. Il faut donc également pouvoir rendre compte de ces effets que l'on qualifiera d'*indirects*. Dans les situations réelles de travail, des situations peuvent émerger telles que le *temps disponible* ne permette pas d'exploiter les *procédures spécifiques.* Ou encore des cas où l'*environnement de travail,* excessivement bruyant et/ou stressant, par exemple lors d'un orage et d'une crue de nuit, peut dégrader l'efficience des *activateurs* qui se retrouvent noyés.

La méthode CREAM, dans sa composante HRA, propose une méthode pour intégrer ces possibilités d'interactions *indirectes* entre les dimensions (Hollnagel, 1998). Cette méthode consiste à utiliser des règles logiques complémentaires à l'attribution des états aux différents indicateurs. Ces règles logiques portent sur une matrice des interrelations entre les dimensions ; si certains critères sont vérifiés, alors les scores (transcription chiffrée de l'état) sont modifiés. Nous avons adapté puis automatisé cette approche par « règles complémentaires » pour la rendre opérationnelle dans les GT-EDD.

Pour définir de façon empirique les interactions entre dimensions, nous avons utilisé une matrice d'interaction réciproque où chaque dimension est présentée en ligne et en colonne d'une matrice symétrique. La matrice est ensuite utilisée pour caractériser les interactions des colonnes avec les lignes. Afin de diminuer le biais de subjectivité, nous avons effectué l'exercice de caractérisation en *triple aveugle.* Trois ingénieurs différents, avec des expériences complémentaires dans le domaine de l'hydraulique, ont réalisé la caractérisation individuellement puis les résultats ont été comparés en séance de groupe. Les divergences ont également été discutées avec d'autres membres de l'équipe n'ayant pas participé aux caractérisations initiales. Une matrice *consolidée* a été construite (Figure 53) où les croix signifient que la dimension présentée en ligne peut être affectée par la dimension en colonne[235].

	Temps disponible	Objectifs simultanés	Environnement de travail	Activateurs	Interface H-M	Compétences & formations	Organisation du travail	Procédures spécifiques	Travail en équipe
Temps disponible		x		x	x		x		x
Objectifs simultanés				x		x	x		x
Environnement de travail					x				
Activateurs		x	x					x	
Interface H-M			x						
Compétences & formations							X		x
Organisation du travail						x			
Procédures spécifiques	x						x		
Travail en équipe	x	x	x	x		x	x	x	

Figure 53 : Matrice d'interrelations entre les 9 dimensions du dispositif FOH-EDD. La présence d'une croix signifie que la dimension en colonne impacte corrélativement la dimension en ligne. Les lignes « environnement de travail » et « travail en équipe » sont neutralisées.

[235] Les règles complémentaires sont ensuite appliquées pour déterminer si la dimension en ligne est effectivement affectée par l'état de la dimension en colonne.

Par exemple, la dimension « *activateurs* » est impactée par les dimensions « *objectifs simultanés »*[236], *« compétences »*[237] et *« procédures »*[238]. Ces trois dimensions produisent, en fonction de leurs *états*, des effets *indirects* sur les activateurs.

Les scores des différentes dimensions sont un intermédiaire accessible pour intégrer, dans l'évaluation des classes d'occurrence, les effets de ces interactions complexes de *deuxième ordre.* Il faut pouvoir objectiver le traitement des interactions potentielles proposées par la matrice, en lien avec la première évaluation des utilisateurs qui rend compte de l'état individuel de chaque dimension. La méthode consiste à déterminer des critères de modification des scores sur la base de règles logiques complémentaires. Concrètement, à l'issue de l'étude qualitative des *états* admissibles, le score de chaque dimension est successivement ajusté, si et seulement si il vérifie ces trois règles logiques :

1) La dimension doit avoir un effet direct *neutre*, assigné par le GT-EDD.
2) La dimension doit être impactée par au moins deux autres dimensions dont l'effet direct, assigné par le GT-EDD, n'est pas *neutre*.
3) Une *majorité*[239] des dimensions influentes est en synergie (majorité d'*états positifs* ou majorité d'états *négatifs*).

Deux lignes de la matrice peuvent être *neutralisées* car elles ne permettent pas de respecter ces règles logiques (lignes grisées). La dimension « *environnement de travail* » n'admet pas d'état *neutre* par définition, il ne pourra donc jamais satisfaire la première règle. La dimension « *travail en équipe* » admet un état *neutre* (score nul) mais celui-ci correspond à la définition qualitative : « absence de travail en équipe », il n'est donc pas pertinent de considérer les interactions *indirectes* dans ce cas.

Exemple d'application des règles complémentaires

La matrice d'interactions indique que le *temps disponible* peut-être impacté par certains effets combinés des dimensions *objectifs simultanés, les activateurs, l'IHM, l'organisation du travail* et *le travail en équipe* ; l'exemple se réduit donc à ces cinq dimensions (1 influée, 4 influentes). D'après la visite du site et les échanges en salle, le GT-EDD affirme que l'activité étudiée peut présenter des *objectifs simultanés* occasionnels qui font l'objet de modes opératoires spécifiques ; qu'en raison de fréquentes occurrences de fausses alarmes à la suite d'une modification du système, les *activateurs* risquent d'induire l'opérateur en erreur ; que l'IHM, du fait de cette même modification induit également des réserves ; que l'organisation du travail dans le GU est conforme aux standards DPIH ce qui conduit, pour l'activité donnée, l'opérateur à travailler seul. Suivant cette analyse, il associera aux différentes dimensions les *états* comme présentés dans le Tableau 25. La troisième colonne représente les *scores*, transition quantitative des états exprimés qualitativement et invisibles pour le GT-EDD (*boîte noire*).

[236] Les « états » de *objectifs simultanés* et *activateurs* sont corrélés : beaucoup d'objectifs simultanés (note dégradée) > risque de confusion dans les alarmes (note dégradée) et inversement.
[237] Sur la même logique, plus l'opérateur est formé et compétent, plus on postule qu'il a de ressources et de capacités pour interpréter les activateurs, voire, pour identifier correctement qu'un activateur est erroné.
[238] Sur la même logique, une procédure *rationnelle* est postulée de nature à guider efficacement l'action d'un l'opérateur étant donné un activateur.
[239] La *majorité* est définie, comme dans la méthode CREAM comme : 4 parmi 6, 4 parmi 5, 3 parmi 4, 2 parmi 3 et 2 parmi 2.

Tableau 25 : Exemple d'effet produit par les règles complémentaires sur le score de la dimension « temps disponible ».

Dimension	Etat	Score	Score ajusté
Temps disponible	**Suffisant**	**0**	**-1**
Objectifs simultanés	Occasionnels et cadrés	-2	-2
Activateurs	Peut impacter négativement l'activité	-1	-1
IHM	Peut impacter négativement l'activité	-2	-2
Organisation du travail	Adaptée (standard DPIH)	0	0
Travail en équipe	Sans objet	0	0

A partir de cet exemple, on peut appliquer les règles complémentaires à la dimension *temps disponible :*

1) La dimension doit avoir un effet direct *neutre*, assigné par le GT-EDD.
    - Règle vérifiée : l'état « suffisant » est le *neutre* de la dimension.
2) La dimension doit être impactée par au moins deux autres dimensions dont l'effet direct, assigné par le GT-EDD, n'est pas *neutre*.
    - Règle vérifiée : par *objectifs simultanés, activateurs* et *IHM.*
3) Une *majorité* des dimensions influentes est en synergie (majorité d'*états positifs* ou majorité d'états *négatifs*).
    - Règle vérifiée : 3/3 dimensions (la majorité étant dans ce cas comprise comme 2/3).

En conséquence, le score de *temps disponible* est modifié négativement, en accord avec la tendance des dimensions influentes. Cet effet illustre que le temps disponible pour réaliser une activité donnée, étudié séparément, est surdimensionné par rapport à une réalité complexe qui implique de considérer la présence d'objectifs simultanés combinée avec un système d'activateurs et une IHM pouvant impacter négativement l'activité. Loin d'instaurer une redondance entre l'étude des effets directs où l'utilisateur intègrerait plus ou moins consciemment les interrelations, on constate ici que les règles complémentaires pallient un biais analytique.

Les règles logiques, associées à la matrice d'interrelations des dimensions permettent donc d'ajuster les *scores.* Il reste à attribuer les classes d'occurrences en fonction des *scores.*

Seconde étape de mathématisation : la matrice de classes

La seconde étape dite de mathématisation est l'ultime étape de réduction du réel. Elle consiste à utiliser les *scores ajustés* pour déterminer les classes d'occurrence des EI-FH. Nous adoptons une approche matricielle, également inspirée de la méthode CREAM. Cette approche consiste à construire une *matrice de classes* à partir des sommes respectives des scores positifs et négatifs (Figure 54) puis d'y projeter chaque EI-FH tel que :

$$\text{Coordonnées}_{\text{EI-FH}} = \{\sum_{\text{Dimensions positives}} ; \sum_{\text{Dimensions négatives}}\}$$

La matrice de l'ensemble des combinaisons possibles est découpée en plages correspondant à des classes d'occurrences. Notre découpage a été adapté empiriquement aux coordonnées rendues possibles par les différents scores admis par la méthode puis défini en raison des recouvrements entre les probabilités (HRA) de la méthode CREAM et l'échelle quantitative (et indicative) de probabilités du tableau des occurrences (MEDDE, 2005 ; annexe 1).

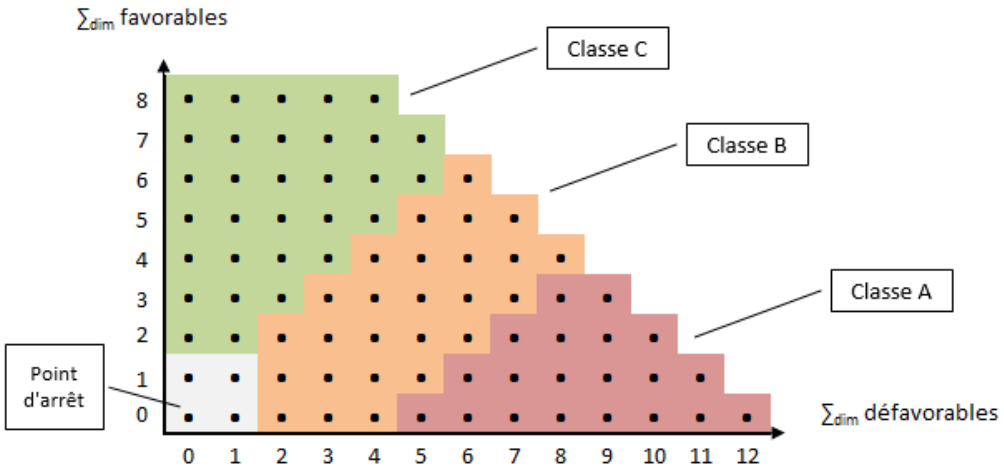

Figure 54 : Matrice de cotation des EI-FH. Les plages associées à chaque classe ont été définies d'après la méthode CREAM et adaptées empiriquement aux EDD d'EDF DPIH. La zone grisée correspond à des points d'arrêt pour le groupe de travail.

L'outil ECHO

En vue d'optimiser le traitement des EI-FH par les GT-EDD nous avons automatisé l'ensemble de la partie modélisation du processus de réduction du réel, de telle sorte que pour l'utilisateur, l'étude qualitative mène directement à la proposition d'une classe d'occurrence associée. L'outil que nous avons créé utilise le logiciel Excel pour effectuer les étapes de mathématisation et permettre dans le même temps le recueil formaté dans un tableau des éléments d'analyse du GT-EDD. Il a été baptisé ECHO (*Evaluation et Cotation des dimensions Humaines et Organisationnelles*). L'interface utilisateur présente trois fenêtres :

- Mode d'emploi : explicite pour l'utilisateur la prise en main du logiciel et son fonctionnement. Les différents champs à renseigner et l'ordre suggéré d'analyse sont indiqués.
- Exemple : présente un cas d'utilisation d'ECHO pour un EI-FH.
- EI-FHi : cette fenêtre principale peut être dupliquée autant de fois que l'EDD contient d'EI-FH. Elle est divisée en trois blocs (Figure 55). Le premier bloc permet l'identification de l'EI-FH, la saisie de la fonction attendue vis-à-vis du procédé, du mode d'exploitation considéré (normale, crue ou essais) et la formulation de l'EI-FH étudié. Le deuxième bloc présente les neuf dimensions, un champ de rédaction destiné au pilote-EDD et un menu déroulant permettant la saisie des états. Une flèche indique à l'utilisateur les effets des interrelations sur chaque dimension. Une classe d'occurrence est proposée au GT-EDD qui doit la valider et peut la modifier. Si le GT-EDD estime que la classe d'occurrence proposée n'est pas représentative de sa représentation de l'ouvrage et des réalités d'exploitation, le troisième champ propose un espace de saisie permettant de commenter la décision.

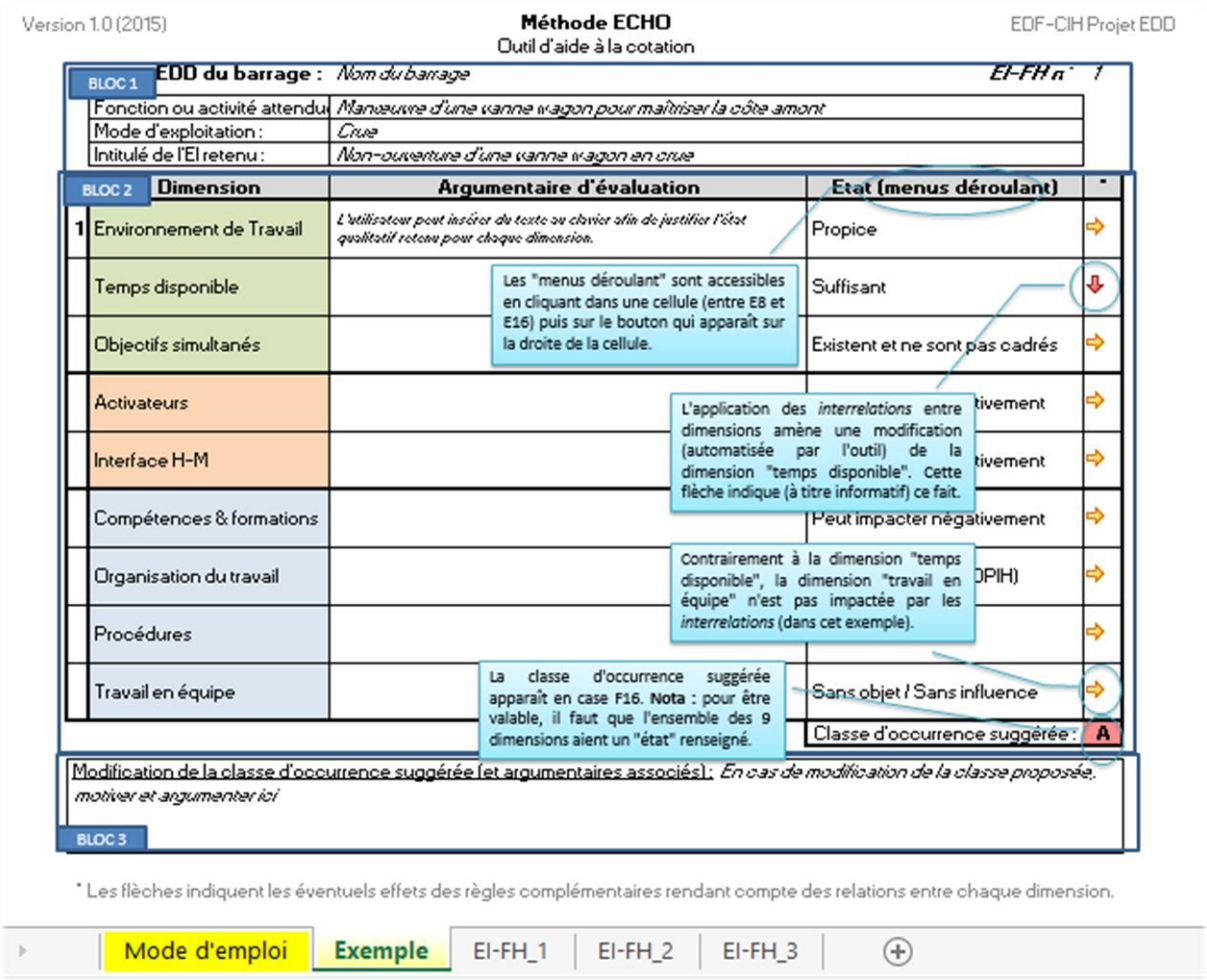

Figure 55 : Ecran de prise en main de l'interface ECHO. Le bloc 1 permet l'identification de l'ouvrage et de l'EI-FH considéré, le bloc 2 est utilisé pour le recueil des éléments d'analyse du GT-EDD et les états des neuf dimensions, le bloc 3 permet de justifier une modification de la classe d'occurrence proposée.

L'une des principales motivations pour la création d'un outil informatique destiné aux GT-EDD était de respecter la contrainte de deux heures de travail en groupe. La méthode est apparue robuste et source de progrès dès ses premières versions mais s'est avérée impossible à déployer dans le temps imparti. L'une des étapes les plus chronophages était l'application successive des trois règles logiques aux neuf dimensions. L'automatisation de cette étape permet d'économiser un temps conséquent pour que les GT-EDD le consacrent à l'étude des dimensions. ECHO a ensuite été perçu comme une opportunité majeure de rendre la méthode opérationnelle en exploitant les possibilités d'induire des usages à travers l'ergonomie. La première interface proposée a été modifiée, suite aux premières utilisations, aux retours des utilisateurs et aux données d'observation en GT-EDD (3.3).

Dans le bloc 1 : la formulation de la fonction attendue vis-à-vis du procédé et du mode d'exploitation avant d'expliciter l'EI-FH a été pensée pour accompagner le changement de représentation du facteur humain « négatif », réduit à l'approche individuelle de l'erreur, vers un facteur humain « non-négatif » intégrant et des facteurs de contexte et l'idée de contribution humaine favorable à la gestion de la sécurité. En effet, ce cheminement encourage à intellectualiser la fonction attendue de l'opérateur vis-à-vis du procédé de manière plus objective, sans présager qu'elle soit correctement réalisée ou non, avant d'en exprimer une formulation déterministe sous forme d'EI-FH.

Le deuxième bloc présente les dimensions dans un ordre préférentiel d'étude. La dimension *environnement de travail* incite le GT-EDD à considérer le contexte physique dans lequel se déroule l'activité. La dimension *temps disponible*, ensuite, à déterminer la temporalité de l'action. Les dimensions sont ensuite présentées des plus au moins généralement discriminantes. Dans le sens de lecture, les lignes suggèrent la saisie des arguments avant de proposer la sélection de l'*état* afin de diminuer la tendance de justification *a posteriori.* Nous n'avons pas tenté de mesurer l'efficacité de ces critères ergonomiques. Toutefois, nous estimons que leur multiplication et leur articulation est de nature à produire des effets. Le deuxième bloc permet enfin de préparer les éléments de justification de la cotation à intégrer dans l'EDD. L'outil ECHO permet ainsi la transition entre le travail de groupe et le travail individuel du pilote-EDD. Le choix d'un formalisme *tableau* pour la restitution est réducteur. Le niveau de détail atteint dans des cellules équivaut rarement celui de la rédaction de texte structuré. Pour autant, l'outil tableau permet un important guidage de l'utilisateur, l'un des critères de conception, incite le traitement équivalent de toutes les dimensions par un effet d'affichage et facilite la cohérence inter-EDD, un autre critère de conception.

Enfin, l'outil ECHO se comporte volontairement comme une boîte noire. L'utilisateur n'a pas accès au processus de réduction du réel opéré entre les états qualitatifs et la classe d'occurrence. Cette fonctionnalité a été souhaitée pour prévenir du phénomène de rétro-cotation. Ce phénomène occasionnellement observé par ailleurs consiste à réaliser l'analyse en fonction d'un résultat souhaité *a priori,* induisant un puissant biais dans l'EDD.

Effets sur les rôles et responsabilités dans les GT-EDD

ECHO est indifféremment utilisé pour qualifier l'outil informatique destiné aux GT-EDD et le dispositif FOH conçu pour l'étude des EI-FH qui comprend un modèle, une méthode et un outil. En tant que dispositif, ECHO a des implications élargies sur les rôles et responsabilités dans le GT-EDD. Les rôles des pilotes-EDD et des représentants de l'exploitation sont essentiellement renforcés, ce qui représente une évolution par rapport aux pratiques observées où les EI-FH étaient essentiellement cotés par les CVT, au même titre que les autres EI techniques. Le dispositif contribue ainsi à l'atteinte d'un de ses objectifs : renforcer l'expression de l'exploitant au sein des GT-EDD et ainsi recueillir autant d'éléments de REX formels ou informels afin de faire progresser la connaissance des mécanismes d'exploitation des ouvrages. Le Tableau 26 présente les tâches des différents acteurs des GT-EDD pour l'étude des EI-FH, en fonction de la phase de l'EDD.

En ce qui concerne la planification des EDD, la mise en place d'ECHO a essentiellement modifié trois phases. La collecte et les visites de sites sont exploitées pour réunir des éléments qui seront pris en compte dans l'analyse. Avant ECHO, les FOH ne faisaient pas l'objet d'attentions particulières dans ces phases qui représentent pourtant un moment privilégié pour l'observation des environnements de travail, mais aussi pour favoriser l'expression de l'exploitant qui se trouve sur son lieu de travail. Les réunions d'analyses de risques du GT-EDD, l'APR et l'ADR, ont désormais une durée explicite consacrée à l'étude des EI-FH, la méthode et les outils soutiennent un ordre d'étude et en garantissent la comparabilité (cohérence inter-EDD). Enfin, des temps en dehors des séances du GT-EDD sont désormais exploités pour permettre au pilote-EDD de rédiger les arguments soutenant les cotations, destinés à intégrer le huitième chapitre des EDD, consacrés à l'analyse de risque.

Tableau 26 : Synthèse des rôles des différents acteurs en fonction des phases de production d'une EDD.

Entités	Acteurs	Phases	Rôles dans l'étude des EI-FH (avant déploiement d'ECHO)	Rôles dans l'étude des EI-FH (après déploiement d'ECHO)
Bureau d'étude	Pilote-EDD	Collecte de documents	-	Collecte les documents relatifs aux neuf dimensions et les transmet à l'ensemble du GT. *(Notes d'organisation, procédures, modes opératoires, plans de formation)*
		Visite de site	-	Aidé d'un guide de visite FOH, observe, photographie les espaces de travail. Questionne l'exploitant sur les conditions de réalisation des activités.
		Réunions GT (ADR, APR)	Contribue à l'application de la méthodologie.	Aidé du *guide utilisateur* et de l'outil ECHO, anime les échanges du GT. Utilise, le cas échéant, les questions de relance. Renseigne les champs de l'interface ECHO pour justifier des *états* de chaque dimension et la classe d'occurrence. S'assure la classe d'occurrence est validée par le GT.
		Hors séance GT	Consolide la présentation des éléments d'analyse et de cotation.	Consolide la rédaction des arguments et la présentation des éléments d'analyse et de cotation.
UP	Représentant état-major	Collecte de documents	-	Fournit au pilote-EDD les documents relatifs aux dimensions d'organisation. Exerce un devoir d'alerte en cas de document manquant ou non actualisé.
		Visite de site	-	Assiste le pilote-EDD dans l'observation des espaces de travail et le questionnement de l'exploitant.
		Réunions GT (ADR, APR)	Participe aux échanges animés par le pilote-EDD ou le CVT et, en cas de sollicitation explicite, apporte des éléments complémentaires.	Porte à la connaissance du GT les éléments de gestion, de fonctionnement et de REX liés à l'organisation. Participe aux échanges animés par le pilote-EDD.
		Hors séance GT	-	-
	Représentant GU	Collecte de documents	-	Réunit et fournit au pilote-EDD les documents relatifs aux activités d'exploitation *(procédures, modes opératoires, fiches réflexes)* et de REX (*liste des ESSH*). Exerce un devoir d'alerte en cas de document manquant ou non actualisé.
		Visite de site	Porte à la connaissance du GT des éléments de REX intéressant les EI-FH (à la discrétion de l'acteur)	Accompagne le GT durant la visite et contribue, par sa connaissance des installations et de leur fonctionnement, à mettre en avant les éléments intéressant l'analyse des EI-FH. Peut compléter la collecte par le partage d'éléments de REX non formalisé.
		Réunions GT (ADR, APR)	Participe aux échanges animés par le pilote-EDD ou le CVT, notamment en cas de sollicitation directe pour apporter des éléments d'information sur l'ouvrage.	Participe aux échanges animés par le pilote-EDD. Apporte une description des modalités de réalisation des différentes activités considérées comme EI-FH potentiels.
		Hors séance GT	-	Réunit, le cas échéant, des éléments complémentaires entre deux séances du GT. Porte, le cas échéant, des questionnements auprès d'autres membres de l'équipe d'exploitation non présents dans les séances du GT.
CIH	CVT	Collecte de documents	-	-
		Visite de site	-	-
		Réunions GT (ADR, APR)	Contribue à l'application de la méthodologie et valide la cotation qui en découle.	Participe aux échanges animés par le pilote-EDD. Porte, le cas échéant, des éléments de REX sur les EI-FH rencontrés dans d'autres GT.
		Hors séance GT	-	-

3.2. Première validation : une expérimentation contrôlée

Le modèle FOH-EDD, la méthode d'analyse des EI-FH portée par le guide utilisateurs et l'outil ECHO s'articulent pour former le dispositif ECHO. Pour tester le pragmatisme opérationnel de ce dispositif, nous avons eu recours à un dispositif expérimental contrôlé inspiré des méthodes de *tests utilisateurs.* Pour réaliser ce test, nous avons simulé la mise-à-jour d'une EDD dans les conditions les plus réalistes possibles. Un GT-EDD a été constitué, il a effectué une collecte de documents et une visite du barrage sélectionné et a ensuite bénéficié de deux demi-journées de travail en salle pour utiliser le dispositif ECHO. L'ensemble du test a été conduit et observé par deux membres de l'équipe de conception d'ECHO. Afin de mesurer les effets produits par le dispositif ECHO et de recueillir les avis des utilisateurs, deux questionnaires ont été remplis par les participants au test. Le premier précédait le test avec pour objectif de renseigner des éléments administratifs sur les participants, leur degré de connaissance et leurs représentations des FOH et leurs attentes vis-à-vis du test. Le second succédait au test avec pour objectif de recueillir les avis et les expériences des utilisateurs ainsi que leurs éventuelles suggestions d'amélioration.

Dans cette partie, nous détaillons la préparation du test et le choix du site d'expérimentation (3.2.1). Nous présentons ensuite son déroulement et les résultats des échanges avec les participants et de l'observation du test (3.2.2). Enfin, nous discutons des limites et biais de ce protocole pour déterminer les perspectives qu'il dégage pour la suite de notre démarche (3.2.3).

3.2.1. Choix du site, mise en place du test

Une fois l'idée d'un test utilisateur validée par l'équipe de conception, la première tâche a consisté à choisir un site pouvant accueillir l'expérience. Le site devait avoir fait l'objet d'une EDD selon les critères du Guide FH 2012, présenter une variété significative d'EI-FH[240] et avoir une équipe d'exploitation expérimentée de telle sorte qu'elle ait une connaissance fine des aménagements et qu'elle puisse porter des éléments de REX à la connaissance du GT-EDD test. Des critères opérationnels sont enfin entrés en jeu dans cette sélection, tels que la charge de travail des équipes ou les contraintes calendaires.

Choix du site test

Le site retenu est un barrage poids béton de classe A en référence au décret 2007-1735 du 11 décembre 2007, dont l'EDD a été réalisée en janvier 2012. Le barrage, mis en eau en 1930, est exploité au fil de l'eau et alimente une usine hydroélectrique située à 800 m à l'aval. Il est de conception poids curviligne, d'une hauteur de 26,60 mètres au-dessus du terrain naturel et d'une longueur totale en crête de 160 mètres. La retenue d'une superficie de 7 hectares représente un volume total de 451 000 mètres cubes d'eau. En cas de rupture du barrage, l'EDD estime que 4

[240] Certains barrages, par leur conception technique, ne présentent que peu ou pas d'EI-FH. C'est par exemple le cas de barrages non-vannés à seuils déversant libres. D'autres, au contraire, font l'objet de nombreuses actions humaines en lien avec la sûreté (autant d'EI-FH potentiels), en raison de la présence de nombreuses vannes ou de spécificités dans l'exploitation.

hameaux et/ou villages seraient impactés par l'onde de submersion et que 411 personnes seraient potentiellement impactées. Le principal axe routier de la région serait impacté localement en plusieurs points.

Un arrêté préfectoral interdit l'accès au tronçon court-circuité depuis le barrage jusque 65 mètres à l'aval de l'usine EDF. Toutefois, ce secteur est classé en réserve de pêche et une base de canoë-kayak et un camping sont situés environ 200 mètres à l'aval de l'ouvrage. Des panneaux EDF d'information au public sont implantés au niveau de l'accès aux rives. La baignade est non autorisée jusqu'à 1 kilomètre à l'aval du barrage. Les aléas météorologiques auxquels peut être soumis l'ouvrage (neige, gel, vent, foudre) n'ont jamais occasionné d'incident d'exploitation significatif depuis la mise en service de l'ouvrage. Cependant, des conditions climatiques défavorables peuvent empêcher l'exploitant d'accéder au barrage (neige, tempête) ou favoriser la formation d'embâcles suite à la chute d'arbres dans la retenue (vent).

L'ouvrage est exploité par le personnel du GU, environ 17 agents, qui exploitent également les autres aménagements du groupement. Le personnel est formé, régulièrement entraîné et recyclé à la mise en œuvre des principales procédures d'exploitation, notamment en crue. Des contrôles managériaux, des audits et un système de qualifications garantissent que le personnel est qualifié et compétent pour les tâches qui lui sont confiées. En dehors des épisodes de crue, il n'y a pas de personnel présent en permanence au barrage. Les techniciens d'astreinte du GU sont joignables 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 pour assurer la surveillance en cas de défaut sur le barrage et, le cas échéant, déclencher une intervention. L'exploitation de l'ouvrage est encadrée par des consignes qui prescrivent des dispositions applicables dans les différents modes d'exploitation : en exploitation normale, en crue ou en essais.

Selon ces consignes, l'état de crue est décrété par le chargé d'exploitation de l'ouvrage lorsque certains critères de cote et de débit sont atteints ; il est précédé d'un état de veille qui permet de préparer l'ouvrage au passage de la crue, de mobiliser le personnel nécessaire et de se rendre au barrage. Pendant toute la durée de la crue, un service de quart est assuré par un agent présent en permanence sur le site, qui assure la conduite de l'ouvrage et sa surveillance.

Les ouvrages d'évacuation de crues comprennent deux vannes wagon en rive gauche, chaque vanne est constituée d'une vanne supérieure ou vannette et d'une vanne inférieure. Un clapet automatique à flotteur en rive gauche. Un clapet central. La vidange de fond, d'un débit nominal de 200 mètres cubes par heure, participe également à l'évacuation des crues. Le résumé non technique de l'EDD de 2012 précise que « *les principaux risques liés à l'évacuateur de crues sont des ouvertures intempestives de vannes potentiellement dues à l'erreur humaine ou à des défaillances de contrôle-commande.* [...] *Le principal risque lié à la vidange de fond est l'ouverture intempestive de l'une de ses vannes potentiellement due à l'erreur humaine*. » L'étude des EI-FH, conduite lors de l'EDD avec la méthodologie basique de 2008, ayant suscité des questionnements de la DREAL, une actualisation des arguments et des cotations des EI-FH a été faite en juillet 2013. Cette actualisation, faite à l'aide du Guide FH 2012 pour les 6 EI-FH de l'EDD, fait de l'EDD un cas singulier de recouvrement de ces deux approches. Cas expérimental particulièrement intéressant pour tester ECHO et mesurer les effets qu'il produit sur les livrables relatifs au *facteur humain* dans les EDD.

Préparation et mise en place du test

Le test a été calibré pour permettre le meilleur réalisme possible tout en présentant les contraintes opérationnelles les plus réduites pour le GU. Le protocole comprend la constitution d'un GT-EDD réunissant un ingénieur risque prestataire en qualité de pilote-EDD, un technicien principal d'exploitation, la chef du GU, l'ingénieur MRO de l'UP et deux ingénieurs de l'équipe de conception d'ECHO pour l'animation et l'observation.

En amont du test, une collecte documentaire orientée par le dispositif ECHO a été réalisée auprès du GU concerné. Les documents issus de la collecte de l'EDD ont ainsi été complétés par les consignes éventuellement mises à jour depuis l'EDD et la liste actualisée des ESSH sur l'ouvrage. Il a été demandé aux différents participants de s'approprier l'EDD et une brève présentation rédigée du test et du dispositif ECHO leur a été envoyée.

Pour représenter la situation de mise-à-jour de l'EDD, il est prévu que le GT-EDD ainsi constitué effectue une visite d'une demi-journée de l'ouvrage et dispose d'une autre demi-journée de travail en salle pour analyser les EI-FH de l'EDD existante à l'aide du dispositif ECHO.

La visite du site est précédée par un questionnaire qui permet notamment d'évaluer les représentations de chaque participant sur les FOH puis d'une présentation de l'exercice et de la méthode par l'équipe de conception. La séance de travail en salle est suivie par un questionnaire « à chaud » et un échange avec l'équipe de conception.

3.2.2. Déroulement et résultats

Le test s'est déroulé les 2 et 3 avril 2015 dans les locaux du GU concerné, comme dans les cas réels de production ou de mise-à-jour des EDD.

Déroulement

Le test a été conduit sur deux journées consécutives. Les participants se sont montrés investis dans son déroulement à différents niveaux :

- Représentants de l'exploitation : un membre du GU, technicien principal d'exploitation, le chef de GU et un ingénieur MRO de l'état-major de l'UP pour la participation aux deux demi-journées du test.
- Pilote-EDD : un ingénieur rattaché au Bureau d'Etudes ayant réalisé l'EDD. Participation aux deux demi-journées du test précédées d'une information supplémentaire, relative au dispositif ECHO, de deux heures.
- Observateurs CIH : membres de l'équipe de conception du dispositif ECHO. Animation de l'information au pilote-EDD. Introduction du test aux participants et observation des deux demi-journées. Débriefing avec les participants. Production d'un rapport sur le déroulement du test et synthèse des suggestions d'évolution des participants.

Première demi-journée

10h30 – 12h (salle, GU) : Présentation détaillée de la méthode et du test, spécifique au pilote-EDD.

14h – 15h30 (salle, GU) : Présentation du dispositif ECHO, du déroulé du test. Présentation spécifique relative à la visite du site et aux FOH. Partage d'une sélection d'ESSH de l'ouvrage intéressant les FOH.

15h30 - 18h00 (barrage) : Visite du barrage par le GT-EDD, conduite par le pilote-EDD, observée et le cas échéant assistée par un membre de l'équipe de conception. Utilisation du support de visite-FOH.

Seconde demi-journée

8h00 – 11h (salle, GU) : En exploitant l'EDD, l'actualisation de la collecte documentaire et surtout la visite effectuée la veille, le GT-EDD a analysé différents EI-FH. Les modes de travail, le temps nécessaire à l'évaluation des différentes dimensions et EI-FH, les difficultés rencontrées par le GT-EDD ont été observées à l'aide d'une grille d'analyse.

11h – 12h (salle, GU) : Diffusion et remplissage du questionnaire « à chaud » par les participants suivi d'un débriefing visant l'expression des avis positifs et négatifs sur le dispositif.

Dans les quinze jours qui ont suivi le test, les participants ont été sollicités pour la relecture du rapport de test et pour répondre à un court questionnaire « à froid » d'évaluation de la méthode. Ils ont également été informés des modifications apportées au dispositif suite à leurs contributions.

Résultats

Le test s'est déroulé de façon satisfaisante dans le sens où le GT-EDD a été capable de traiter entièrement plusieurs EI-FH à l'aide de la méthode ECHO. A travers l'observation et les échanges, le protocole s'est montré riche en enseignements tant sur les représentations des acteurs en matière de FOH que sur le comportement réel d'un GT-EDD lors de l'utilisation du dispositif ECOH.

Sur le plan des représentations, le facteur humain est défini par les participants comme « *ce qui n'est pas du ressort de la technique* ». Il ressort des différentes réponses au questionnaire précédant le test un bon niveau de conscience de la diversité du facteur humain mais systématiquement associé à ses manifestations négatives[241]. Enfin, un amalgame est fait entre les concepts d'erreur humaine et de défaillance humaine que la méthodologie EDD distingue pourtant. Globalement, l'idée est que l'étude du facteur humain doit « *permettre une meilleure appréciation du risque et de son occurrence* », c'est-à-dire de l'individu comme un risque. Les participants montrent une connaissance satisfaisante des grands principes de la TAO, témoignant d'une culture risque liée à la nature de leurs activités professionnelles. Ainsi, ils identifient quatre axes comme « dignes d'intérêts dans l'étude des EI-FH dans le cadre des EDD » : les *gestes d'exploitation*, *l'activité mentale de l'opérateur*, les *conditions latentes* et la *communication humaine*. Notons toutefois qu'à ce stade, seuls les *gestes d'exploitation* sont explicitement mentionnés et étudiés dans les EDD de barrages et que donc, l'intérêt pour les FOH dépassent son cadre au profit de la mise en place d'actions post-EDD relatives

[241] Les termes *erreur*, *faute, inattention, accident, comportement inapproprié,* apparaissent dans l'ensemble des définitions proposées par les participants pour « facteur humain ».

au facteur humain et la prise en compte du facteur humain dans les autres analyses comme le REX ou les ESSH.

Lors de la visite, le groupe s'est plus aisément intéressé aux dimensions *temps disponible*, *activateurs, procédures*[242], et *IHM* mais exclusivement à travers les commandes déportées. Si ces dimensions ont été considérées avec plus de spontanéité et d'aisance, le support de visite FOH a assuré qu'aucune dimension n'ait été négligée. La visite a indiqué une aisance du GT-EDD pour étudier les dimensions rationnelles ou rationalisables, comme des temps à mesurer, des dimensions en lien à la technique comme les *activateurs* ou l'*IHM* qu'il convient d'opposer à des dimensions plus subjectives ou variables comme la qualité de l'*environnement de travail* ou les *objectifs simultanés*. Il faudra en tenir compte dans le niveau de guidage apporté.

L'observation du GT-EDD durant le test en salle a été révélatrice de la difficulté relative à déterminer les situations dans lesquelles l'individu peut exprimer son potentiel maximum d'atteinte à la sûreté et qu'il convient d'étudier en tant qu'EI-FH. Le GT-EDD montre une tendance à approcher les questionnements sur les EI-FH de manière causale et négative (« *l'opérateur n'a pas ouvert la vanne, pourquoi ? »*) alors que le dispositif ECHO suggère une approche inverse (l'opérateur doit ouvrir une vanne, dans quel contexte va-t-il réaliser l'activité ?)[243]. Le pilote-EDD affirme d'ailleurs qu'en matière de FOH il « *raisonne toujours intuitivement en négatif, sauf pour les barrières* ».

En salle, les dimensions les plus rapidement étudiées sont *environnement de travail***,** *IHM* et *procédures*. La dimension *temps disponible* soulève de nombreux échanges du GT-EDD notamment sur le choix de la situation à considérer qui dépend des configurations des vannes, des débits entrant, des modes d'exploitations et de leurs consignes associées. Si *temps disponible* est l'une des dimensions les plus longues à étudier (20 – 30 min), son caractère dimensionnant oriente l'étude des dimensions suivantes qui apparaissent comme « objectivées » aux participants et sont traitées plus rapidement (5 – 10 min). Les dimensions *objectifs simultanés*, *activateurs* sont celles qui ont le plus de mal à générer des consensus. L'observation montre aussi un phénomène d'allers-retours entre réflexion et cotation : une première réflexion est effectuée et conduit le GT-EDD à l'étape de cotation, de nouveaux éléments sont envisagés au moment de coter ce qui relance une phase de discussions et de réflexion et prolonge l'étude de l'EI-FH. Enfin, l'approfondissement des réflexions sur les FOH a fait émerger des différences de représentation des activités d'exploitation entre le chef du GU et le technicien principal d'exploitation[244]. Ces phénomènes témoignent du caractère réflexif de l'application d'ECHO au sein d'un GU qui permet de réquisitionner et mettre en discussion des aspects non techniques de l'activité professionnelle.

[242] Notamment celles de gestion des embâcles, spécifiques au site étudié.

[243] L'exemple suivant est une autre illustration des problèmes de posture du GT-EDD dans l'utilisation d'ECHO. L'EI-FH est « *geste inapproprié conduisant à l'ouverture intempestive d'une vanne* ». Pour l'étude du « temps disponible » les participants au test soulèvent un blocage alors qu'ils cherchent à étudier « le temps disponible pour réaliser l'ouverture intempestive », autrement dit le temps disponible pour réaliser quelque chose que l'opérateur n'est pas censé réaliser ceci témoigne de la tendance naturelle des analystes à postuler l'erreur avant d'en expliquent les causes. Après le rappel que la méthode ECHO suppose d'étudier les influences de neuf dimensions sur la réalisation d'une activité, le GT-EDD a pu lever le blocage en déterminant que « le temps n'est pas une dimension de nature à affecter une éventuelle ouverture intempestive » et en retenant l'état *neutre*.

[244] Par exemple, au sujet d'une alarme : « *tu as une alarme sur ton clapet central, grâce à ça tu sais que ton APB (Automate Programmable Barrage) ne contrôle plus* » (chef de GU), « *non, avec ça moi je vais voir pourquoi le clapet est en panne* » (technicien principal d'exploitation).

A l'issu du test, un second questionnaire et l'expression des participants durant le débriefing ont révélé que les participants estiment que l'EDD est une source de progrès dans la sûreté et qu'il est intéressant d'en améliorer la partie FOH par la mise en place d'une nouvelle méthode. Toutefois, ils estiment que l'étude des EI-FH est rendue délicate par son « *périmètre qui n'est pas intuitif* », et le fait que « *beaucoup de facteurs entrent en jeu* ». Enfin, la nécessité d'employer des « *cas enveloppe qui ne permettent pas de tout voir* » limite la portée de l'étude, la rendent délicate et chronophage. Le principe de la balance marque une évolution majeure dans l'analyse de facteur humain dans les EDD car il n'est plus « *nécessairement analysé de manière négative* ». Via la mise en place de critères d'analyse « *relativement détaillés* » ou d'une analyse « *séquentielle puis interactionnelle* ». Ces remarques sont très positives dans le sens où l'un des objectifs de conception de la méthode était d'aider à modifier les représentations négatives des FOH vers des représentations plus équilibrées entre réussite et erreurs.

En comparaison au Guide FH 2012, le dispositif ECHO n'est pas jugé plus complexe, bien que les objectifs de cotation soient reconnus différents. La méthode est estimée plus longue mais plus complète avec une qualité des résultats augmentée.

> *« Il est intéressant de dépasser l'analyse restrictive des seuls gestes pouvant conduire à l'erreur pour approcher la réalité quotidienne de l'exploitant au quotidien, dans son environnement. La méthode permet de voir plus de choses durant la visite ou en réunion, de capter des points de fragilité et des points positifs. »* (Extrait de verbatim du débriefing)

Le dispositif ECHO permet donc, selon les participants, de « *mieux représenter la réalité et être plus pertinents car prenant en compte le « vécu » de l'exploitant* ». Ces retours se sont montrés très encourageants quant à la réussite de l'objectif consistant à renforcer l'expression de l'exploitant au sein des GT-EDD.

3.2.3. Limites, biais et perspectives

Le test utilisateur, puisqu'il a permis de recueillir de nombreux éléments sur les besoins d'adaptation du dispositif en vue de son déploiement opérationnel a été jugé satisfaisant par les participants et par l'équipe de conception. Il convient toutefois, comme dans tout dispositif expérimental « contrôlé » d'expliciter ses principaux biais et ses limites afin de faire le meilleur usage possible des enseignements qu'il permet.

Limites et biais liés au dispositif de test

La première limite à ce test utilisateurs est liée à l'absence d'ingénieur CVT au sein du GT test. Normalement au nombre de trois, les CVT sont chargés de contribuer et valider les aspects techniques de leurs domaines respectifs (génie civil, contrôle-commande et électromécanique). S'il n'a pas été jugé intéressant de mobiliser des CVT dans le cadre d'une expérimentation exclusivement consacrée aux EI-FH, leur absence introduit un biais. En effet, si les CVT n'ont pas de rôle explicitement formalisé à jouer dans l'étude des EI-FH, leur présence tout au long du processus de rédaction ou d'actualisation de l'EDD les implique profondément à tous les niveaux. Ce biais sera

contourné à l'aide du second processus de validation (l'observation écologique[245] du déploiement opérationnel d'ECHO).

Un second biais est lié à la courte durée du test et au rapprochement dans le temps de ses deux composantes (visite, analyse). L'EDD est un processus long, itératif et séquencé qui conduit progressivement le GT-EDD à s'approprier conceptuellement l'ouvrage. Cette connaissance du barrage est affinée lors des séances de travail en salle mais également lors des nombreux échanges d'écrits et de documents entre les membres, en dehors des réunions du GT-EDD. Dans le cas de notre test utilisateur, deux demi-journées consécutives n'ont pas permis aux participants d'obtenir une appropriation suffisante de l'ouvrage de nature à fluidifier les échanges. Ce point s'est avéré critique car les participants n'avaient pas consacré de temps spécifique à l'appropriation de l'EDD-1 et que le technicien d'exploitation, bien que de grande expérience et largement investi dans le test, n'avait pas participé à la rédaction de l'EDD en 2012. Une part importante du test a ainsi été consacrée à la réappropriation de l'EDD existante et à la présentation des fondements de « l'approche EDD » à l'exploitant. Ces points ont diminué le nombre d'EI-FH que les participants ont effectivement traité.

La troisième limite peut être considérée en lien avec la précédente. Elle est liée à l'exercice même de mise-à-jour des EDD. A de nombreuses reprises, après un temps d'appropriation, les participants ont remis en cause la structure des nœuds papillon rédigés, avec une autre méthodologie, début 2012. Ces questionnements de fond, raison même de l'actualisation des EDD, dépassent largement le cadre des EI-FH sans pour autant en être tout à fait indépendants. Ainsi, le GT-EDD test a été perturbé par des considérations hors champ du test, inhérentes au contexte de mise-à-jour.

Enfin, lors du test, l'outil informatique ECHO utilisé était une version beta. Cette première version n'intégrait pas le module « règles complémentaires » et bénéficiait d'une ergonomie très rudimentaire. Si le test a permis de déterminer un ensemble de spécificités nécessaires au développement de l'interface finale de l'outil, sa version beta a représenté un manque à gagner en termes de guidage des participants et d'efficacité dans le traitement des EI-FH.

Limites du dispositif ECHO exprimées par les participants

Tout au long du test, les participants ont été invités à expliciter à oralement leurs difficultés, incompréhensions ou besoins liés au dispositif. Les deux membres de l'équipe de conception, chargés d'animer et d'observer le test ont apporté les réponses nécessaires à la poursuite du test et systématiquement relevé les erreurs, les hésitations, les blocages, les doutes ou les discordes entre participants qui pouvaient être générés par ECHO.

Le point le plus récurrent est l'émergence de questionnements relatifs aux périmètres des différentes dimensions. Afin de diminuer ces questionnements chronophages lors du déploiement opérationnel, nous avons été amenés à remanier et préciser certaines définitions de dimensions (environnement de travail, activateurs, organisation du travail et travail en équipe)[246].

Des difficultés ont également été relevées au sujet de l'évolution d'une approche négative à une approche non-négative du facteur humain. La méthode ECHO implique de considérer l'activité attendue de l'opérateur vis-à-vis du procédé sans présager de sa réussite ou non. C'est l'étude des

[245] Voir infra.

[246] Les définitions présentées dans la partie 3.1.3 intègrent les modifications qui ont été apportées après le test.

dimensions et de leurs états qui permet d'estimer la *probabilité* d'occurrence d'une non-réussite que l'on nomme EI-FH. Pour dérouler cette méthode et utiliser l'outil, il faut en quelque sorte réapprendre à se poser des questions concernant le rôle des individus dans le système, sans chercher de prime abord des causes d'échec. Les manifestations d'une culture professionnelle ou des représentations individuelles sont le plus souvent inconscientes, diffuses, subjectives et indépendantes de la volonté propre des acteurs. Ainsi, les difficultés liées à la « posture négative » ne sont pas explicitées par les participants au test et c'est le regard externe de l'observateur-concepteur qui permet de nommer et de dépasser le problème. Ce point a été l'objet de réflexions approfondies à l'issue du test et ces réflexions sont toujours en cours : le principal enjeu d'ECHO est de réussir une évolution culturelle chez les différents contributeurs aux EDD.

Les participants ont enfin été préoccupés par la maîtrise du temps[247]. Les observateurs ont alors rappelé que c'est le dispositif qui était testé et non la capacité du GT-EDD à gérer des objectifs à l'aide de la méthode. La qualité du test a été privilégiée par rapport à la quantité d'EI-FH traités. Au final, la moitié des EI-FH de l'EDD ont pu être traités par les participants dans le temps de travail imparti. Il ressort des questionnaires et du débriefing que les facteurs expliquant ces difficultés à tenir les objectifs de temps sont le nombre de dimensions et la richesse des discussions qu'elles génèrent. Etant donné l'importance accordée par le projet-EDD à la maîtrise du temps, nous avons conduit une étude spécifique des facteurs de non-maîtrise de l'objectif lors du test utilisateur.

Gestion du temps, une question de méthode ou de protocole de test ?

Un examen critique postérieur au test nous a permis de déterminer des axes d'amélioration nécessaire pour garantir la capacité des GT-EDD à étudier les EI-FH dans le temps imparti de deux heures, mais aussi de mettre en lumière différents facteurs inhérents au dispositif de test lui-même. Ces facteurs sont regroupés en fonction qu'ils soient endogènes, c'est-à-dire inhérents au dispositif ECHO, ou exogènes, c'est-à-dire indépendants du dispositif.

Facteurs chronophages endogènes

Premier test opérationnel du dispositif dans une version beta (notamment de l'outil). L'objectif principal du test était de vérifier le pragmatisme de nos travaux et surtout de permettre, par l'observation des utilisateurs, d'ajuster les termes des définitions de chaque dimension, le niveau de guidage de la méthode, l'ergonomie des documents et de l'outil. Ces éléments de *forme* ont un impact considérable sur la création de sens pour l'utilisateur, son investissement et enfin, son efficacité. Il était dès lors prévisible que le dispositif *testé* ne permettrait pas l'efficience espérée du dispositif final.

Une étude qualitative souhaitée plus exhaustive. L'une des ambitions du dispositif ECHO est d'obtenir un niveau de connaissance plus important sur les FOH dans l'exploitation des barrages. Le dispositif doit aussi développer et systématiser les arguments associés au choix d'une classe d'occurrence pour un EI-FH. S'il a été demandé à l'équipe de conception de « faire mieux avec autant », une augmentation du temps consacré à l'étude des EI-FH est naturellement inhérente à

[247] Au bout d'une heure, seules deux dimensions du premier EI-FH avaient des états associés ce qui induit une démobilisation des participants. « *Bah ! On va se caler sur les neutres maintenant !* » ; « *Ca fait déjà une heure, on est mal barrés* ». Le dynamisme revient naturellement sur les dimensions suivantes, évaluées en quelques minutes par rapport aux premières, évaluées en une demi-heure chacune.

l'augmentation de la qualité des livrables (la structure et les compétences des GT-EDD étant, par ailleurs, inchangées).

Une évolution culturelle conséquente vers le facteur humain non-négatif. Le dispositif a été conçu pour accompagner (et le cas échéant, déclencher) une évolution dans l'approche et les représentations du facteur humain dans les EDD. L'objectif est de passer d'une approche, dite *classique* ou *négative,* où l'opérateur est réduit à sa propension individuelle à l'erreur à une approche dite *non-négative* ou *positive* qui intègre la contribution humaine à la gestion de la sécurité. A cet effet, nous avons décidé à l'issue du test, de penser l'ergonomie de l'outil informatique dans sa capacité à accompagner ce changement. Par exemple, il est demandé au pilote-EDD de renseigner la fonction attendue avant qu'il ne puisse formuler l'EI-FH (défaut dans la fonction attendue).

Malgré des catalyseurs techniques comme l'ergonomie de l'outil ou organisationnels comme la formation des pilotes-EDD à l'outil ECHO, une telle évolution des représentations ne se décrète pas et ne saurait pas être instantanée. Au contraire, elle implique un temps d'adaptation conceptuelle que le dispositif ECHO entend progressivement stimuler. Le dispositif possède donc un *coût d'acquisition* qui diminuera dans le temps comme la fonction inverse de l'expérience des différents utilisateurs. Notons que ce point, imputable au dispositif et à ses utilisateurs n'est dès lors pas rigoureusement *endogène*.

Facteurs chronophages exogènes

Une première prise en main pour les participants. Bien qu'ils aient reçu en amont du test une présentation écrite du dispositif et que chaque phase du test ait été précédée d'une présentation spécifique par l'un des concepteurs, le groupe utilisateurs utilisait pour la première fois la méthode et les outils. La durée du test a donc représenté une phase de nécessaire montée en compétence et le développement d'automatismes de pensée ou de travail. La durée d'étude des EI-FH doit donc tendre à décroître naturellement avec l'expérience des utilisateurs. Nous rappelons également ici que le test représentait, pour le technicien d'exploitation, la découverte des EDD. Des termes fondamentaux comme *classe d'occurrence*, *nœud papillon*, *évènement initiateur,* ont ainsi dû être explicités durant la séance, situation qui ne peut pas être rencontrée dans le déploiement réel.

Un test regroupé dans le temps. Nous avons déjà évoqué ce point, la conduite du test sur deux demi-journées successives n'a pas laissé aux participants le temps de s'approprier l'ouvrage, sa logique d'exploitation et la structure des nœuds papillon. Ainsi, tous ces coûts cognitifs, incontournables, se sont retrouvés cumulés aux coûts du test d'ECHO de sorte qu'ils en ont pollué la représentativité.

Un ouvrage complexe. Bien que ce choix ait été volontaire pour offrir une variété d'EI-FH, le nombre important de vannes et d'actions humaines a induit une pression sur les utilisateurs qui ont souhaité les étudier dans leur ensemble. Après un recadrage des animateurs, les effets de ce point ont pu être diminués.

On peut donc retenir que le temps conséquent nécessaire à l'évaluation des EI-FH lors du test utilisateurs, en l'état incompatible avec l'objectif initial de 2 heures, est le fait de plusieurs facteurs combinés. Certains facteurs endogènes vont tendre à diminuer dans le temps, au gré des améliorations apportées au dispositif à l'issu du test mais surtout grâce à la montée en compétences

des utilisateurs lors du déploiement opérationnel. En effet, bien que les GT-EDD varient dans leurs constitutions, les différents membres sont issus d'un panel limité de collaborateurs. Cette remarque vaut particulièrement pour la fonction de pilote-EDD pour laquelle une dizaine de personnes sont concernées dans le cadre des mises-à-jour d'EDD. D'autres facteurs, exogènes, ne sont pas tant imputables au dispositif et sa conception qu'à celle du protocole de test, ces facteurs ne seront donc pas en jeu dans lors du déploiement opérationnel d'ECHO.

Vers la validation et le déploiement d'ECHO

La synthèse du test et les résultats de l'analyse des questionnaires et du débriefing avec les participants ont été présentés lors d'un CoPil de thèse au premier semestre 2015. Le test utilisateur a été jugé satisfaisant dans le sens où il a permis de formuler des pistes d'amélioration et de développement des outils mais aussi car il a permis d'observer les prémisses d'évolutions dans les perceptions relatives au facteur humain des participants (questionnaires pré- et post-démarche). Enfin, la comparaison qui a été faite des éléments retranscrits dans l'EDD au sujet des EI-FH par les trois méthodes, 2008, Guide FH 2012 et ECHO confirme une nette amélioration dans la finesse d'analyse et de justification des classes d'occurrences des EI-FH.

La complexité conceptuelle, sémantique et théorique des FOH n'apparaît toutefois pas totalement conscrite dans le dispositif ECHO. Le test a fait remonter un besoin de définitions plus explicites des différents termes et du périmètre d'ECHO. Des inquiétudes quant à la capacité de maîtrise du temps ont été unanimement soulevées par les participants. L'analyse qui a été faite des différents facteurs influents sur cet aspect a conduit à la volonté de mettre en place un second protocole de validation des travaux, en situation naturelle. En effet, de nombreux facteurs de non-maîtrise du temps étaient liés au protocole. Les choix de conception (ex : 9 dimensions) et les principes méthodologiques d'ECHO (ex : principe de la balance entre dimensions positives et négatives) se sont quant à eux montrés accessibles, rapidement et correctement intégrés par les utilisateurs.

Il a donc été décidé le déploiement d'ECHO dans les GT-EDD des premières mises-à-jour, à compter de juin 2015 et l'observation-participante de ces séances par des membres de l'équipe de conception.

3.3. Deuxième validation : la sanction du réel

Le second processus de validation a été acté par le dernier CoPil de thèse. Suite aux retours satisfaisants du test utilisateur, il a été décidé que le dispositif ECHO remplacerait d'autorité le Guide FH 2012 dans le référentiel méthodologique de mise-à-jour des EDD à titre expérimental pour les six études planifiées en 2015. Le comportement d'ECHO en conditions naturelles (par opposition aux conditions expérimentales du test) a fait l'objet d'observations de la part des membres de l'équipe de conception.

En parallèle de ce premier déploiement opérationnel, une formation a été construite puis dispensée à l'ensemble des pilotes-EDD et une stratégie de communication a été élaborée.

3.3.1. Communications associées au dispositif ECHO et formation des pilotes-EDD

En amont du déploiement opérationnel d'ECHO dans l'organisation EDF-DPIH, nous avons mis en place un processus de communication et de formation. Cette partie traite des choix relatifs à la communication associée à ECHO, de la création et du déroulement de la formation des pilotes-EDD à la méthode et à l'outil.

Communication

Deux axes de communication ont été définis pour accompagner le déploiement d'ECHO, le premier peut être qualifié de *proactif,* le second qui répond à un phénomène de percolation, de *proche-en-proche.*

L'ambition de sensibiliser par la formation l'ensemble des membres du GT-EDD a été restreinte par la charge que représenterait une telle initiative étant donné la diversité et le nombre des individus potentiellement sollicités. La mise en place d'auto-formations a été étudiée mais n'est pas apparue à même de répondre avec efficacité à l'importance souhaitée de changement des représentations culturelles sur les FOH. Le choix a été fait d'adresser un document d'informations théoriques et pratiques aux GT-EDD dès l'enclenchement de la mise-à-jour et la désignation des acteurs. Le niveau et le volume d'information sont adaptés aux rôles des acteurs dans l'utilisation d'ECHO par l'utilisation de deux notes d'information différentes. Cette communication *proactive* a pour but de renseigner sur les fondements de la vision *non-négative* du facteur humain, le principe d'étude qualitative de neuf dimensions et l'analogie de la balance entre états positifs et négatifs. Pour compléter ces fondamentaux, les pilotes-EDD ont été formés à la méthode et à l'outil ECHO et sont ensuite chargés d'assister le GT-EDD dans l'utilisation après avoir présenté la méthode en séance. La seconde logique est donc axée sur la percolation, via les GT-EDD, comme levier d'évolution culturelle. Le retour d'expérience de la production des EDD de première génération montre une forte empreinte de postures et de vocabulaires, associés à la méthodologie, chez les membres réguliers (et à moindre mesure, occasionnels) des GT-EDD. Nous postulons donc que, dans la durée du processus de mises-à-jour, ECHO est à même d'introduire un changement de représentation du facteur humain dont les effets dépasseront le cadre de l'EDD.

Enfin, la méthode a été présentée dans différentes instances et réseaux avant son déploiement. Ainsi, le réseau des analystes SOH, l'équipe de la R&D d'EDF travaillant sur le facteur humain, le Comité Technique Hydraulique, le comité directoire du projet EDD, le réseau des correspondants UP, ont été informés sur le dispositif et son déploiement. Les différents retours expriment une satisfaction globale, parfois dans une posture d'attentes affirmées autour des FOH, parfois de découverte.

Formation des pilotes-EDD

Lors d'échanges informels approfondis avec le pilote-EDD du test utilisateur, plusieurs besoins de formation associée au déploiement opérationnel d'ECHO ont été identifiés. D'une manière globale, l'objectif est de démystifier le facteur humain dans les EDD, d'expliquer qu'il n'y a pas besoin d'être spécialiste en la matière pour pouvoir mettre en œuvre la méthode. Un second objectif, plus précis, consiste à accompagner un changement de représentation des interactions entre l'opérateur et le système en ouvrant son champ d'analyse.

Les pilotes-EDD ont un profil d'ingénieur risques dont la formation et l'expérience gravitent autour des méthodes instituées de prévention des risques, majoritairement techniques. L'objectif de la formation est de présenter brièvement les fondements scientifiques et méthodologiques à même de rendre compte de façon plus objective des FOH puis d'insister sur la dimension rationnelle et pragmatique de l'outil. Ainsi son fonctionnement est explicité, de l'analyse qualitative jusqu'à la proposition d'une classe d'occurrence par l'outil ; la boîte noire est *ouverte*[248]. Il s'agit de fournir les éléments logiques permettant l'utilisation la plus efficiente possible de l'outil par le pilote-EDD pour garantir la fluidité des réflexions lors de l'étude des EI-FH par les GT-EDD.

Certains points spécifiques de la méthode ont été abordés. La phase de visite de site, avec la présentation détaillée de la *check-list visite FH,* mise à disposition des GT-EDD. L'animation des échanges lors des réunions d'analyse de risque de l'EDD, avec la présentation des *questions de relance,* présentes dans le guide utilisateurs. La formation a exploité un exemple tiré du test utilisateur pour illustrer le déroulement d'une séance et les points d'attentions particulières.

La formation s'est terminée par une séance de questions libres où les pilotes-EDD ont globalement manifesté leur satisfaction quant à la mise en place d'ECHO. Les attentes en tant qu'utilisateurs ont été partagées, ainsi qu'une inquiétude sur la maîtrise du temps imparti. Le retour d'expérience du test utilisateur et les développements ergonomiques de l'outil qui ont suivi ont apporté des réponses à cette préoccupation. Les pilotes-EDD ont également été informés que les GT-EDD des six premières mises-à-jour seraient accompagnés d'un membre de l'équipe de conception en tant qu'observateur et facilitant éventuel. Si, à ce jour, la diversité des profils ne permet pas la mise en œuvre d'une formation (plus) globale à la méthode et à ses fondements, ce sujet n'est pas à délaisser car il est un facteur déterminant du succès du dispositif. Ce dernier point sera développé dans le chapitre suivant discutant des perspectives ouvertes par nos travaux.

[248] L'outil reste cependant une *boîte noire* dans son utilisation concrète par le GT-EDD.

3.3.2. Observation du déploiement d'ECHO dans les premières mises-à-jour d'EDD

Cette partie présente les observations conduites auprès des GT-EDD ayant mis en œuvre ECHO. Notre protocole d'observation ne s'intéresse pas uniquement aux objectifs initiaux et aux critères du cahier des charges, il intègre aussi les effets produits par le dispositif ou effets secondaires. L'impact de ces effets dépasse la réorganisation du référentiel méthodologique et des rôles pour le traitement du facteur humain. Le principe de l'écologie de l'action, qui s'applique à notre projet, veut que « *Sitôt initiée dans un milieu donné, toute action entre dans un jeu d'inter-rétro-actions qui en modifient, détournent, voire inversent le cours : elle échappe ainsi à la volonté de son auteur* » (Morin, 2001), nous cherchons à documenter les actes, les degrés d'investissement, la nature des prises de parole des différents acteurs. En comparant ces données d'observation à celles conduites durant les immersions au début de ces travaux, nous obtenons une représentation des effets secondaires d'ECHO. Ce protocole d'observation est notamment important, dans la phase initiale du déploiement opérationnel car le principe d'écologie de l'action enseigne que l'action risque non seulement l'échec mais aussi le détournement de son objectif initial.

Dans la construction de notre grille d'observation, nous avons anticipé que mettre en discussion le facteur humain peut (devrait) modifier les prérogatives, voire les *rapports de forces* au sein du GT-EDD. En effet, l'expert technique, CVT, n'est plus nécessairement l'« expert » dans ce sujet et l'autorité dans l'analyse doit (devrait) se déplacer vers le pilote-EDD pour l'étude et la cotation des EI-FH. Or, nous avons identifié lors des observations initiales que mettre en discussion le facteur humain recouvre un caractère *anxiogène* pour différents acteurs. Le CVT, rompu à l'exercice rationnel mais surtout engageant une forme de responsabilité dans la signature de l'EDD achevée, peut être réticent à l'étude compréhensive, qualitative, des dimensions humaines. L'exploitant, s'il a participé aux EDD réalisées avant la mise en place du Guide FH 2012, peut s'attendre à un exercice *à charge* articulé autour de l'erreur et avoir développé des mécanismes de défense. Le représentant de l'UP, qui peut être amené, selon ses fonctions, à réaliser de subtils arbitrages entre différents GU de son Unité en termes d'effectifs, de priorisation des travaux, peut craindre que l'EDD ne soit utilisée comme un cahier de doléances. Enfin, le pilote-EDD, chargé du respect des critères de qualité mais aussi de délais dans la réalisation de son étude peut percevoir l'étude des EI-FH chronophage voire ne pas s'estimer légitime dans la direction du GT-EDD pour ce domaine. Ces différents phénomènes font donc l'objet d'une attention particulière des observateurs car ils pourraient nuire au transfert d'autorité et que le CVT, expert technique, fasse graviter les échanges autour des aspects qui apparaissent comme les *plus rationnels* du dispositif tels que l'outil et son processus de réduction par la mathématisation.

Premières données d'observation

A ce jour, l'observation de quatre GT-EDD dans une utilisation *écologique* du dispositif ECHO permet de formuler des remarques préliminaires sur nos travaux. Ces observations devront encore être complétées et affinées dans le temps pour permettre de constituer un réel retour d'expérience. Toutefois il est, à ce stade, intéressant de noter des usages qui semblent témoigner de certaines forces et faiblesses du dispositif et qui sont ainsi à même de dégager des pistes d'amélioration.

Contrairement aux inquiétudes soulevées à l'issue du test utilisateurs, le premier point de satisfaction exprimé par les utilisateurs et observé dans les pratiques concerne la rapidité de

traitement qu'autorise le dispositif. En moyenne l'étude d'un EI-FH varie entre 10 et 20 minutes avec des extrêmes à 3 minutes dans le cas de l'étude d'un EI-FH très similaire à un précédemment étudié et 45 minutes, souvent pour des raisons de complexité de la situation étudiée couplée avec l'appropriation de l'outil pour le tout premier EI-FH de la séance. Sur l'ensemble des GT-EDD observés, la cible de 2 heures est atteinte en comprenant une introduction du pilote-EDD, les échanges sur l'analyse, la rédaction des arguments associés à chaque dimension et la validation des cotations proposées pour l'ensemble des EI-FH. Ce critère est associé à des avancées en matière de qualité de l'analyse et dans le fonctionnement des GT-EDD, sans lesquelles il reviendrait à faire « vite et mal ». Ainsi, l'observation *écologique* montre des évolutions très satisfaisantes dans l'implication et l'expression des exploitants. Un phénomène vertueux pourrait être en train de se dérouler, qui rendrait plus naturelle l'expression du sachant, en effet si l'exploitant doit encore être invité à fournir des éléments d'analyse en début de séance, il semble que son expression se systématise et devienne plus spontanée dans les derniers EI-FH étudiés. Ce phénomène, qui comporte encore certaines limites ou freins que nous exposons dans le paragraphe suivant, sera à observer attentivement dans la durée. D'une manière plus globale, l'investissement de l'ensemble des acteurs du GT-EDD semble renforcé. La clarification et l'objectivation organisationnelle et pratique qui fait des pilotes-EDD les garants de l'étude FOH ne semble pas démobiliser les acteurs qui, par l'usage, s'étaient familiarisés avec ces aspects (certains CVT) mais au contraire fluidifier et faciliter les interventions de chacun au meilleur niveau de contribution possible. Ces premières données d'observation confirment donc l'atteinte de certains objectifs de conception mais également l'émergence de phénomènes positifs. Nous retenons, à l'issue de ce premier déploiement, la satisfaction exprimée des utilisateurs et des commanditaires (Directeur adjoint chargé de la maîtrise des risques du CIH, membres du CoPil).

Certains points restent naturellement des voies d'amélioration, potentiellement conséquentes, de ces travaux. En dépit des efforts destinés à expliciter et clarifier les périmètres respectifs des dimensions afin d'en permettre l'étude individuelle, les GT-EDD rencontrent toujours des difficultés à cerner les dimensions *activateurs* et *organisation du travail.* Ce constat est à rapprocher du peu d'usage effectif du *guide utilisateurs ECHO* dont l'ambition est d'expliciter la méthode d'analyse et ses fondements théoriques ainsi que l'utilisation de l'outil en séance GT-EDD. Les pilotes-EDD trouvent dans l'outil informatique une solution pratique pour présenter, conduire et rendre compte de l'étude des EI-FH. Certains GT-EDD utilisent exclusivement cet outil et obtiennent les cotations en renseignant les *états* à partir du menu déroulant, sans se référer aux définitions des dimensions mais en construisant collectivement leurs propres définitions. Ils mettent ainsi au point des stratégies *ad hoc* pour contourner les blocages et difficultés conceptuelles ou méthodologiques. Si l'expression de l'exploitant est nettement encouragée dans les pratiques, celle-ci n'est pas encore systématique ou naturelle. On note ainsi des cas où l'exploitant est interrogé après que le pilote-EDD ait renseigné l'état de la dimension pour confirmer *a posteriori* plutôt que guide *a priori* l'étude. Certaines pratiques, plus subtiles, peuvent également biaiser la contribution de l'exploitant, c'est notamment le cas de questions qui sont formulées de telle sorte qu'elles peuvent influencer la réponse[249]. Deux derniers points observés se rapportent plus globalement aux questions de représentations culturelles du facteur humain. Le premier est la tendance très marquée à raisonner en termes d'EI-FH plutôt qu'en termes de fonction attendue de l'opérateur vis-à-vis du procédé comme le suggère le dispositif. Cette tendance conduit à des situations potentiellement bloquantes dans l'application de

[249] Par exemple, pour étudier la dimension *objectifs simultanés :* « *tu ne fais que ça ?* », « *c'est bien la première chose que tu fais ?* ».

la méthode[250]. Le second est l'observation d'une forme de réticence de la part des GT-EDD à retenir des classes d'occurrence C (improbable) pour certains EI-FH[251]. Ce dernier point n'est pas dimensionnant en soit car le GT-EDD a toute latitude pour discuter la classe d'occurrence proposée par l'outil et la modifier, néanmoins ces deux observations pourraient souligner, de façon intéressante, les traces culturelles de la méthodologie de 2008, aujourd'hui considérée simpliste. Celle-ci aurait contribué à forger une forme d'état de l'art chez les collaborateurs EDD consistant à accepter que l'*erreur humaine* doit être cotée en A. Il sera intéressant de suivre les développements de ces aspects dans le temps. Ces limites ou ces biais d'utilisation font l'objet de réflexions en termes de développement de l'outil ou de formation des utilisateurs dans la partie suivante.

Le Tableau 27 présente les effets d'ECHO sur l'organisation et les usages relatifs à l'étude et la cotation des EI-FH. Ces effets sont présentés en comparaison avec ceux des deux approches méthodologiques précédentes.

Tableau 27 : Synthèse des effets d'ECHO observés après son déploiement opérationnel, en comparaison des deux approches précédentes des EI-FH.

	Méthodologie 2008	**Guide FH 2012**	**Dispositif ECHO**
Temps de traitement indicatif (très variable suivant les sites)	Inférieur à une heure	2 heures	2 heures
Phase de l'EDD consacrée en partie aux FOH	Séances GT-EDD (ADR, APR)	Séances GT-EDD (ADR, APR)	Collecte, visite, séances GT-EDD (ADR, APR)
Niveau de détail dans l'analyse	Très faible (critère binaire un ou deux opérateurs)	Moyen (EI étudié suivant 4 caractéristiques de l'activité et de son contexte)	Elevé (EI étudié par l'analyse qualitative de 9 dimensions intégrant l'organisation et le contexte)
Membres du GT-EDD par ordre d'implication dans l'étude des EI-FH	CVT	CVT, pilote-EDD, exploitant	Pilote-EDD, exploitant, CVT
Classes d'occurrences admises pour les EI-FH	A, B	A, B, C	A, B, C
Aspects étudiés des FOH	Négatifs (erreur humaine)	Négatifs (gestes inappropriés)	Neutre (activité attendue et facteurs l'impactant positivement ou négativement)

[250] Par exemple, dans le cas des EI-FH d'*actions intempestives* où l'opérateur pourrait ouvrir ou fermer une vanne de façon indésirable. Le raisonnement par EI-FH conduit les GT-EDD à devoir répondre à la question « quel est le temps disponible pour ne pas réaliser d'action ? ». Comment dès lors rendre compte de la dimension *temps disponible* ? Les dimensions ne font sens qu'en regard de la fonction attendue, par exemple dans ce cas, l'opérateur peut être chargé de « contrôler les paramètres de l'ouvrage » ou de « réaliser une manœuvre sur un autre organe mécanique ». Dans le premier cas il s'agit de rendre compte d'une phase d'attente d'évolution et de veille des activateurs en vue d'une éventuelle action. La manœuvre intempestive est bien une défaillance de cette fonction attendue, donc un EI-FH. Selon le contexte, cette fonction d'attente présentera un *temps disponible suffisant* voire *largement suffisant* mais d'autres dimensions pourraient avoir des impacts dimensionnant sur l'activité, comme les *activateurs* ou l'*environnement de travail*. Dans le second cas, l'activité orientée vers un autre organe mécanique a un *temps disponible* propre qui peut être estimé et qui pourra éventuellement prévenir ou inciter la précipitation de l'opérateur qui pourrait manœuvre le mauvais organe de façon intempestive.

[251] Dans un GT-EDD, les membres ont demandé au pilote-EDD de montrer que l'outil n'affiche pas « *que du C* » en fixant tous les états au plus défavorable pour l'expérience.

Rétroactivement, le processus d'ingénierie d'ECHO qui a été présenté dans ce chapitre peut être détaillé comme dans la Figure 56, conformément au processus initial en six étapes (Figure 47).

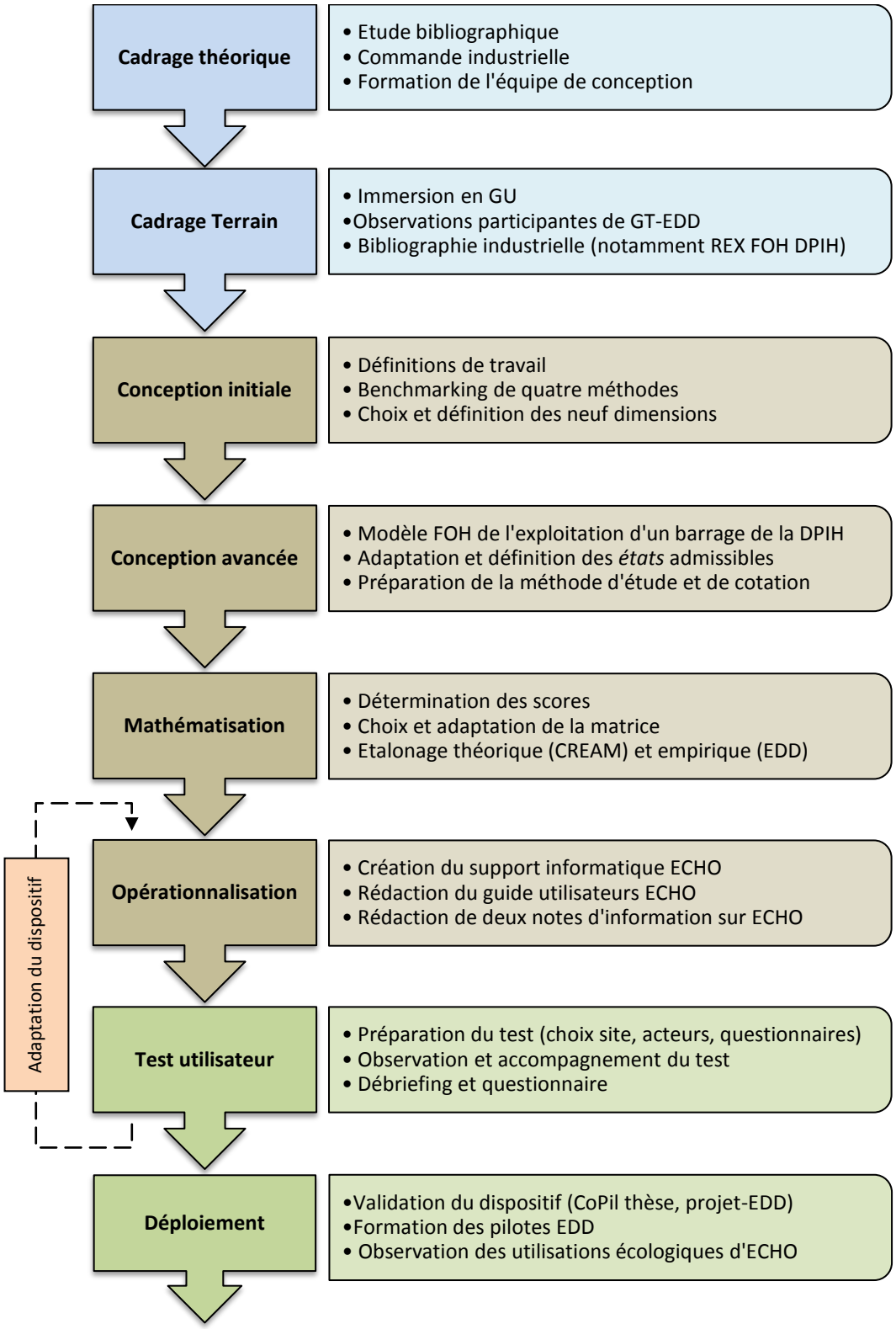

Figure 56 : Synthèse du processus d'ingénierie du dispositif ECHO destiné aux EDD de la DPIH. Les deux premières phases ont été consacrées à la définition des objectifs. Les quatre phases de la conception initiale à l'opérationnalisation résultent des travaux de l'équipe de conception. Les deux dernières phases ont été exploitées afin de tester le dispositif, de l'ajuster puis d'en observer le déploiement opérationnel.

3.3.3. Axes de progrès, perspectives

Le déploiement opérationnel du dispositif, ses premières observations et les retours des utilisateurs nous ont permis de mesurer des effets primaires, sur l'organisation et les pratiques mais aussi secondaires, sur les représentations et les ajustements des usages. Des démarches aussi ambitieuses dans les changements qu'elles entendent produire nécessitent des ajustements dans le temps. Ces axes de progrès reposent sur une acceptation du *principe d'écologie de l'action.* Ils cherchent ainsi à encourager les pratiques observées en accord avec les fondements méthodologiques du dispositif tout en réorientant au mieux celles qui peuvent nuire à l'analyse.

Le premier constat porte sur la faible percolation des principes méthodologiques dans les GT-EDD. Des notions et principes fondamentaux pour une utilisation efficiente sont connus et interprétés de façons très variables en fonction des acteurs. C'est par exemple le cas des notions facteur humain ou d'activité attendue et de principes comme celui de balance entre les états des dimensions. La notion de facteur humain est encore trop souvent réduite à l'étude du comportement individuel et dans ses aspects négatifs. Il apparaît donc qu'ECHO a enclenché une évolution qu'il faut encore accompagner et renforcer. Afin d'améliorer la capacité de l'outil à agir sur les représentations des FOH une réflexion pourrait être utilement conduite sur les biais induits par les formulations des questions sur les réponses de l'exploitant.

De nombreux travaux existent au sujet des biais que peuvent introduire les questions et proposent des parades visant à en diminuer les effets, on peut citer en exemple les ouvrages « *L'enquête : entretiens et questionnaires* » (Fenneteau, 2002 ; p. 88 – 96) et « *Le questionnaire dans l'enquête psycho-sociale* » (Mucchielli, 1993 ; p. 16 – 36). Les écueils les plus souvent mentionnés dans la littérature sur les questionnaires sont décrits et brièvement discutés ci-dessous. Notons que dans le cas d'ECHO, l'optimisation des questions de relance, voire de la façon dont les pilotes-EDD animent les GT-EDD, ne sont pas strictement concernées par les travaux appliqués aux enquêtes et sondages. Toutefois certaines réflexions issues de ces sources apparaissent comme des axes d'amélioration pertinents.

La première considération porte sur le pré-test, cette étape consiste à soumettre un questionnaire à des répondants en situation normale de réponse pour vérifier la conception, la formulation, l'ordre, l'exhaustivité des questions et le temps réel de passation. On peut raisonnablement considérer que le test utilisateur (3.2) a fait office de pré-test dans notre cas. Il est cependant important de mentionner qu'un pré-test devra être envisagé si une démarche d'amélioration du dispositif conduisait à des modifications structurantes dans la méthode (notamment au niveau des questions de relance). De nombreux conseils visent à éliminer les questions qui induisent une réponse ou qui comportent l'opinion de l'intervieweur. En effet, le répondant capte de façon plus ou moins consciente des indices qui traduiraient la réponse souhaitée, ou attendue ; à l'inverse, une alternative perçue comme inacceptable par le répondant sera évitée[252]. Dans le cas d'ECHO, l'observation des GT-EDD (3.3.2) montre globalement que les questions de relance sont encore peu

[252] Par exemple, la question « *la compétence est-elle une dimension importante dans la réussite de l'activité* » est une question (fictive) qui induit une réponse positive. A l'inverse, l'*état* « potentiellement inadaptée » de la dimension *organisation du travail* présente un fort risque d'être interprété comme « inacceptable » et d'être, par conséquent, évité par les répondants.

employées par les utilisateurs et qu'elles sont, le cas échéant, reformulées. Réduire ce biais demande, dans ce contexte, un travail long et conséquent de sensibilisation des acteurs que le projet-EDD n'a pas pour mission d'entreprendre. Il est recommandé d'éviter systématiquement le « jargonnage ». Cette remarque est avant tout destinée aux enquêtes dont l'échantillon ne partage pas nécessairement les mêmes références culturelles, linguistiques. Dans notre cas, le GT-EDD admet une certaine homogénéité dans sa maîtrise du « jargon de l'hydraulique », mais la remarque s'applique d'autant plus fortement au « jargon des FOH » que le dispositif doit pouvoir être mis en œuvre par des utilisateurs non-spécialistes. Les définitions des dimensions, de leurs états et la formulation des questions support ont déjà fait l'objet de considérations dans ce sens. Les questions imprécises ou faisant appel à des échelles de valeur subjectives (beaucoup, souvent, un peu) sont également considérées comme des sources importantes de biais. Ce point apparaît plus contraignant dans les questionnaires destinés à une analyse quantitative, ce qui n'est pas le cas de notre démarche où l'étude est assumée qualitative et empirique (basée sur le REX, les éléments de la visite du site et les échanges avec l'exploitant). Concernant le recours aux questions à choix multiples[253], un biais fréquent est l'exclusion d'un choix qui aurait été souhaité par le répondant. Il convient, dans les enquêtes, de prévoir un champ « autre, préciser » mais l'ouverture que permet cette parade est inadaptée aux impératifs de mathématisation et de cohérence inter-EDD dans le cas d'ECHO. Les premiers retours d'utilisateurs n'ont pas mis en évidence un tel biais mais, il sera intéressant de conduire un REX après un temps significatif d'utilisation d'ECHO et d'inviter les utilisateurs à évoquer des configurations réelles dont il aurait été impossible de rendre compte avec le dispositif. Toujours concernant les *états* des dimensions, la littérature est partagée sur le bienfondé des points neutres. Ainsi, il est conseillé d'utiliser des échelles paires plutôt qu'impaires pour éviter la tendance à sélectionner la réponse médiane. Il ne nous est pas apparu possible d'observer scrupuleusement cette recommandation puisque notre méthode s'inspire du principe de CREAM qui repose lui-même sur un triptyque d'*états* (positif, neutre, négatif). Une parade est cependant prévue en cas d'évaluation « trop neutre » avec la mise en place d'un *point d'arrêt* commandant au GT-EDD de revoir son analyse.

Enfin, les publications consultées insistent sur l'importance de l'ordre des questions et détaillent plusieurs biais qui peuvent être induits ou renforcés par celui-là (effet de halo, effet de contexte, effet de contamination). Le test utilisateur nous a amené à modifier l'ordre des dimensions retenu à l'origine afin de mieux répondre au besoin des GT-EDD de se représenter l'*environnement de travail* dans lequel l'opérateur réalise son activité avant de pouvoir analyser les autres dimensions. Au gré d'un REX de l'utilisation d'ECHO à l'issu d'une période significative, l'ordre des dimensions, des états de chaque dimension ou des questions de relance pourrait faire l'objet de nouvelles modifications.

Nous avons esquissé les principaux axes de progrès du dispositif dans le cadre des GT-EDD qui constituent son périmètre actuel d'utilisation. Dans le chapitre suivant, nous aborderons les perspectives plus larges offertes par les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, non seulement pour l'entreprise EDF, mais aussi pour la communauté des safety sciences.

[253] Mucchielli parle de « *questions cafétéria* » pour qualifier les cas de réponses « *à la carte* », puisqu'on « *a pensé à prévoir toutes les catégories de réponses possibles à une question du genre ouvert »* (1993, p. 25, 26).

CHAPITRE 4 – DISCUSSION ET PERSPECTIVES

UN CADRE POUR LE DEBAT SCIENFITIQUE SUR LES MODELES D'ACCIDENTS

Dans ce chapitre, nous discutons des perspectives générales ouvertes par les travaux de recherche et de conception conduits dans le cadre de cette thèse. L'objectif est de présenter nos démarches dans une perspective plus globale afin de mettre en lumière des axes de développements ultérieurs. Dans une première section (4.1), nous abordons les perspectives industrielles liées au développement de la méthode ECHO. Ce dispositif peut et devrait dépasser le cadre de l'EDD, pour et par lequel il a été conçu. Il contribuerait ainsi plus largement à la gestion de la sécurité des ouvrages hydrauliques au sein de la DPIH. La deuxième section (4.2) développe des perspectives académiques à moyen terme autour de la place des modèles d'accidents dans les programmes de recherche en gestion de la sécurité. Nous avançons que les exercices existants de classification des modèles pourraient avoir atteint un premier objectif de cartographie d'un corpus dense et complexe de connaissances mais également montré certaines limites. Dans la troisième section (4.3) nous proposons des axes de réflexion pour contribuer au débat contemporain sur l'obsolescence ou la contemporanéité des théories et des modèles d'accidents et orienter les recherches futures.

4.1. Perspectives industrielles : les échos d'ECHO

Tout au long de la présentation des travaux de conception et de déploiement du dispositif ECHO, nous avons évoqué des perspectives pour le projet-EDD, commanditaire des travaux, sous la forme d'axes d'amélioration, de REX à produire et de réflexions à conduire. Dans cette section, nous évoquons des perspectives à une échelle industrielle plus large. Pour la DPIH d'abord mais aussi pour la communauté des industriels et chercheurs concernés par la gestion de la sécurité d'ouvrages hydrauliques.

4.1.1. Aller au-delà de l'EDD

Le dispositif ECHO a été conçu pour et par l'EDD, si cela restreint *a priori* son champ d'application, les contraintes opérationnelles contribuent aussi à en faire une solution pouvant intéresser d'autres besoins. Applicable par des personnes non spécialisées dans les FOH et dans un temps réduit, ECHO peut être adapté selon ces objectifs. L'une des ambitions du dispositif ECHO est de contribuer à une évolution culturelle des représentations liées aux FOH. Les effets produits par ECHO, dans le cadre du projet-EDD, doivent être complétés en implémentant, dans d'autres structures organisationnelles de la DPIH, des démarches cohérentes.

Pour structurer nos recommandations, nous convoquons un processus générique d'évolution des conceptions de l'erreur humaine, proposé par Dekker (2007). Ce processus se décompose en six phases : (1) Une crise paralysant l'ancienne conception de l'erreur, (2) la déconstruction de l'interprétation d'origine, (3) l'arrêt des pratiques liées à l'ancienne conception, (4) identifier les aspects positifs de l'action humaine et les sources de sécurité, (5) concevoir des nouveaux moyens de gestion de la sécurité, (6) mettre en place un processus d'apprentissage organisationnel. De portée générale, ce cadre peut être appliqué à la DPIH, plus spécifiquement au périmètre étendu du projet-EDD[254], afin de situer les effets d'ECHO au sein d'un processus global et de déterminer les étapes « franchies » et celles qui, au contraire, devraient faire l'objet de développements ultérieurs.

La première étape du processus de changement, celle de la crise de la conception ancienne, est diffuse dans le cas de la DPIH. La réglementation a évolué pour mettre en place les EDD de barrages mais ne s'est pas spécifiquement saisie de la question du facteur humain. L'état de l'art pour la prise en compte des FOH dans la gestion de la sécurité des barrages est très limité ; pourtant un premier traitement – très simplifié – de l'erreur humaine dans les EDD d'EDF a suscité la mise en débat du sujet entre les services de l'Etat et l'industriel. Le terme de « crise » de la conception ancienne est peut-être un peu excessif dans le cas de la DPIH mais assurément, la mise en place des EDD et les effets produits par la première approche de l'erreur humaine ont initié une évolution de conception des FOH chez différents acteurs de l'EDD. Les effets de cette « perturbation » de la conception ancienne restent cependant limités aux contributeurs « actifs » du projet-EDD.

La deuxième étape est celle de déconstruction de la représentation d'origine. La DPIH est une structure organisationnelle à forte proportion d'acteurs formés à l'approche technique ou

[254] Nous utilisons donc ici ce cadre à une échelle fortement réduite par rapport à celle des travaux de Dekker.

d'ingénierie. Par conséquent, les différents acteurs du projet-EDD, notamment les membres des GT-EDD, ont une approche culturelle technique de la sécurité. Nous avons discuté des implications et des origines de cette approche dans le premier et le troisième chapitre, on retiendra qu'elles soutiennent une approche du scénario d'accident basée sur l'erreur, celle-là étant étudiée sur le plan individuel. L'ambition de faire évoluer les représentations culturellement dominantes des FOH afin de faire évoluer les pratiques a été exprimée dès 2012 et a fait l'objet de développements tout au long de nos travaux de recherche-action. Il convient de préciser que plusieurs démarches, destinées à soutenir l'intégration des FOH dans les mesures de sécurité, existaient avant la mise en place des EDD ; mais que l'approche positiviste de la sécurité, dominante dans l'organisation, a altéré la percolation de leurs fondements conceptuels. L'étendue des emprises de l'EDD de barrage à la DPIH et la périodicité de ces études en font une opportunité singulière de faire évoluer les représentations d'origines par l'implémentation d'un modèle FOH (ECHO).

L'étape de suspension des méthodes et outils liés à l'ancienne conception a été réalisée de façon incrémentale avec la mise en place successive du Guide FH 2012 puis d'ECHO en 2015. Les travaux de recherche et d'ingénierie d'un modèle présentés dans cette thèse ont été effectués avec une commandite conjointe du Chef de projet-EDD et du directeur adjoint chargé de la maîtrise des risques du CIH. Le niveau hiérarchique de ces commanditaires a permis d'agir efficacement sur les référentiels de méthodes, l'organisation des GT-EDD et leurs pratiques, chaque nouvelle méthode (2012 puis 2015) a remplacé celle préexistant d'autorité[255]. Dans le cas d'ECHO, une formation des utilisateurs et un niveau de guidage utilisateur élevé entendent faciliter cette étape.

La quatrième étape vise à identifier les aspects positifs de l'action humaine et les sources de sécurité. On peut raisonnablement considérer que cette étape est remplie sur le plan théorique et conceptuel. ECHO a été développé en accord avec la théorie de l'accident organisationnel, en comparant des méthodes reconnues pour ce qu'elles évitent d'attribuer systématiquement le blâme à l'opérateur en incitant à considérer l'importance de facteurs de contexte ou de facteurs organisationnels. Le guide utilisateur d'ECHO mentionne la nécessité d'adopter une vision positive du facteur humain et fournit, à travers des exemples et des définitions, des éléments d'appréciation des FOH comme sources de sécurité. Il convient cependant de noter que ce travail conceptuel doit être soutenu dans son opérationnalisation. Les observations des premières utilisations d'ECHO montrent que les pratiques et les représentations « classiques » de l'erreur humaine sont encore ancrées. La méthode et l'outil ECHO se révèlent toutefois des moyens encourageants pour la réalisation, dans la durée, de cette étape.

L'étape de conception de nouveaux moyens de gestion de la sécurité, a été réalisée entre 2012 et 2015, telle qu'elle est présentée dans le troisième chapitre.

La dernière étape de mise en place d'un processus d'apprentissage représente un axe de développement ultérieur pour le projet-EDD et plus globalement la DPIH.

En effet, le cadre de Dekker confirme que les efforts d'évolution culturelle devraient dépasser le périmètre du projet EDD. Si les travaux ECHO peuvent être « sortis de l'EDD », adaptés à d'autres

[255] Moyennant les différentes validations, notamment liées au processus d'assurance qualité du CIH et grâce à la volonté affirmée de doter les EDD d'une approche qui bénéficie des apports des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines.

besoins opérationnels identifiés et ainsi, voir leurs fondements théoriques percoler, ils contribueront à élargir ce processus de changement de perception des FOH, vertueux pour la gestion de la sécurité. Passer de l'échelle projet-EDD à celle de la DPIH modifie considérablement un ensemble de paramètres (nombre et diversité des acteurs, niveaux de responsabilités, diversité des activités, etc.) et n'a jamais été un objectif explicite de nos travaux. Il en coûtera certainement du temps, la détermination, maintenue dans le temps, de certains acteurs clefs et la mobilisation croissante de moyens. Toutefois, ces efforts seraient à même de produire un grand nombre d'effets vertueux pour la gestion de la sécurité et le renforcement d'une culture de sécurité.

Notons enfin que « sortir ECHO de l'EDD » produirait, à terme, des effets positifs pour le projet-EDD. Les exploitants participants aux GT-EDD seraient en effet sensibilisés, voire familiarisés, avec les principes de la méthode, ses dimensions. Il serait dès lors possible d'espérer une augmentation de la valeur ajoutée (efficacité, pertinence) de la contribution des exploitants dans les GT-EDD.

Ci-dessous, nous développons deux propositions, à moyen et long termes, visant à aller au-delà de l'EDD sur la base du dispositif ECHO.

Intégrer les FOH dans les analyses d'évènements

Une première évolution pourrait permettre au dispositif d'intégrer le référentiel méthodologique d'analyses d'évènements de premier niveau, dites N1 (1.3.2). Ce rapprochement permettrait de répondre à l'un des besoins identifiés par la mission SOH, de systématiser le recours aux composantes FOH dans les analyses d'ESSH (1.3.2) et plus largement, des accidents du travail (relevant du domaine de Santé-Sécurité au Travail, SST). Les contraintes structurelles de l'analyse de premier niveau sont similaires à celles liées aux GT-EDD. L'analyse d'évènement doit être conduite dans un temps retreint d'un à deux jours (soit un temps total à consacrer aux FOH approximativement semblable au cas des EDD). Cette analyse repose sur un arbre des causes (similaire aux nœuds papillon des EDD). Enfin, l'analyste ne possède pas, *a priori*, de connaissances spécifiques sur les FOH.

La principale évolution qu'il faudrait apporter à ECHO consisterait à le transformer, d'un dispositif d'études *a priori* en un outil d'analyses *a posteriori*. Les neuf dimensions et le modèle qui en résulte pourront demeurer inchangés, toujours exploités à des fins didactiques. Le processus de mathématisation et la matrice de classe devront, en revanche être écartés, au profit d'un nouvel outil d'aide aux analystes qu'il conviendra de développer. Une telle évolution pourrait donc être précédée de la mise en place d'une équipe de conception *ad hoc*, dont l'organisation et le fonctionnement seraient similaires à celle que nous avons constituée dans le cadre de notre démarche. Elle réunirait ainsi un petit nombre d'acteurs comme un ingénieur méthode, un représentant du projet SOH, une personne formée et aguerrie à la réalisation d'analyses N1. La contribution, au moins ponctuelle, d'un représentant du management opérationnel et d'un contributeur externe (doctorant, consultant, prestataire), pourrait également contribuer à l'efficience et au pragmatisme du projet.

Servir de levier aux évolutions culturelles

Une seconde évolution, de portée plus générale, consisterait à porter le dispositif au plus près de l'exploitation. Intégré dans les GU, ECHO pourrait être utilisé par les collectifs d'exploitation comme

un facilitateur de dialogue, grâce à l'évolution culturelle vers le facteur humain non-négatif qu'il soutient. Quotidiennement, des hommes travaillent à la production d'hydroélectricité tout en veillant à la sûreté des ouvrages. De nombreuses dispositions organisationnelles accompagnent, renforcent ou systématisent ces activités mais ces dispositions font l'objet d'ajustements par les acteurs de terrain (De Terssac & Mignard, 2011).

La DPIH a identifié le besoin de développer et maintenir une culture de sécurité (ou de sûreté hydraulique) comme l'une de ses priorités, comme témoignent les nombreuses recommandations, faites dans ce sens, par son Inspecteur Sûreté Hydraulique. Dans un article intitulé « *Achieving a safe culture: theory and practice »,* James Reason (1998) questionne la possibilité d'existence d'une « ingénierie de la culture (de sécurité) ». L'article conclut que pour faire émerger une culture de *sécurité*[256]*,* une organisation doit créer les conditions favorables à l'existence de ce que Reason qualifie de « culture *informée* », c'est-à-dire, faciliter la communication, au sein des équipes, entre les différents niveaux hiérarchiques, renforcer le partage d'expérience. L'une des difficultés identifiée est que les évènements « négatifs » impliquent, le plus souvent, des gestes professionnels considérés comme négatifs (erreurs, contournement des procédures, ajustements exceptionnels ou réguliers, etc.). Déconstruire la représentation « classique », négative et individuelle, associée aux facteurs organisationnels et humains représente donc une première étape, incontournable, vers l'apparition d'une culture de sécurité dans une organisation. Or, c'est bien l'ambitieux objectif poursuivi par le dispositif ECHO.

Nous suggérons qu'une démarche devrait être entreprise au sein des collectifs d'exploitation pour y porter les fondements théoriques du dispositif (modèle, dimensions). Ils pourraient être déclinés sous la forme d'outils de gestion, qui seraient utilisables dans la planification des activités, les briefings ou les débriefings des opérations. Ainsi, l'on peut espérer continuer l'évolution culturelle initiée par ECHO et voir la notion de « *facteur humain positif* » percoler au près d'un nombre plus important d'acteurs de l'exploitation.

Il se peut que la route soit longue ; chaque petite avancée rapproche néanmoins de l'objectif. Comme concluait Reason dans son article de 1998, atteindre une culture de sécurité n'est pas comparable à un phénomène de « *conversion religieuse* ». Il n'y a là rien de mystique. On l'acquiert par l'application quotidienne de mesures simples et pratiques.

4.1.2. Construire une « stratégie » de communication

Un autre domaine de progression offrant des perspectives pour ECHO est la stratégie de communication associée aux travaux. L'entreprise n'a pas, à ce jour, souhaité communiquer à l'externe sur la démarche. Néanmoins, la communication représente un réel enjeu interne.

La stratégie de communication interne de « proche-en-proche » repose sur la capacité des pilotes-EDD à retransmettre les principes du dispositif ECHO. Dans les faits l'information introductive sur la méthode du pilote-EDD au GT-EDD, lors de l'étude des EI-FH, est souvent omise ou négligée. Il est probable que la formation initiale des pilotes-EDD n'ait pas laissé les empreintes nécessaires et qu'il

[256] Où chaque membre de l'organisation comprend et respecte les risques inhérents à ses opérations.

faille réinvestir dans la formation ou l'auto-formation de ces acteurs. Cette hypothèse n'explique pas que face aux questions des membres du GT-EDD, les aides mises à disposition dans le *guide utilisateur ECHO*[257] ne soient pas exploitées. Il est également possible qu'en tant qu'*outil,* ce qui permet d'obtenir un résultat, le guide utilisateurs entre en *conflit* avec l'outil ECHO, tous deux étant considérés, en partie à juste titre, comme des supports à la cotation et donc des outils des GT-EDD. Si ces deux objets (le support informatique et le guide papier) sont comparés en termes d'attractivité (facilité d'utilisation, ergonomie, coûts cognitifs réduits) le recours exclusif au support informatique répond d'une forme de rationalité des acteurs qui cherchent à fluidifier leurs actions et diminuer ce qu'ils peuvent considérer comme des contraintes. L'usage du support informatique, largement naturalisé dans la population concernée, est rendu obligatoire par sa dimension boîte noire[258], son « coût d'acquisition » est donc inévitable. Dès lors, le recours au guide papier représente des « coûts », cognitifs et temporels, qui font l'objet de stratégies de contournement. Le problème est qu'en l'état, l'outil n'est pas pensé comme un support théorique et conceptuel, fonctions attribuées au *guide utilisateur ECHO ;* l'usage du premier au détriment du second affecte la percolation des fondements du dispositif. Les GT-EDD se trouvent donc en position d'inventer des solutions *ad hoc,* basées sur leurs référentiels de connaissances, qui génèrent occasionnellement des incompréhensions voire des impasses méthodologiques.

Etant donné l'observation d'un usage quasi exclusif du support informatique au détriment du guide utilisateurs et l'hypothèse que cela est lié à des stratégies de diminution des contraintes par les acteurs, plusieurs solutions peuvent-être envisagées pour rétablir la percolation espérée des fondements de la méthode. Un *mode opératoire* pour les briefings des GT-EDD pourrait être rédigé et transmis aux pilotes-EDD pour les assister dans cette phase essentielle et ainsi, la systématiser. Ce mode opératoire devra être le plus réduit possible, autant dans sa forme que dans sa mise-en-œuvre ; il précisera les quelques points essentiels à partager au sein du GT-EDD avant de conduire l'analyse. En accord avec l'objectif d'exploiter les usages émergents, quitte à les orienter subtilement, plutôt que de les contraintes, il est également prévu de travailler à une nouvelle version de l'outil. Celle-ci affichera à l'aide d'un pop-up, pour chaque dimension sélectionnée par l'utilisateur, la définition et les questions de relance associées.

En matière de communication hors d'EDF, il a été décidé que la soutenance et la publication de cette thèse feraient office de « première communication externe ». D'autres axes de communication sont identifiés mais restent à être évalués par différentes instances et niveaux de validation dans l'entreprise. Sur le plan académique, l'objectif serait de partager et valoriser nos travaux avec la communauté de recherche des safety science*s*. Sur le plan industriel, des communications dans des conférences (comme les colloques du CFBR) ou dans des revues spécialisées (comme *La Houille Blanche*) pourraient initier des échanges sur la thématique émergente des FOH avec d'autres acteurs de l'hydraulique. Ces choix relèvent maintenant de très nombreuses considérations qui dépassent le cadre que nous souhaitons fixer à notre discussion.

[257] Comme les définitions des dimensions, la nature de leurs interactions et des questions de relance.

[258] Quand bien même un pilote-EDD souhaiterait animer un GT-EDD sans recourir au support informatique, il lui faudrait l'utiliser, le cas échéant « hors séance », pour obtenir une cotation indicative car les règles de mathématisation et les règles logiques complémentaires ne sont pas à disposition des utilisateurs.

4.2. Discussion sur l'objet « modèle »

Dans le deuxième chapitre nous avons conduit une première réflexion sur l'histoire et les usages des modèles. Ce travail met en avant la polysémie du mot modèle, la diversité épistémologique[259] de l'objet et ses nombreux usages. Des auteurs ont proposé différentes approches pour l'exercice de classification (*typologiques, taxinomies*[260]) des modèles, renonçant ainsi à une entreprise unificatrice et rendant compte du fait qu'on « *ne peut sans doute plus définir universellement la notion de modèle* » (Le Moigne, 1987). Dans cette section, nous présentons une sélection de ces travaux de classifications générales des modèles (4.2.1) avant de nous intéresser plus spécifiquement aux modèles d'accidents. Cet exercice de classification des modèles d'accidents apparaît vaste, délicat et laisse apparaître des contradictions entre les auteurs qui semblent découler de considérations épistémologiques, plutôt qu'ontologiques, sur ces objets (4.2.2). *In fine*, nous suggérons que l'exercice de classification, s'il prétend dépasser le statut « d'index de connaissances » pour devenir « prescriptif sur les usages », présente le risque de devenir un exercice réducteur et limité (4.2.3).

4.2.1. Classifications générales des modèles : diversité et complexité de l'exercice

Il existe plusieurs classifications des modèles qui sont dépendantes des rattachements disciplinaires de leurs auteurs ou des objectifs de ceux-là. Nous en présentons trois, que nous avons sélectionnées car elles semblent apporter des perspectives complémentaires pour l'étude des modèles d'accident.

Varenne, une classification épistémologique globale

Une classification des modèles est proposée par l'historien des sciences et épistémologue Franck Varenne (2008). Celle-ci ne prétend pas, selon l'auteur, à *l'exhaustivité* mais constitue, selon nous, l'une des tentatives les plus détaillées. Dans l'article intitulé « *Epistémologie des modèles et simulations »,* l'auteur discrimine vingt fonctions des *modèles* et les regroupe en cinq catégories.

La première catégorie est constituée des modèles qui servent à faciliter l'observation ou l'expérimentation sur des objets ou des phénomènes sensibles (donc mesurables, détectables). C'est par exemple le cas des maquettes ou des modèles réduits grâces auxquels on peut questionner ou éprouver (par l'expérience) des objets autrement inaccessibles dans la pratique (l'auteur évoque les maquettes de dinosaures, du système solaire ou encore les écorchés anatomiques). La deuxième catégorie rassemble les modèles qui assurent la même fonction, facilitant la représentation (l'accès) mais de manière mentale ou conceptuelle (modèles statistiques, ontologies, phénoménologiques ou prédictifs). La troisième catégorie correspond aux modèles servant des objectifs de *théorisation*. Ces modèles permettent d'élaborer une théorie, de l'interpréter, de l'illustrer (à l'aide d'analogies avec d'autres théories), ou enfin de l'éprouver. La quatrième catégorie est celle des modèles *médiateurs* entre différents groupes (disciplines ou domaines) dont les intérêts, ou les représentations,

[259] Walliser (2005) parle de *statut épistémologique hybride* ou *intercesseur*, le modèle n'étant ni pure conséquence d'une théorie préalablement établie, ni pur résumé d'observations.

[260] Les taxinomies sont des classifications empiriques qui se distinguent des typologies développées conceptuellement.

divergent. Varenne note que « d*ans ce cadre-là, un modèle facilite une médiation non entre un objet et une appréhension directement sensible, instrumentée, conceptuelle ou théorique de cet objet. Mais il facilite une médiation entre des discours et des représentations d'acteurs autour d'un problème ou d'un phénomène représenté de manière multiple mais reconnu par toutes les parties en présence comme devant être abordé avec des questions communes* » (*op. cit.*). C'est alors la capacité à faire *collaborer*, faire *communiquer* (pour faciliter l'émergence de questionnements ou les transposer) qui est recherchée, plutôt que celle de production de connaissances ou de théories (réponses). Enfin, une cinquième catégorie porte sur des modèles que l'on pourrait qualifier d'*ultra-pragmatiques*[261] qui ont pour objectif de faciliter « *la détermination d'un type de réponse attendu en termes d'action* […] [pour] *résoudre immédiatement un problème* » (*op. cit.*). Ces modèles « *de décision* » font parfois l'économie des étapes de *théorisation* et de *validation* (Varenne cite en exemple les *modèles de gestion de crise* ou de *gestion de risques financiers*). L'un des effets produits est alors que le *modèle* contribue à créer un *réel* renversant ainsi l'un des attributs (souhaité) des autres catégories où le *réel* détermine le *modèle.*

En se livrant à cette revue épistémologique, Varenne revient sur la critique philosophique des modèles (et plus encore de la simulation[262]) selon laquelle ces outils de la pensée induisent une « *perte du réel* ». Selon l'auteur, si ce risque est réel, l'affirmation peut (et doit) être nuancée par une analyse précise et contextualisée (en termes d'usages, de domaines, de volonté, de méthodes). « [Si] *certaines simulations éloignent de certains niveaux du réel alors qu'elles nous rapprochent de certains autres niveaux. Pour d'autres types de simulations, c'est exactement l'inverse* ». Pour Varenne il est nécessaire pour manipuler les modèles, d'effectuer « *un travail non plus de réduction ou de généralisation surplombante, mais un travail de discrimination critique, de distinction et d'affinement des analyses conceptuelles.* » (*op. cit.*).

Rey, une classification émergeant de l'analyse de discours

Le sociologue du travail et des relations professionnelles Frédéric Rey propose, dans un article intitulé « *Le concept de modèle* » (Rey, 2010), de « *clarifier et de stabiliser la définition même du concept* [de modèle] ». Sa démarche repose sur une étude des *discours* de différents acteurs (scientifiques, politiques, journalistes), relatifs aux usages de l'expression « *Modèle danois »*[263]. Rey propose une classification à quatre niveaux complétée par le constat que souvent, dans l'usage, les dimensions se combinent et peuvent être toutes « activées » simultanément, sous certaines conditions.

L'*usage* du terme modèle peut recouvrir une dimension *normative* lorsqu'il est employé à des fins de valorisation ou promotion, *descriptive* s'il se cantonne à décrire, présenter des caractéristiques ou des attributs réels, *empirique* s'il fait référence à un objet existant ou enfin *théorique* s'il opère une traduction *conceptuelle* de son objet. Rey précise que « *dans les faits, ces dimensions s'entremêlent dans les discours et les prises de parole.* » (*op. cit.*). Il est alors intéressant de définir les différentes combinaisons obtenues. Les modèles *empiriques-normatifs* opèrent une *valorisation* d'un objet ou d'un phénomène concret et se distinguent des modèles *empiriques-descriptifs* qui opèrent une

[261] Ce ne sont pas les termes de Varenne.

[262] Considérée comme « *un type de modélisation qui avoue sans détour son caractère superficiel et pragmatique,* […] *la victoire de la surface, du clinquant, contre le travail honnête et désintéressé de la profondeur dans les modèles explicatifs et la théorisation.* » (*op. cit.*)

[263] L'un modèles socio-économiques les plus influents (et discutés en Europe) dans les années 2000.

description neutralisée de phénomènes ou de faits observés. Viennent ensuite les *abstractions théoriques* ou *conceptuelles* (c'est-à-dire, qui ne font pas nécessairement référence *au réel*) portées par les modèles *théoriques-descriptifs* (théorisation sans visée normative) et les modèles *théoriques-normatifs* qui relèvent « *d'une volonté normative de diffusion et d'imitation associée à un ensemble d'outils formalisés inspirés de l'objet ou du système de référence* » (*op. cit.*). Cette dernière catégorie est souvent en jeu lorsque l'objet ou le phénomène modélisé ne peut pas l'être dans sa totalité et se trouve réduit à ses principales caractéristiques. « *Cet usage se situe alors entre la normativité nécessaire au processus d'imitation et la formalisation en tant que préalable à sa réalisation. Le concept de modèle est ainsi invoqué en tant que méthode, pour son application* » (*op. cit.*). Enfin, l'auteur propose une cinquième catégorie[264] : celle des « *sur-modèles* ». Ces objets ont la caractéristique de « *pouvoir exister simultanément sous ces quatre formes différentes dans l'espace politique, économique et social, académique.* […] *Accédant à la reconnaissance collective, [ils] deviennent vaporeux, comme sujets d'actualité en même temps que références de politiques publiques, outils de gestion et objets de recherche*. » (*op. cit.*).

Il est possible de représenter les *types* de modèles par la double opposition entre le *rapport au réel* (empirique, théorique) et la *finalité d'usage* (descriptif, normatif), ainsi que la notion émergente de *sur-modèle* à l'aide d'un plan (Figure 57).

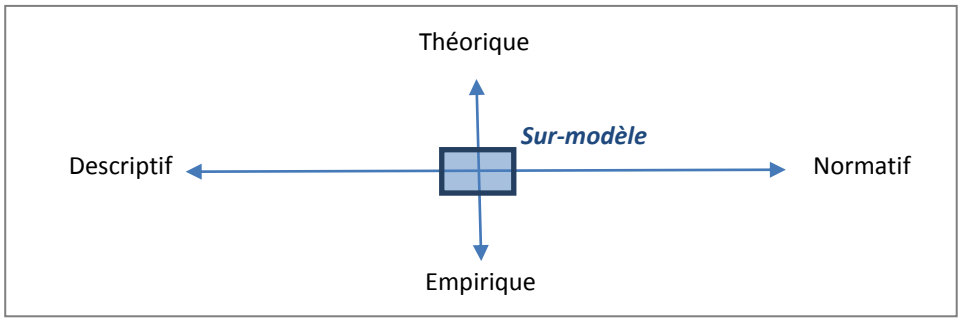

Figure 57 : typologie des modèles et condition d'existence des « sur-modèles » (d'après Rey, 2010)

En conclusion de son article, Rey note qu'« *un premier enseignement vient de ce qu'aucune des quatre dimensions principales du concept n'est absente des débats et des travaux consacrés au modèle danois.* » ce qui l'amène à qualifier le concept *modèle* de « *mot de passe pour quiconque souhaite s'exprimer sur le sujet* [du Modèle danois] *»* (*op. cit.*). Nous reproduisons cette conclusion qui, bien qu'initialement appliquée au « Modèle danois » nous semble s'appliquer parfaitement au cas des *modèles d'accidents* qui intéresse nos travaux.

Walliser, vision intégratrice de l'ingénieur polytechnicien

Nous avons présenté deux classifications différentes des modèles, la première axée sur leur nature (ce qu'il *est* ou, *a minima,* ce pourquoi il a été conçu) et la seconde sur leurs usages. La troisième classification retenue se veut intégratrice de ces deux aspects.

[264] Cette catégorie émerge de l'approche par l'*usage* des modèles qu'adopte Rey. On remarque qu'elle serait *invisible* ou *paradoxale* pour une étude centrée sur leur *nature*.

Dans un livre intitulé *Système et Modélisation,* publié en 1977, Bernard Walliser (ingénieur de l'Ecole Polytechnique et économiste) propose l'étude des modèles[265] suivant trois axes : *syntaxique*, *sémantique* et *pragmatique*. Il s'intéresse donc successivement (1) aux *langages* des modèles (axe *syntaxique*) qui peuvent être de formes verbales, graphiques ou encore recourir aux formalismes logico-mathématiques. (2) A leur signification (axe *sémantique*) qui est essentiellement considérée à travers leurs fonctions médiatrices[266] entre élaboration et compréhension des lois. L'intérêt est dès lors porté sur le *processus de modélisation* (allers-retours entre empirisme et formalisme, expérience et traitement des données) plutôt que sur le *modèle* en tant qu'*objet*. (3) Aux *usages* des modèles (axe *pragmatique*) dans différentes sphères (sociales, scientifiques, etc.). Ces trois dimensions peuvent être représentées dans un référentiel *spatial* (Figure 58).

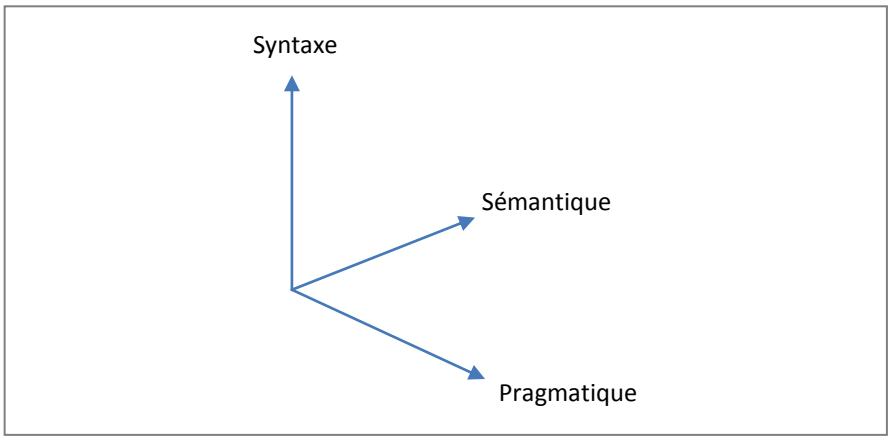

Figure 58 : Les trois axes de classification énoncés par l'auteur définissent graphiquement un « espace modèle » dans lequel situer ces objets pour les comparer (d'après Walliser, 1977)

Walliser considère, en synthèse, que le processus de modélisation s'apparente à une *fonction* (f) liant des entrées (variables *d'environnement* (x) et *de commande* (u)) à des variables *de sorties* (y). La typologie des modèles dépend dès lors de la *variable* à déterminer. L'auteur propose de qualifier un modèle de *cognitif* s'il se rapporte à la fonction elle-même et sert donc à représenter des relations entre entrées et sorties d'un système ; *prévisionnel* s'il se rapporte aux états possibles des variables de sorties (étant par ailleurs fixées les variables d'environnement et de commande) ; *décisionnel* s'il sert à déterminer les variables de commandes en fonction d'états espérés sur les variables de sorties ; et *normatif* s'il sert à représenter les relations souhaitées entre les variables d'entrées et de sorties. Cette vision intéressante est donc celle du *modèle* comme un *système* (avec des données d'entrées et de sorties). L'auteur ajoute enfin quatre *fonctions d'usage* des modèles : *pédagogique* (simplifier des phénomènes complexes), *de recherche* (exploration d'un domaine), *de concertation* (confrontation de proposition d'action) *et idéologique* (Walliser, 1977, p. 179, 180).

Synthèse

Les *modèles* sont des objets courants qui présentent une grande diversité de *nature* et d'*usages*. Les notions de *modèles* et de *théories* se distinguent par leur rapport au réel et leur portée. Si dans

[265] Bien que l'auteur refuse de réduire les modèles aux systèmes d'équations ou programmes informatiques reposant sur des formalismes logico-mathématiques, ceux-ci sont extensivement étudiés dans l'ouvrage au détriment des modèles physiques, graphiques ou iconiques.

[266] Cet axe révèle notamment que les significations dépendent des milieux de production et d'application.

l'usage courant la distinction n'apparaît pas fondamentale, elle doit être observée avec rigueur dans le cadre d'exercices critiques sur la validité ou l'utilité d'un modèle par exemple. On peut retenir que le *modèle* découle de la *théorie* et qu'il peut lui-même produire (ou exploiter) des *méthodes* et des *outils*. Nous allons maintenant nous intéresser plus spécifiquement aux *modèles d'accidents.*

4.2.2. Revue de classifications dédiées aux modèles d'accidents

De tout temps, la sécurité a été portée, gérée, par les individus à différents niveaux des systèmes. Bien que les systèmes sociotechniques évoluent dans le temps sur les plans techniques et technologiques (révolution de l'information, internet, robotisation, etc.), l'individu demeure un « invariant ». Au plus proche des composantes techniques du système (les machines de production ou les commandes du moyen de transport, par exemple) l'opérateur peut raisonnablement être considéré comme l'ultime responsable de sa sécurité, autant que de celle d'autrui. Quantité d'autres individus, constituant des *métiers,* des *réseaux*, des *institutions*, sont également en charge, ou du moins acteurs, de sécurité : législateurs, politiques, dirigeants, experts, responsables, coordinateurs, contrôleurs, chercheurs, concepteurs, etc. La sécurité est donc un état *instable* d'un système sur lequel de nombreux acteurs exercent des contraintes (*controls*).

Un point commun à ces acteurs est qu'ils se réfèrent de façon plus ou moins consciente à un ou plusieurs *modèle(s) d'accidents.* En effet, toute représentation d'un phénomène (comme la sécurité ou l'accident) ou d'un objet (comme la machine, l'organisation), bien qu'elle puisse recouvrir différentes *formes* (verbale, graphique, mathématique, etc.) et servir différents *buts* (expliquer, prédire, communiquer, etc.) constitue un modèle (voir 2.1.2). Hovden *et al.* (2010) ont notamment montré que les *modèles* d'accidents, qu'on s'y réfère explicitement ou non[267], influencent les *pratiques* et donc les *résultats* des enquêtes d'accidents. « *Accident models and theories provide different "glasses" that will influence the way we look for, understand, analyse and provide recommendations* » (Hovden *et al*., 2010).

Depuis l'émergence de la gestion de la sécurité et des FOH comme des sujets de développement et de recherche, scientifiques et ingénieurs ont entrepris de formaliser leurs modèles (publications techniques ou scientifiques). Plusieurs centaines de modèles différents ont été produits afin d'expliquer et ou prévenir les accidents (voir par exemple la conséquente synthèse de Stanton *et al.*, 2013). Ces modèles mettent en avant certains aspects de la sécurité (ou de l'accident) mais plus leur portée pratique augmente, plus ils perdent en généralité. Le statut de *médiateur* entre théorie (concepts) et méthodes (outils, moyens d'action) confère à ces *modèles d'accidents* un rôle fondamental dans la prévention des accidents, leur étude et/ou discussion critique doivent donc être empreintes de pragmatisme. Les principaux objectifs des auteurs de modèles d'accidents sont de :

[267] La culture de son institution constitue, pour le préventeur, un vecteur de diffusion du contenu conceptuel d'un modèle d'accident de façons moins consciente que la référence explicite à un manuel ou un article scientifique.

- créer une compréhension commune du phénomène accidentel en partageant des représentations simplifiées des accidents survenus,
- aider à structurer et communiquer la gestion de la sécurité,
- aider les enquêteurs dans la collecte des données et l'analyse des accidents,
- aider à analyser les interrelations entre les différents facteurs ou préconditions,
- agréger les visions (partielles) de l'accident des différents modèles.

Afin d'orienter les pratiques en accord avec ces nombreux objectifs, plusieurs auteurs ont proposé des études transverses ou des classifications des modèles d'accidents.

Classifications de modèles d'accidents

Ces travaux distinguent généralement deux types d'accidents et donc de modèles associés : les *accidents du travail* (*occupational accidents*) et les accidents majeurs (*complex system accident*)[268] (*e.g.* Hovden *et al*., 2010). Les premiers surviennent dans le contexte d'une activité professionnelle et leurs conséquences sont généralement limitées à des atteintes aux personnels impliqués (qui sont acteurs et souvent victimes de l'accident). Les seconds impliquent plus largement le système *sociotechnique* et leurs conséquences dépassent généralement le site industriel (atteinte aux tiers, aux biens ou à l'environnement). Certains portent ensuite sur les disciplines scientifiques (ex : sciences politiques, psychologie, sociologie, etc.) mobilisées, le domaine d'activité impacté (industrie, médecine, domestique, routier, armée, etc.), le type d'évènements considéré (accident du travail, industriels, catastrophes, etc.) ou encore le(s) pays concerné(s). Enfin, il existe des tentatives plus *globales* (e.g. Le Coze, 2013a) ou *généralisatrices* (e.g. Hollnagel, 2004).

L'exercice de classification sert différents objectifs. Il peut être réalisé lors de la publication d'un nouveau modèle et servira généralement à justifier la démarche en démontrant les limites des modèles existants. Il peut être réalisé dans des publications proposant une évolution d'un modèle, notamment si l'évolution proposée résulte du rapprochement ou de la fusion de deux modèles existants. L'exercice de classification permet enfin une étude « comparative » de différents modèles ; ils sont alors généralement recommandés pour certains secteurs d'activités ou types d'évènements (presqu'évènement, accident, catastrophe) et déconseillés pour d'autres. Nous en présentons une sélection ci-dessous.

Lehto & Salvendy (1991) proposent le travail comparatif critique de modèles d'accidents le plus exhaustif que notre revue de littérature ait identifié[269]. A un premier niveau, les auteurs différencient quatre groupes : « *(1) General models of the accident process; (2) Models of human error and unsafe behavior; (3) Models of the mechanics of human injury; and (4) application techniques »* (*op. cit.*). Ils affinent ce classement très général en proposant plusieurs catégories (Figure 59) dans lesquelles ils regroupent un important panel de modèles[270] (N = 59).

[268] On retrouve la distinction sémantique (faite à EDF-DPIH) entre *sécurité* (impacts au personnel de l'entreprise ou ses prestataires) et *sûreté* (impacts aux tiers ou à l'environnement).

[269] Il est aussi (paradoxalement) l'un des plus anciens et ne prend pas en compte la très grande quantité de modèles qui ont été publiés depuis la fin des années 1980 (incluant, pour ne citer qu'eux, les travaux de James Reason et les modèles dits *systémiques* ou SAA).

[270] Sans distinction particulière entre modèle, méthode et outil.

Classification of accident causation models and application techniques*

I. General Models of the Accident Process

A. Sequential Models
(Linear Chain of Events)
- Domino Theory (Heinrich, 1939)
- Updated Domino Theory (Heinrich et al., 1980)
- Stair Step Model (Heinrich et al., 1980)
- Stage Model (Goeller, 1968)

(Tree Models)
- Event Trees (US NRC, 1975)
- Fault Trees (Hammer, 1980)
- Cause Trees (Driessen, 1970)
- MORT (Johnson, 1975, 1980)

(Network Models)
- Multi-Linear Sequencing (Benner, 1975)
- PERT-CPM (Grimaldi and Simonds, 1975)

B. Epidemiological Models
- Host-Agent-Environment Model (Gordon, 1949)
- Cohort Analysis (Waller, 1977)
- Home Accident Model (Johnson, 1973)
- Industrial Accident Model (Johnson, 1973)
- Haddon Matrix (Haddon, 1975)

C. Energy Transfer Model
- Energy Exchange (Gibson, 1961)
- Energy Countermeasures (Haddon, 1975)

D. Systems Model (Surry, 1968)
- P-Theory Model (Benner, 1975)
- Change Analysis (Johnson, 1980)
- Manual Control Theory (Rouse, 1980)
- Car-Driver Model (Sheridan, 1976)

II. Models of Human Error and Unsafe Behavior

A. Behavioral Accident Models
- Accident Proneness (Greenwood and Woods, 1919)
- Personality Traits (Surry, 1968)
- Life Change Unit Theory (Alkov, 1972)
- Adjustment Stress Theory (Kerr, 1957)

B. Human Decision Making Models
- Purposive Risk-Taking Model (Taylor, 1976)
- Risk Perception Model (Slovic et al., 1984; Perusse, 1980)
- Risk Acceptability Model (Litea et al., 1983)
- Heuristics and Biases (Tversky and Kahneman, 1974, 1981)
- Expected Utility Model (Raiffa, 1968)
- Signal Detection (Tanner and Swets, 1954)
- Bayesian Inference (Winterfeldt and Edwards, 1986)
- Brunswick Lens (Hammond et al., 1980)

C. Human Information Processing Models
- Single Channel Hypothesis (Welford, 1968)
- Human Error Model (Wigglesworth, 1972; Lawrence, 1974)
- Decision Stage Model (Surry, 1968; Hale and Hale, 1970; Andersson et al., 1978)
- Communication Model (Lehto and Miller, 1986)
- Warning Tree (Lehto and Miller, 1986)
- Arousal/Effort/Attention (Kahneman, 1973)
- Resource Allocation (Navon and Gopher, 1979; Wickens, 1984)
- Task Scheduling (Parks, 1979; Schmidt, 1978)
- Levels of Performance (Rasmussen, 1983, 1986)
- GOMS (Card et al., 1983; Kieras, 1988)

D. Human Error Taxonomies
- Data Store (Altman, 1964)
- Error Mechanisms (Norman, 1983; Rasmussen, 1986)
- Integrative Taxonomy (Rasmussen, 1982)

III. Models of the Mechanics of Human Injury
- Tool Use Trauma (Armstrong et al., 1986; Tichauer, 1973)
- CTD-123 (Burnette, 1989)
- NIOSH Lifting Guide (NIOSH, 1980)
- Biomechanical Model (Chaffin, 1988)
- MMH Model (Mital, 1983)
- Slip Resistance (Lehto and Miller, 1987)
- Ladder Climbing (Bloswick et al., 1984)

IV. Application Techniques
- Fault Tree Analysis (Hammer, 1980)
- Failure Modes and Effects Analysis (Hammer, 1980)
- MORT (Johnson, 1975; 1980)
- Change Analysis (Johnson, 1980)
- HAZOP (Kletz, 1983; Wells, 1980)
- HAZOPEX (Soukas et al., 1988; Heino et al., 1989)
- STARS (Poucet and Peterson, 1988)
- Critical Incident Technique (Flanagan, 1949)
- WSA (Soukas and Rouhiainen, 1984)
- AEA (Soukas and Pyy, 1988)
- Decision Sequence Analysis (Dieterly, 1979)
- Detectability/Revocability/Consequence Matrix (Altman, 1967)
- THERP (Swain and Guttman, 1983)
- SLIM-MAUD (Embrey et al., 1984)
- SHERPA (Embrey, 1986)
- GOMS (Card et al., 1983; Kieras, 1988)

Figure 59 : Liste des modèles et des méthodes, classée puis discutée par Letho et Salvendy (1991)

Ces modèles sont ensuite étudiés suivant six critères qui sont : le domaine d'application (industrie, transport ou générique), la finalité (descriptive, prescriptive, générique ou spécifique), le centre d'intérêt (l'humain, les processus ou produits, la tâche ou le processus accidentel), la structure du modèle (mathématique, verbale, logique ou séquentielle), les données d'entrée (définitions, spécifications, ou rien) et les données de sortie (risques, erreurs, probabilités, causes ou solutions). Notons que ce cadre d'étude peut être considéré comme une précision appliquée aux modèles d'accidents du cadre *général* de Walliser (1977, voir 4.2.1) :

- axe *syntaxique* : structure du modèle, centre d'intérêt,
- axe *sémantique* : données d'entrée, finalité,
- axe *pragmatique* : données de sortie, domaine d'application.

De nombreuses autres classifications ont été proposées entre 1990 et 2010. Dans sa thèse de doctorat, Andersson (1991) fait une étude de plusieurs classifications de modèles d'accidents et fait émerger des oppositions par paires entre les approches *traumatologiques* et *épidémiologiques* d'une part et approches *technologiques* ou *interdisciplinaires* de l'accident, d'autre part.

Dans un ouvrage consacré à la prévention des accidents, Kjellén (2000) distingue et décrit cinq catégories de modèles d'accidents : causaux-séquentiels, processus, énergie, arbres logiques et *SHE-Management*[271]. Attwood *et al.* (2006) proposent une revue de littérature des modèles d'accidents du travail (*occupational accidents*) et distinguent : les modèles *pionniers* (« *early models of accident* »), les modèles basés sur une approche *holiste* et les modèles *quantitatifs*. Ces différentes classifications accusent un flou épistémologique, celle d'Attwood *et al.* par exemple, est construite sur l'opposition d'attributs historiques (*early models*), épistémiques (*holistic*) et méthodologiques (*quantitative*).

Une classification similaire est proposée par le psychologue danois, spécialisé dans les safety sciences, Erik Hollnagel (2001), dans un article intitulé « *anticipating failures: what sould predictions be about? »* qui adresse « *a concrete criticism against the established practice,* […] *models and methods that have been used »* (*op. cit.*). L'auteur définit trois *catégories* de modèles, la première (« *simple accident model »*) regroupe les modèles qui représentent l'accident comme la cause de défaillances techniques ou d'actions humaines *incorrectes* (y sont associées les méthodes d'arbres des causes). La seconde (« *intermediate accident model »*) est une extension de la première amenant les modèles à intégrer des *conditions latentes* et la complexité des conditions de production des erreurs (Hollnagel ne fournit pas d'exemple de méthode associée). La troisième recouvre une dimension temporelle (« *contemporary accident model »*), elle regroupe les approches ayant évolué de l'acteur individuel (FH) aux contextes organisationnels (FO) ; « *An excellent account of this work has been provided by Reason (1997), which emphasises the concept of organisational safety and how defences may fail »* (*op. cit.*). On trouve dans la caractérisation « *contemporary* » la prémisse d'une dialectique de l'obsolescence des modèles consistant à réduire leur validité à leurs caractères contemporains.

En 2004, dans le livre *Barriers and accident prevention,* Hollnagel (2004, chap. 2) propose une actualisation de sa classification qui conserve trois *types* de modèles dont les définitions sont légèrement précisées et les *appellations* modifiées. Les trois catégories de modèles deviennent : *séquentielles, épidémiologiques* et *systémiques*. Les modèles *séquentiels* (ou *linéaires-simples*[272]) sont définis comme attribuant l'accident à l'interaction *séquentielle* (ordonnée dans le temps) d'une série d'évènements ou de circonstances. Pour l'auteur, ces modèles dirigent les efforts de prévention vers l'élimination des différentes causes de cette séquence linéaire[273]. Les modèles *épidémiologiques*[274] (plus tard qualifiés de *complexes-linéaires*[275]) sont définis comme attribuant l'accident à la combinaison (toujours séquentielle, linéaire) de *conditions latentes* dans le système et d'*actes risqués* des opérateurs. Ces modèles étendent le spectre d'étude de l'individu à l'organisation et sa gestion (*management*). Selon Hollnagel, ces modèles orientent la prévention vers le renforcement des barrières et des défenses du système. Enfin, les modèles *systémiques* (aussi qualifiés *négativement* de « *non-linéaires* ») représentent dans les termes de l'auteur *l'évolution la plus*

[271] SHE pour *Safety, Health and Environmental* ou, en français, Santé, Hygiène et Environnement.
[272] Terme modifié lors d'une évolution ultérieure (Hollnagel & Spetziali, 2008).
[273] Surry identifiait cette famille de modèle dès 1968 : « *commonest and earliest model of accident research* [...] *that describing a temporal sequence* [where the] *accident is the overall description of a series of events, decisions and situations culminating in injury or damage* [...] *a chain of multiple events* ».
[274] Qualification inspirée de Gordon (1949).
[275] Ou encore de *modèle organisationnel* (au singulier) par Karim Hardy (2010).

récente dans les modèles d'accidents, et se caractérisent par une vue des accidents où causes et effets interagissent (Hardy, 2010).

> « *The new generation of thinking about accident modelling has moved towards recognizing that accident models need to be non-linear; that accidents can be thought of as resulting from combinations of mutually interacting variables which occur in real world environments and it is only through understanding the combination and interaction of these multiple factors that accidents can truly be understood and prevented.* » (Hollnagel, 2009).

La classification d'Hollnagel est fréquemment utilisée dans les revues de littérature[276], en référence *directe* (e.g. Quershi, 2007 ; Hardy, 2010 ; Lindberg *et al.,* 2010 ; Toft *et al.*, 2012 ; Underwood, 2013) ou de façon *partielle* comme par Hovden *et al.* (2010). Dans ce dernier article, les auteurs questionnent le besoin d'un *renouveau des théories*, *modèles et approches* pour la prévention des accidents du travail (*occupational accidents*). Leur démarche repose sur une classification de quatre *processus de modélisation* : (1) *séquentiel-causal*, (2) *descriptif* par *séquences d'évènements*, (3) *systémique* (ou alliant *séquences causales* et *approche épidémiologique*) et (4) *logique*. Les auteurs précisent : « *there are many ways of classifying accident models, and the grouping above is a mixture of Kjellén (2000) and Hollnagel (2004) »*[277] (*op. cit.*).

Limites et perspectives pour la classification des modèles d'accidents

Les nombreuses classifications que nous avons évoquées ont été critiquées pour leurs manques de considérations épistémologiques (e.g. Benner, 2003 ; Le Coze, 2013b). D'autres auteurs s'y réfèrent dans les intitulés mais modifient la répartition des modèles entre les catégories, ainsi Reason (2008) ou Toft *et al*. (2012) situent le SCM dans la classe des modèles *systémiques* et non dans la classe *linéaires-complexes*[278] comme Hollangel (2009) ou Hardy (2010).

Il nous semble intéressant de discuter des effets produits par l'approche que nous avons qualifiée d'*historiciste*. Cette posture est explicitement résumée dans l'extrait suivant : « *Models have <u>over time</u> gone from simple linear models, such as the domino model (Heinrich, 1931), <u>via</u> complex linear or epidemiological models, such as the Swiss cheese model (Reason, 1990*[b]*), <u>to</u> systemic models (e.g., Leveson, 2004).* »[279] (Hollnagel *et al.*, 2008). La classification d'Hollnagel a évolué dans le temps, on note ainsi, entre 2001 et 2004, la disparition de la référence *temporelle* dans l'appellation des classes de modèles (la classe « *contemporary* » étant remplacée par « *systemic* »). Cela confère à cette troisième catégorie une existence *épistémique* et renforce la cohérence de la classification. Toutefois, l'examen des publications accompagnant ou utilisant cette classification révèle que la *rhétorique de l'obsolescence* des modèles d'accidents, sur laquelle repose originellement la classification, demeure. La classification d'Hollnagel conserve effectivement deux dimensions ; la première pourrait être qualifiée de *méthodologique* (Figure 60) et la seconde d'*historique* (Figure 61).

[276] Elle pourrait être qualifiée de *mème symbolique* (Dion, 2003) ou dogme.
[277] On pourrait, au demeurant, critiquer le biais que représente le choix d'une classification empreinte d'historicisme (celle d'Hollnagel) pour répondre à la question du besoin de renouveau des théories et modèles.
[278] Nous nous rattachons à cet avis.
[279] Nous soulignons.

	Basic principle	Purpose of analysis	Typical reaction
Simple, linear model	Causality (Single or multiple causes)	Find specific causes and cause-effect links.	Eliminate causes and links. Improve responses
Complex, linear model	Hidden dependencies	Combinations of unsafe acts and latent conditions	Strengthen barriers and defences. Improve observation (of indicators)
Non-linear (systemic) model	Dynamic dependency, functional resonance	Close couplings and complex interactions	Monitor & control performance variability. Improve anticipation

Figure 60 : Classification des modèles d'accidents sur des attributs méthodologiques (Hollnagel, 2011).

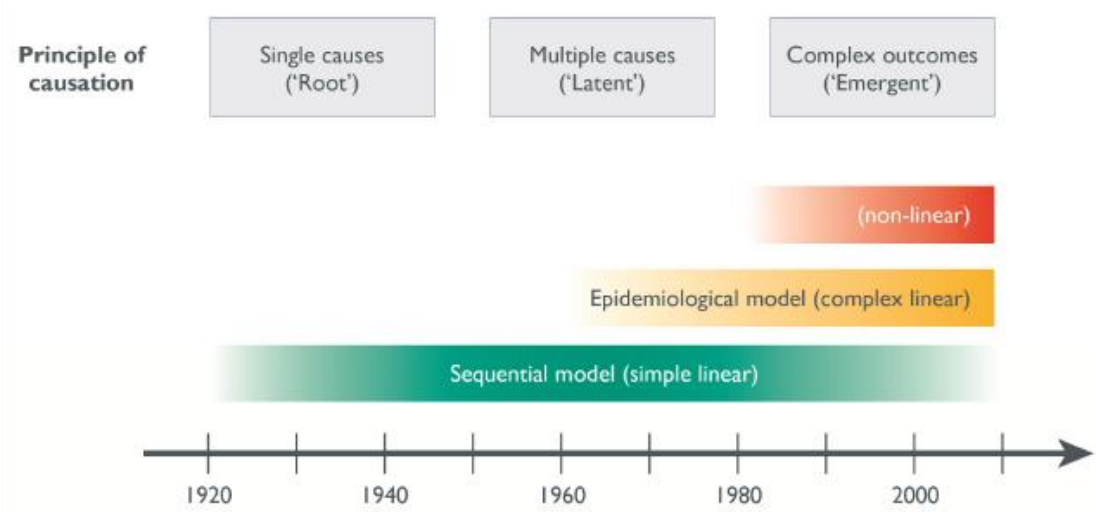

Figure 61 : Classification des modèles d'accidents et représentation temporelle (Hollnagel, 2010).

Sur le plan méthodologique, il serait intéressant de pouvoir déterminer si les trois « *types* de modèles » représentent une *taxinomie* (classification construite sur des attributs constatés empiriquement, *a posteriori*) ou une *typologie* (développée conceptuellement, *a priori*). De même, si les considérations historiques reposent sur une étude *diachronique* ou *synchronique* des modèles[280].

Enfin, on peut questionner le *déterminisme* d'une classification qui définit ses *typologies* de modèles sur l'enchaînement *causal* d'un *modèle* (*basic principles*), d'une *utilité* (*purpose of analysis*) et de *conséquences pratiques* (*typical reaction*). Il ne semble pas justifié *a priori* d'exclure une *typologie* matricielle ; par exemple, la classification proposée ne peut pas, en l'état, rendre compte de l'existence (1) d'un modèle *séquentiel* qui permet de (2) déterminer des causes de *natures*

[280] A notre connaissance, ces éléments ne sont pas publiés par l'auteur.

différentes, (3) et qui est utilisé pour *monitorer* et *améliorer proactivement* la sécurité d'un système[281] (les numéros entre parenthèses correspondent à la nomenclature Figure 62).

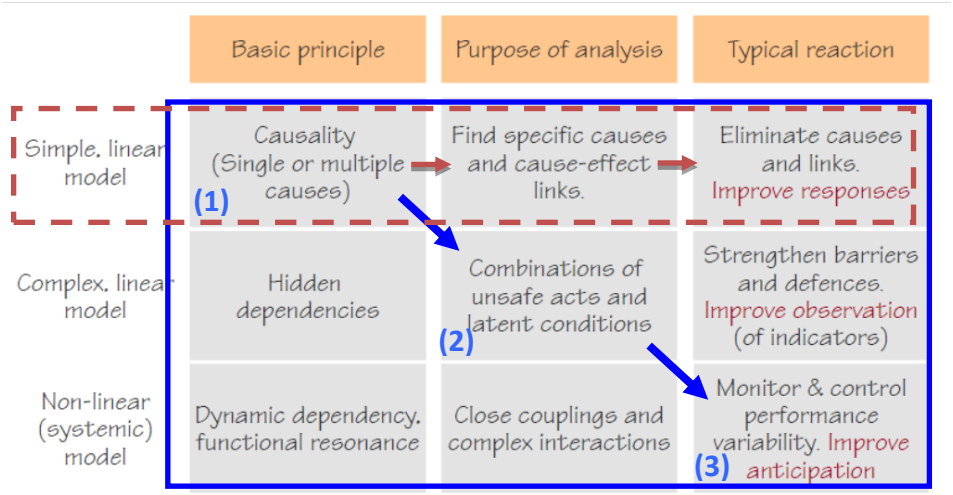

Figure 62 : La classification des modèles d'accidents d'Hollnagel constitue une approche causale de l'exercice (représentée en rouge, pointillés) or, rien ne semble justifier d'exclure, par exemple, une approche matricielle (proposée en bleue, traits pleins). (Modifié d'après Hollnagel, 2011).

On pourrait donc opposer à cette classification, avec Armatte (2005), qu' « *il n'est guère possible de considérer, comme dans une épistémologie classique, qu'il y a d'abord un substrat de connaissances scientifiques, puis sa traduction dans un modèle, et enfin des usages politiques et sociaux de ce modèle qui contribueraient à éclairer les décisions publiques ou privées* ».

D'autres tentatives de classifications paraissent proposer un cadre plus *neutre* pour l'étude des modèles. Rompant avec l'amalgame courant entre *modèles* et *méthodes*, Katsakiori *et al.* (2009) proposent d'évaluer les liens *types* de modèles d'accidents (N = 3) et méthodes d'investigation (N = 13). Les *types* de modèles proposées sont : *séquentiels* (décrivent l'accident comme une séquence d'évènements dans un ordre spécifique), *cognitifs*[282] (décrivent l'accident en termes de comportements et d'actions) et *systémiques* (incluent l'organisation et le management et décrivent la performance globale du système). Si le *résultat* de l'étude est une cartographie théorique contribuant à structurer le vaste champ de connaissances et de pratiques, son *but* est d'aider les enquêteurs (*investigators*) dans leurs choix de méthodes. « *Models provide knowledge regarding the fundamental mechanisms which underlie the accident scenario and methods provide the necessary information to analyse the accident in a specific setting. However, the selection made on the former, restricts our selection on the latter* […]. *Since different models approach accidents in sometimes entirely different ways, methods linked to these models can provide us with only fragmentary information regarding the accident.* » (*op. cit.*). L'une des conclusions apportées par les auteurs est que les pratiques devraient associer plusieurs modèles et méthodes afin de constituer un socle plus fiable à l'enquête et à l'analyse post-accidentelle.

[281] L'exemple pourrait légitimement être lu comme la description succincte de la méthode Tripod DELTA (Reason *et al.*, 1989 ; voir 2.3.1).
[282] « *Human information processing accident models* ».

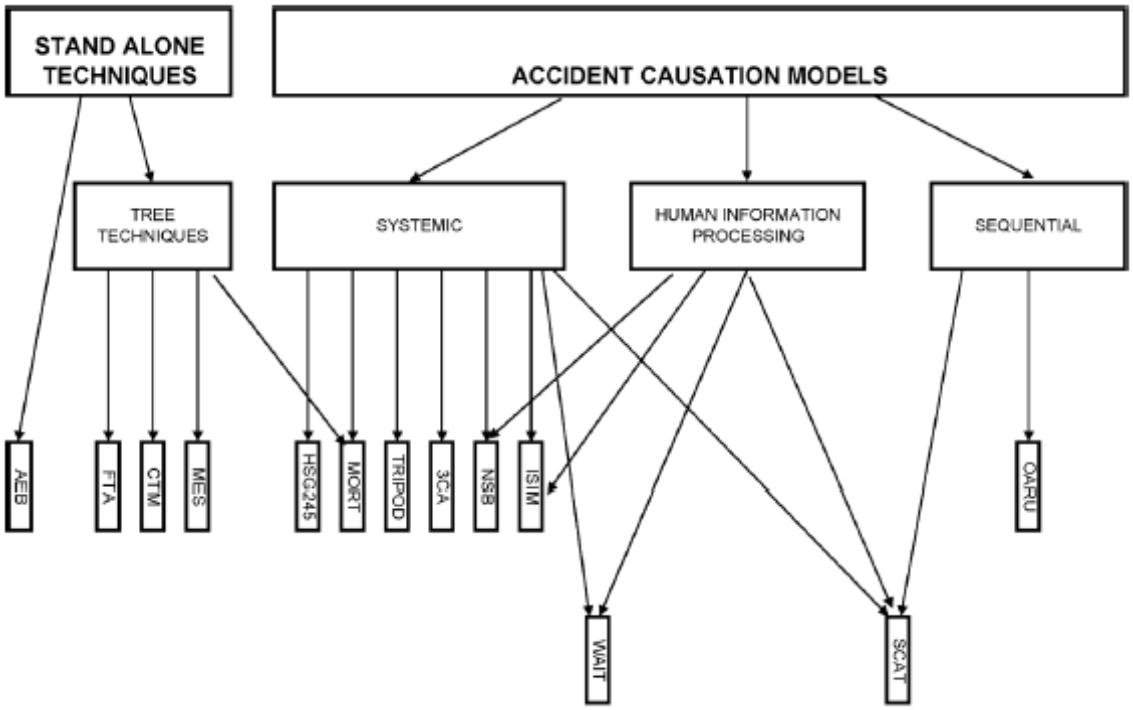

Figure 63 : Correspondance entre les modèles d'accidents (à gauche) et les différentes méthodes d'investigation (à droite). S'il est presque trivial qu'un modèle soit « à l'origine » de plusieurs méthodes, on remarque qu'une méthode (ex : SCAT) mobilise plusieurs modèles. (Adapté de Katsakiori et al., 2009).

Le Coze, (2013b) propose un cadre général (*organising framework*) pour organiser les connaissances produites autour des accidents. Il montre à travers une revue de littérature que les travaux publiés sont fragmentés et proviennent de différents auteurs aux disciplines de rattachement variées. Ces travaux, complémentaires, nous renseignent sur différentes étapes et différentes problématiques liées à la prévention des accidents. « *It demonstrates that reporting is part of socio-legal-political system that constrains this activity, that selecting signals relies on complex cognitive processes by actors within high-risk organisations, that investigations in-depth requires the mastery of social science models and that prevention depends on the possibility of challenging networks of power to provide sustained effects.* » (*op. cit.*). Le Coze suggère alors que la construction d'un champ de recherche intégré repose sur l'identification (1) des acteurs concernés par l'étude (état, associations professionnelles, industriels, chercheurs, consultants, médias), (2) du pays ou de la région géographique (Asie, Europe, Amérique du Nord, Amérique du Sud, etc…), (3) de la phase du processus d'apprentissage (*reporting*, sélection de la méthode, enquête, communication/partage, prévention), (4) du secteur industriel (transport, aérospatiale, industrie de processus, énergie, médical, etc.), (5) de l'intensité de l'évènement (signaux faibles, presque-accident, incidents, accidents, catastrophes) et enfin (6) de la discipline scientifique « principale » de l'article (sciences de l'ingénieur, sciences cognitives, ergonomie, sociologie, sciences de gestion, sciences politiques).

Ces six dimensions sont résumées dans une illustration proposée par Le Coze (Figure 64).

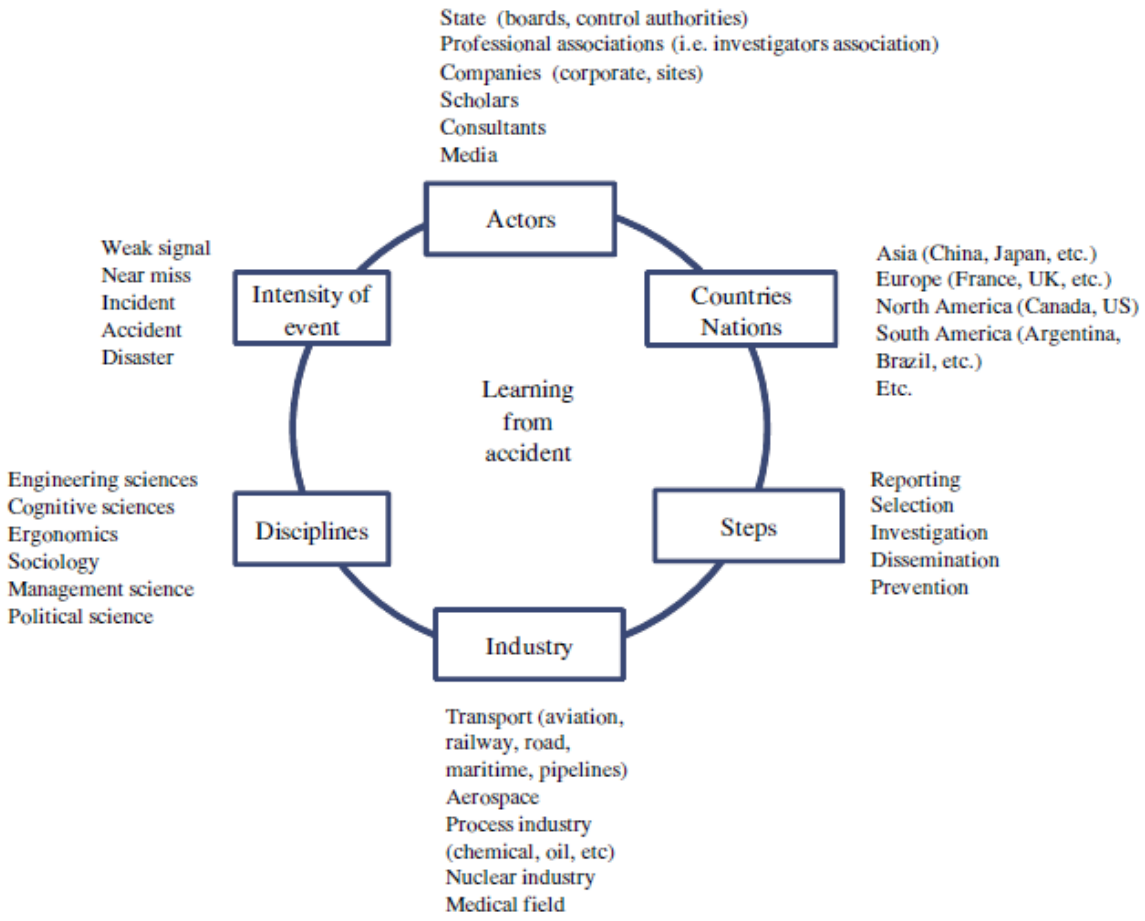

Figure 64 : Cadre d'étude général pour l'étude des publications sur les accidents industriels (Le Coze, 2013b).

Le cadre proposé par Le Coze apparaît *in fine* comme le plus exhaustif pour rendre compte de l'étendue des travaux qui existent sur l'accident. On pourrait également représenter ses six dimensions comme les six faces d'un cube où chaque item[283] constitue un fragment de sa face. Une analogie avec le célèbre casse-tête « *Rubik's Cube*™» (telle que nous la proposons Figure 65) serait dès lors à même d'illustrer trois états successifs d'un vaste corpus de connaissances.

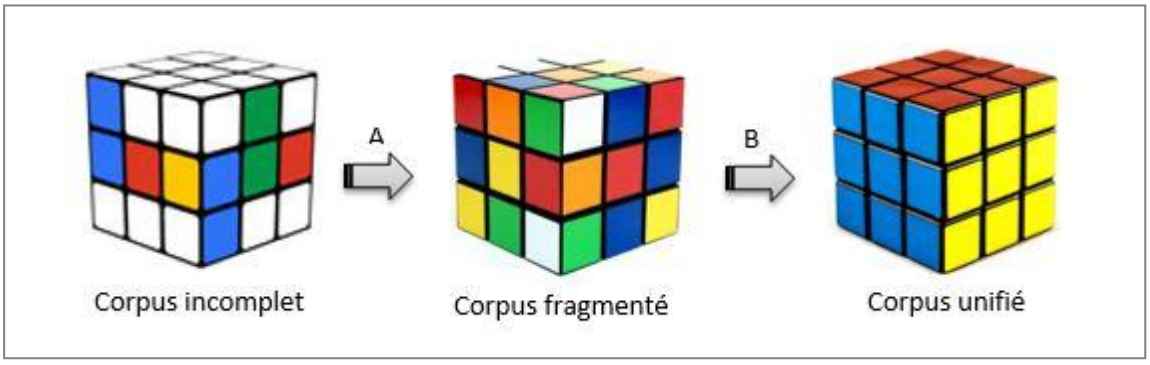

Figure 65 : Trois états des connaissances sur l'accident par analogie avec le Rubik's Cube™. Les travaux de recherche en safety sciences peuvent dès lors contribuer à renseigner sur de nouveaux objets ou processus et ainsi compléter le corpus (A) ou tenter d'articuler suivant un cadre voulu universel des connaissances préexistantes (B).

[283] Selon cette nomenclature, la liste « transport, espace, industrie de processus, industrie nucléaire, médecine » sont les *items* de la *dimension* « industrie » (Figure 64).

Comme le remarquent Lehto & Salvendy (1991) « *accident causation models represent, classify and efficiently organize large amounts of safety-related knowledge. Furthermore, a large number of analysis techniques have been developed which are based upon these models* ». On peut donc, en appliquant l'analogie du *Rubik's Cube*™ aux modèles d'accidents, leur associer deux *fonctions élémentaires* : (A)[284] renseigner sur de nouveaux objets, de nouveaux processus (souvent en illustrant de nouvelles théories, plus rarement en illustrant différemment une ancienne théorie) et (B) effectuer une synthèse intégratrice de connaissances existantes. Ces deux fonctions sont évidemment complémentaires. Un modèle donné, indépendamment de sa *fonction élémentaire* peut se rapporter à tout ou partie des *items* : il pourra être qualifié (selon chaque dimension) de *spécifique* s'il se rapport à un seul item par dimension, de *multiple* (ex : *multi-industrie, multidisciplinaire*) s'il se rapporte à plusieurs items d'une dimension et de *générique* s'il se rapporte théoriquement à l'ensemble des items des dimensions.

Le cadre proposé par Le Coze pourrait constituer un point d'étape conséquent dans le domaine des safety science*s,* comme une clef de lecture suffisamment générale pour rendre compte, le plus objectivement possible, des travaux existants. Hormis le cadre interdisciplinaire et étymologiquement robuste proposé par Le Coze, la revue des nombreuses tentatives de classification des théories et modèles de gestion de la sécurité laisse apparaître de nombreux désaccords sur la façon de classer les modèles. Dans la partie suivante nous discutons de limites des exercices de classification de modèles d'accidents à la lumière de nos travaux sur le SCM (voir chapitre 2).

4.2.3. Vers une alternative à la classification des modèles d'accidents

Nos développements nous ont conduits à mettre en évidence un certain nombre de limites inhérentes aux classifications des modèles d'accidents (absence de différenciation rigoureuse entre théories, modèles, méthodes et outils ; difficulté à traiter des statuts épistémologiques des *modèles d'accidents* ; variété des objectifs visés par les classifications). Hovden *et al.* ajoutent à ces limites la subjectivité disciplinaire des auteurs :

> « *The history of accident modelling is very much about a positioning on model power between different disciplines, with technologists, psychologists, other social scientists and so on claiming to be holistic and cross-disciplinary in their combining of human factors, technology and organizational aspects, while combining these according to their own biased mental models.* » (Hovden, *et al.,* 2010).

Les limites de la classification semblent donc résulter autant de la nature de l'objet *modèle* que de celle de l'exercice même de comparaison. Dans ce sens, il se pourrait que la clef de lecture de Le Coze soit parvenue à une forme d'aboutissement. Chercher à approfondir et rigidifier un tel cadre général d'organisation présenterait le risque de réduire certains travaux à des propriétés, quelques peu arbitraires, en vue de discriminer coûte que coûte des modèles. Il faut, dès lors, imaginer puis défendre une approche nouvelle de l'exercice de relecture des modèles existants. A cet effet, une remarque d'Armatte est édifiante :

[284] Les lettres A et B se rapportent aux flèches de la Figure 65.

> « *Une épistémologie équilibrée de la modélisation qui historiciserait et sociologiserait la notion de modèle sans abandonner le point de vue cognitif est encore à construire. Mais on en connaît déjà quelques caractéristiques. L'attention portée trop longtemps sur sa nature et ses propriétés syntaxiques (rigueur, cohérence), qui s'est déjà déplacée historiquement sur ses propriétés sémantiques (pertinence, complétude), doit se déplacer encore vers les propriétés pragmatiques associées aux objectifs de la modélisation (efficacité heuristique, ou prévisionnelle, ou décisionnelle). Ces trois registres du modèle comme représentation signifiante mobilisée dans des usages de régulation des activités humaines, identifiés depuis les travaux de la linguistique structurale, repris par B. Walliser dans sa réflexion sur « systèmes et modèles », doivent être traités à égalité, donc rééquilibrés. Si l'on veut simplement comprendre les enjeux scientifiques passés et présents de la modélisation dans le jeu entre sciences et société, il faut informer les logiques cognitives par les logiques sociales de la modélisation. Cette nouvelle épistémologie devrait donc s'attacher davantage à la modélisation qu'à la notion de modèle, aux jeux d'acteurs autour de cette activité, aux stratégies, à la professionnalisation, aux médiations qu'elle permet entre les groupes, à la fonction qu'elle joue dans la décision et la coordination politique.* » (Armatte, 2005 ; nous soulignons).

Nous avons considéré cet appel à un rééquilibrage des dimensions syntaxiques, sémantiques et pragmatiques des modèles comme le point de départ de notre étude compréhensive du modèle du fromage Suisse (voir 2.2). Nous avons ainsi cherché à réponde à trois questions sur la base d'une recherche qualitative indiciaire : *comment le modèle a-t-il été conçu* (modélisation), *de quoi est-il fait* (syntaxique, symbolique) et *pourquoi a-t-il été conçu originellement* (volonté du concepteur, indépendamment des *usages effectifs* constatés).

Notre étude nous a conduits à identifier différentes critiques publiées à l'encontre du SCM (Dekker, 2006 ; Hollnagel, 2012). Le modèle est décrit comme séquentiel, simplifiant par une causalité linéaire le phénomène « accident » qui exclut les interactions dynamiques et circulaires entre les composants du système (Leveson, 2012). Sur le plan pratique, le SCM est également critiqué pour son manque de précision sur ses différents composants symboliques (les tranches de fromage, les trous, la trajectoire accidentelle), ce qui affecte négativement ses usages (Wiegmann & Shappell, 2003). Enfin, certains auteurs considèrent que l'application trop exclusive du SCM peut conduire à attribuer, à tort, la responsabilité entière de l'accident aux décideurs, négligeant ainsi le rôle des acteurs opérationnels (Shorrock *et al.,* 2004). Nous avons opposé à ces critiques que le SCM relève d'une approche systémique de l'accident. En effet, le SCM décrit l'accident à un niveau systémique, holiste, comme « *the unlikely and often unforeseeable conjunction of several contributing factors arising from different levels of the system* » (Reason *et al.*, 2006). Les questions soulevées sur l'utilité pratique du SCM ignorent, en polarisant le débat sur ce modèle, un grand nombre de méthodes qui en sont dérivées et qui pallient son manque de précision sur ses composants symboliques mais aussi, en adaptent les éléments sémantiques pour éviter que l'analyse ne focalise sur une des « extrémités » de la structure hiérarchique (normative) communément admise *blunt-end, sharp-end*.

Notre étude qualitative et approfondie du modèle de Reason nous amène donc à réfuter le classement du SCM proposé par certains auteurs, mais également à considérer, de façon plus générale, les limites de l'exercice de classification même. En cherchant à comparer, parfois « à tout prix » les modèles, cet exercice comporte un risque de réduction de nombreux aspects du champ de la connaissance, sur la base de critères variables, parfois normatifs (*a priori*), parfois empiriques (*a posteriori*) mais rarement partagés. Peut-on, alors, élargir notre vision et tenter de décrire des oppositions non résultant des différentes classifications, mais les initiant ?

4.3. Débat académique sur la valeur des modèles : bilan et perspectives

Cette section revient, de façon plus large, sur l'opposition entre SAA et SCM et propose d'apporter, modestement, des perspectives nouvelles sur le débat de l'obsolescence et la valeur des modèles d'accidents. Pour cela, nous souhaitons nous écarter des classifications des modèles d'accidents que nous avons présentées (sans pour autant les abandonner). Dans un premier temps (4.3.1), nous présentons les deux modèles d'analyse systémique d'accidents les plus cités : STAMP et FRAM. Nous revenons ensuite sur les principales oppositions entre les tenants des SAA et du SCM, non plus uniquement à travers le statut qu'elles attribuent au SCM dans les classifications, mais en proposant la description de deux écoles de pensée de l'accident sur les plans ontologiques et épistémologiques (4.3.2). Enfin, nous discutons de la possible émergence d'une troisième voie qui viserait à articuler de façon originale les modèles, les méthodes et les outils produits dans le champ des safety sciences. Nous proposons pour cette « école de la convergence » une modalité de travail, inspirée de l'étude des facteurs clefs de succès du SCM : la double-collaboration (4.3.3).

4.3.1. Les (nouveaux) modèles systémiques d'accident

L'approche systémique des accidents permet de comprendre ce phénomène comme le résultat de relations indésirables et inattendues entre différents composants d'un système. Cette approche considère donc l'accident comme un phénomène émergent et commande une approche holiste, à même d'étudier le système dans son ensemble, sans en considérer les parties indépendantes et isolées. Cette approche s'est progressivement imposée comme dominante dans la communauté de recherche en gestion des risques (Underwood and Waterson, 2013).

L'une des évolutions principales en matière de FOH qui a été portée par l'approche systémique et par extension, les modèles systémiques d'accidents, consiste à ne plus considérer que les activités ou les comportements peuvent être sûrs ou dangereux. Au contraire, les opérateurs, leurs activités, les objets techniques et l'environnement forment un système dynamique où la causalité classique est mise en cause. Ainsi, l'interaction entre deux éléments (ou conditions) sûr(e)s non seulement ne produit pas nécessairement le « doublement » du niveau de sécurité mais peut parfois diminuer celui-là. Les sous-systèmes étant sujets à des interactions complexes, la modification de l'un d'entre eux, comme la mise en place d'un dispositif de sécurité, peut affecter l'ensemble du système de telle sorte qu'il est délicat de connaître à l'avance les effets du changement sur la sécurité globale.

La théorie des systèmes, développée au cours du XX^{ème} siècle avec l'avènement de la cybernétique puis de l'informatique[285], fournit des concepts à même de modéliser la complexité et le dynamisme des interactions en jeu dans les organisations productives. Ces concepts ont assez rapidement pénétré les travaux de recherche sur les accidents avec les travaux de Perrow (1984), Reason (1990b, 1997), Rasmussen (1997), Hollnagel (2004) ou Leveson (2004). Considérer la sécurité

[285] Voir le deuxième chapitre de la thèse de Karim Hardy (Hardy, 2010) et les travaux de Jay Forrester sur la dynamique des systèmes (Forrester, 1961, 1969, 1972, 1973 ; cités par Hardy, 2010).

(réciproquement les accidents) comme une propriété émergente qui n'est pas propre aux éléments d'un système conduit à s'intéresser aux interactions entre ces éléments (rétroactions, hiérarchie) et à leurs effets (contrôles, résonance).

Différents modèles ont été proposés afin de guider les praticiens de la sécurité dans leurs démarches, en accord avec les théories systémiques des accidents. Nous en présentons deux, parmi les plus cités et employés : STAMP et FRAM.

Le modèle STAMP, théorie du contrôle

STAMP (Systems-Theoretic Accident Modeling and Processes)[286] est un modèle d'accident développé par la professeur Nancy Leveson. Le modèle, conçu au début des années 2000, est publié pour la première fois dans un article intitulé « *A new accident model for engineering safer systems* » (Leveson, 2004).

Les fondements théoriques du modèle

Le modèle STAMP mobilise deux théories : la théorie des systèmes et la théorie du contrôle. La théorie des systèmes permet l'étude d'ensemble d'éléments en interactions maintenant un état d'équilibre dynamique. Les systèmes ainsi définis sont continuellement en adaptation pour atteindre des objectifs donnés tout en s'adaptant aux changements de leur environnement. La théorie du contrôle s'intéresse plus spécifiquement aux concepts des rétroactions via lesquelles les systèmes maintiennent dynamiquement leur équilibre. Elle permet de déterminer les variables d'état d'un système sur lesquelles il convient d'exercer un contrôle pour maintenir le système dans un état déterminé (un état sûr, dans le cas d'une application de la théorie du contrôle à la gestion de la sécurité).

Le modèle STAMP traite la sécurité comme une question de contrôle. Plutôt que de considérer l'accident comme résultant d'une succession causale d'évènements, il s'intéresse à un ensemble de contrôles (politique, procédures, normes, réglementations, valeurs partagées, etc.) articulés dans une « structure de contrôle » (Figure 66) qui a pour but de maintenir le système dans un état sûr. STAMP modélise tout système sociotechnique comme une structure hiérarchisée en niveaux organisationnels où, à chaque interface, se trouve un processus de contrôle. En accord avec la théorie des systèmes, Leveson (2004, 2006) postule que chaque niveau du système applique des contraintes sur l'activité du niveau inférieur. Les niveaux communiquent entre eux ce qui forme des boucles de rétroactions qui permettent, normalement, aux différents niveaux de vérifier l'application et les effets de leurs contrôles.

L'accident est un phénomène qui émerge d'un ensemble de défauts[287] qui perturbent les interactions entre les sous-systèmes. Ces défauts peuvent être classés grâce à une analyse des *modèles de processus*, ce qui permet à STAMP et à sa méthode associée STPA (STAMP based Analysis) d'être utilisée à des fins de prévention d'accidents autant que d'enquête post-accidentelle.

[286] Modélisation et processus des accidents systémiques.
[287] Défaillances de composants, perturbations externes, interactions pathogènes entre les sous-systèmes.

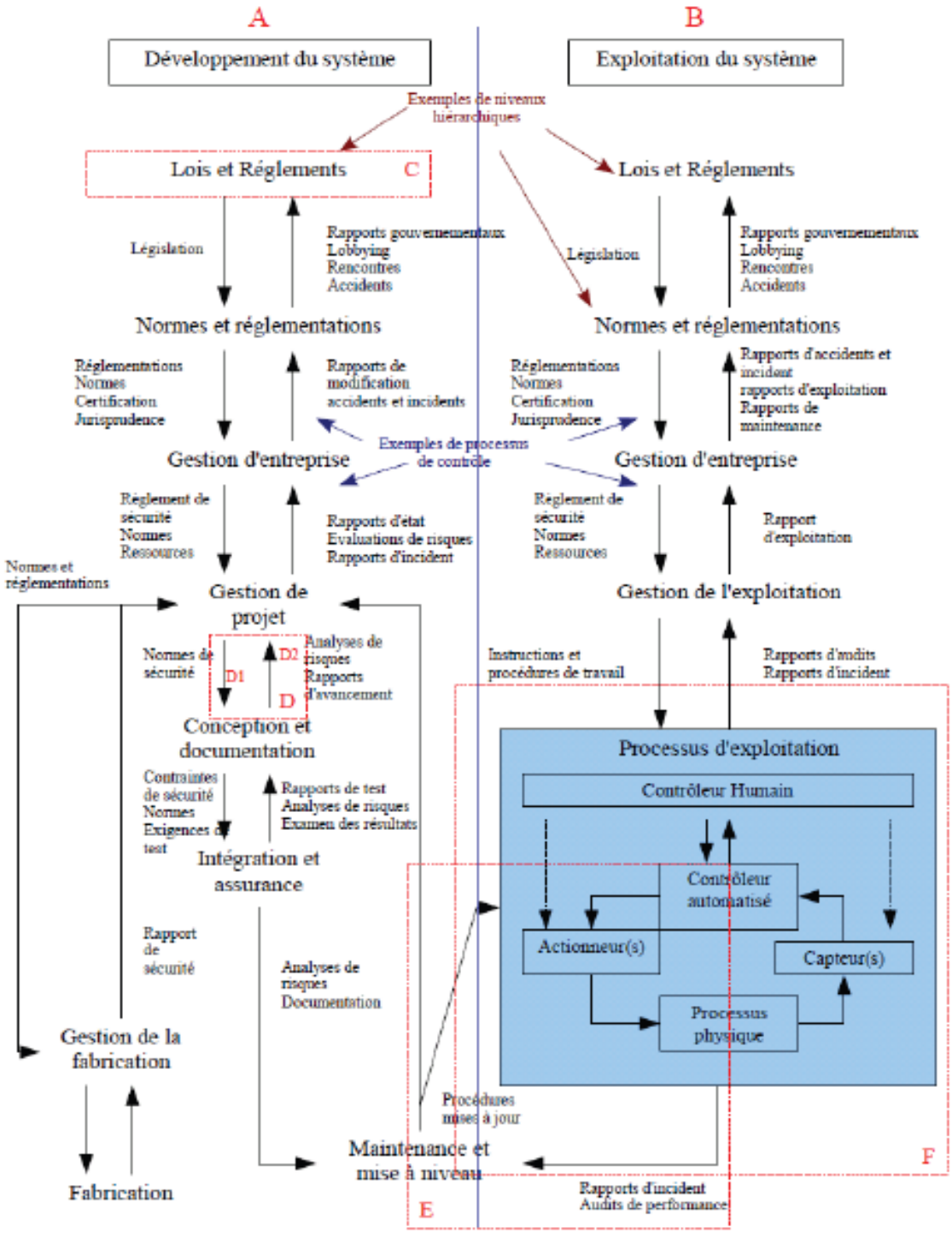

Figure 66 : Structure de contrôle type pour un système sociotechnique (adapté de Leveson, 2005 par Hardy, 2010).

La méthode STPA

STPA est une méthode itérative permettant l'analyse des dangers en accord avec le modèle STAMP. Utilisée de façon proactive (prévention des accidents), la méthode requiert cinq étapes qui constituent la phase dite statique. Pour l'utilisation réactive (enquête post-accidentelle), la méthode requiert deux étapes complémentaires qui constituent la phase dite dynamique.

La phase statique a pour objectif de décrire le système, son organisation et les interactions qui relient ses différents sous-systèmes. Elle comprend (1) une analyse préliminaire des risques du système ainsi qu'une définition de ses différentes contraintes, (2) l'établissement de la « structure de contrôle » dédiée à la sécurité du système (rôles des différents sous-systèmes et liste des rétroactions), (3) l'intégration à cette structure de contrôle des différentes contraintes du système, (4) l'étude de la structure de contrôle et des processus modélisés afin de déterminer les contrôles potentiellement inappropriés (Figure 67) et (5) une étape de gestion des risques visant à traiter les défauts dans les boucles de contrôle, hiérarchisée dans le temps (court terme, long terme). L'objectif de cette phase statique est donc de détecter d'éventuels problèmes liés aux actions de contrôle entre différents sous-systèmes (étape 4) ou au sein même des processus de contrôle (étape 5) pour définir des scénarios d'évolution du système pouvant conduire à l'émergence d'un accident.

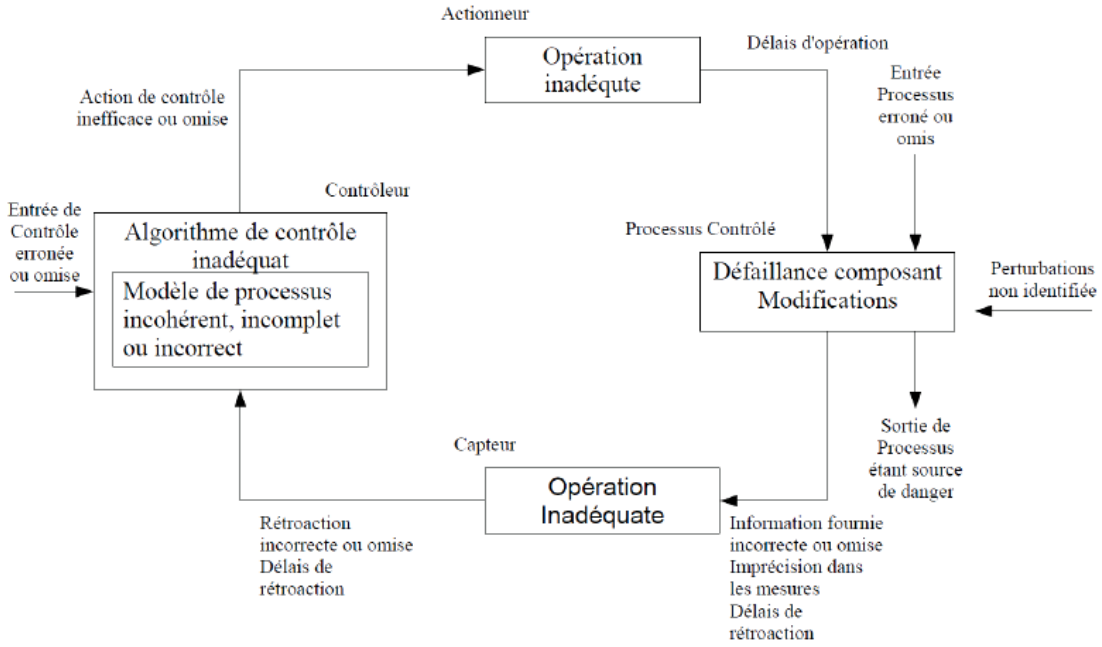

Figure 67 : Défaillances dans une boucle de contrôle (adapté de Leveson, 2010 par Hardy, 2010).

La phase dynamique complète cette première étude « statique » dans le cas des enquêtes post-évènements afin de rendre compte du comportement précis du système lors de l'accident. Elle comporte deux étapes supplémentaires : (6) une modélisation dynamique du système et (7) l'établissement des résultats sous forme de recommandations (Figure 68).

A travers ces différentes étapes, la méthode STPA et plus globalement, le modèle STAMP, cherchent à déterminer les raisons (passées ou potentielles) expliquant des défaillances du système de contrôle d'un système. Celui-ci est central dans le maintien de la sécurité ou l'émergence des accidents. Ses défaillances mettent en défaut des processus normalement chargés de gérer les changements internes ou externes et d'appliquer des contraintes en termes de sécurité. Pour des travaux en français présentant le modèle STAMP et des cas d'application de la méthode STPA, voir Hardy, 2010 ou Cridelich, 2011.

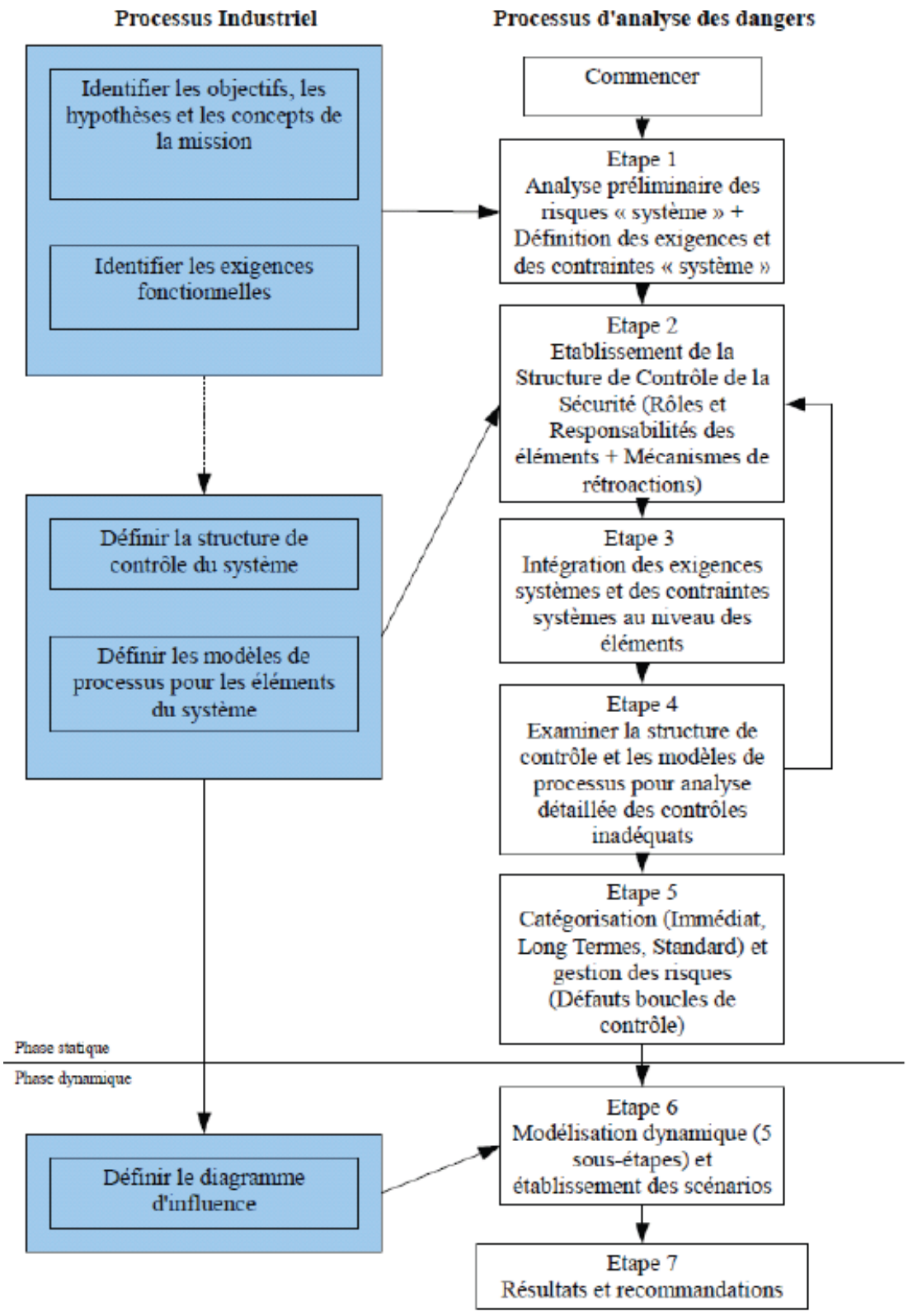

Figure 68 : Résumé des phases statiques (étapes 1 à 5) et dynamiques (étapes 6 et 7) de la méthode STPA (adapté de Leveson, 2004 par Hardy, 2010).

Avantages et inconvénients de STAMP

L'ouvrage *Human Factors Methods – A practical guide for engineering and design* (Stanton *et al.*, 2012) présente brièvement le modèle STAMP avant d'en souligner les principales forces et faiblesses (*op. cit.,* p. 214, 215).

Les principaux avantages de STAMP sont :

- La possibilité d'étudier les relations non-linéaires entre différents facteurs,
- L'utilisation possible pour l'enquête accident, l'analyse de risques et la prévention des accidents,
- La possibilité d'utiliser STAMP dans différents domaines industriels,
- L'existence d'une taxinomie des défaillances possibles dans les boucles de contrôle et d'une structure de contrôle type, destinées à guider les analystes dans le déploiement de STAMP (Leveson, 2004),
- Le caractère systémique de STAMP qui lui assure le soutien d'une portion active de la communauté de recherche en gestion de la sécurité, promouvant cette approche.

Les inconvénients sont :

- Les ressources nécessaires pour conduire l'analyse, notamment en termes de temps,
- La quantité importante de données détaillées pour l'approche compréhensive, voire un écart entre les besoins du modèle et les pratiques instituées chez les praticiens (Underwood, 2013),
- Le besoin identifié d'augmenter le niveau de guidage proposé à l'utilisateur par la méthode (Qureshi, 2007),
- L'incapacité de STAMP à entièrement analyser les raisonnements qui soutiennent les actions identifiées dans les scénarios d'accident[288].

Une autre méthode d'accident systémique a été développée à la même période que le modèle STAMP et fait également l'objet de nombreuses publications, applications et discussions : la méthode FRAM.

La méthode FRAM, théorie de la résonance

La méthode FRAM (Functional Resonance Analysis Method) a été développée par Erik Hollnagel entre 2004 et 2012. Cette méthode propose de décrire un système sociotechnique non pas par sa structure, comme la plupart des modèles d'accidents dont STAMP, mais à travers ses différentes fonctions. Hollnagel s'inspire de la résonance stochastique de la physique ondulatoire[289] pour représenter la dynamique d'un système, étudier ses variabilités et expliquer les accidents.

La méthode repose sur l'idée principale que succès et échec doivent être considérés de façon équivalente[290] comme des propriétés émergentes et elle cherche à rendre compte du rôle central des

[288] Point identifié par Almedia & Johnson (2005 ; cité par Stanton *et al.*, 2012).
[289] Qui consiste à ajouter un bruit (signal non-linéaire) à un signal périodique, difficile à détecter en raison de sa faible amplitude. La résonance du bruit avec le signal périodique permet alors de le rendre détectable.
[290] James Reason notait déjà que « *correct performance and systematic errors are two sides of the same coin* » (Reason, 1990b).

ajustements et des approximations dans la réalité opérationnelle des systèmes. Hollnagel complète ensuite la notion de causalité par celle de « résonance fonctionnelle ». La résonance fonctionnelle résulte de l'interaction entre la variabilité des performances nominales de toute activité, fonction ou processus d'un système (signal faible car ces écarts n'ont que très peu d'impact sur la performance globale du système) et la variabilité du reste du système et de son environnement, après avoir isolé une fonction ou une activité (signal non-linéaire ou bruit). L'objectif de la méthode est de décrire le travail tel qu'il est réellement effectué et non tel qu'il est (ou a été) imaginé (« *work-as-done rather than work-as-imagined* » ; Hollnagel, 2012). FRAM permet donc de décrire les évènements à partir des fonctions du système impliquées, décrites individuellement puis en termes de dépendances réciproques, sans ordre spécifique et sans reposer sur des relations, des entités ou des composants prédéfinis. Pour décrire la variabilité et la résonance fonctionnelle, une analyse FRAM se décompose en trois étapes principales.

La première étape consiste en une analyse fonctionnelle (ou analyse des tâches) conduite à l'aide d'un formalisme suggéré par la méthode. Chaque fonction ou activité élémentaire est « codée » suivant six attributs (Figure 69) qui permettent, dans une étape ultérieure, de connecter les différentes fonctions entre elles.

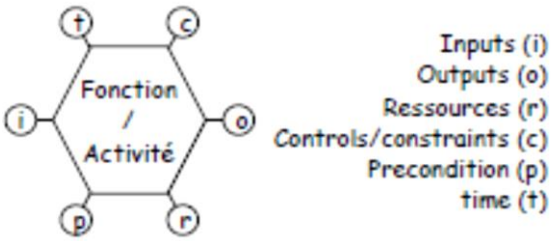

Figure 69 : Codage des fonctions FRAM, les six attributs sont les inputs (i) ou « entrées » de la fonction, les outputs (o) ou « sorties », les ressources (r) et le temps (t) nécessaires à la réalisation de la fonction, les contrôles (c) ou contraintes qui régissent l'exécution de cette fonction et les préconditions (p) qui représentent les éléments qui doivent être satisfaits ou réunis pour que la fonction puisse être réalisée (Hollnagel, 2012).

La deuxième étape demande de déterminer la variabilité de chaque fonction. Pour cela, FRAM utilise les CPC de la méthode CREAM (3.1.2) comme facteurs de contexte. Les fonctions, techniques, humaines ou organisationnelles, peuvent être impactées de façon stable, variable, adaptée, inadaptée ou imprévisible, par les différentes CPC. Le principe simplifié de la méthode est qu'une fonction aura une variabilité la plus élevée si ses CPC sont imprévisibles ou inadaptées, au contraire, des CPC adaptées ou stables vont induire une faible variabilité de la fonction.

La troisième étape s'intéresse aux interdépendances entre les différentes fonctions ou activités, jusqu'alors étudiées séparément. Pour cela, elle utilise les six attributs (ou connecteurs) de la première étape. En utilisant le formalisme graphique des hexagones, chaque fonction peut être reliée pour créer un réseau qui représente les flux d'informations ou de matières (entrées, sorties, ressources, etc.). La Figure 70 présente un exemple de diagramme FRAM.

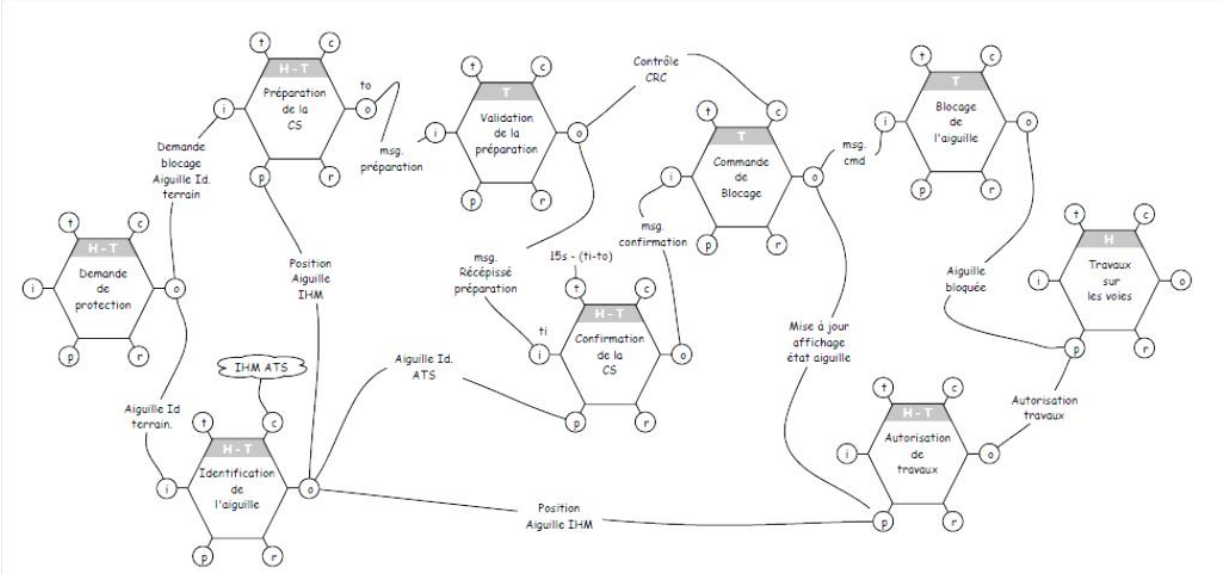

Figure 70 : Exemple de réseau FRAM où chaque hexagone représente une fonction ou une activité du système caractérisée par son type (humaine, H ; technique, T ; organisationnelle, O). Les connexions entre les fonctions représentent leurs interdépendances (d'après Belmonte et al., 2008).

Une fois le diagramme FRAM consolidé, l'objectif est d'une part de rechercher les interactions pouvant être à l'origine de résonances fonctionnelles indésirables et affecter les processus ou les activités du système ; d'autre part, de proposer des mesures à même de les éliminer ou d'en changer la nature. Le développement de mesures préventives ou palliatives est notamment favorisé en termes de barrières. Hollnagel (2004, 2012) propose un guidage pour développer des barrières efficaces dans un système donné, il distingue alors les barrières physiques (qui contraignent les actions), fonctionnelles (qui requièrent des préconditions), symboliques (existence physique) et incorporelles (sans existence physique).

Pour une présentation et un cas d'application en français de la méthode FRAM, voir les travaux de Belmonte *et al.,* 2008.

Avantages et inconvénients de FRAM

Tout comme STAMP, l'ouvrage *Human Factors Methods – A practical guide for engineering and design* (Stanton *et al.*, 2012) présente la méthode FRAM et en souligne les principales forces et faiblesses (*op. cit.,* p. 229, 230).

Les principaux avantages de FRAM sont :

- La possibilité de réaliser des analyses rétrospectives et proactives en gestion de la sécurité,
- L'approche systémique de la méthode qui permet de questionner les interactions entre composants d'un système (Nouvel *et al.,* 2007),
- L'aide apportée pour le développement de mesures correctives ou préventives,
- La production d'une représentation graphique de l'accident qui permet d'améliorer l'analyse et la communication de ses résultats.

Les inconvénients sont :

- Le besoin d'avoir des indicateurs de performance explicites et détaillés pour identifier les actions non-sûres (qualifier les variabilités des composants),
- L'analyste doit avoir une connaissance solide du système étudié,
- L'analyse peut être longue.

Synthèse, la force des SAA

Nous avons présenté deux modèles systémiques d'accident : STAMP, qui repose sur le concept de contrôle et FRAM, sur le concept de résonnance fonctionnelle. Ces deux modèles considèrent explicitement l'accident comme un phénomène émergent, c'est-à-dire, comme le produit d'interactions entre différentes sous-parties d'un système. Ces modèles sont présentés comme apportant de nombreuses avancées dans la gestion de la sécurité, aussi bien pour l'analyse des accidents que pour leur prévention. Ainsi, en reposant sur une théorie systémique, les SAA permettent l'étude des aspects dynamiques, non-linéaires, rétroactifs, des interactions entre les composants d'un système. En éloignant l'explication des accidents des actions isolées d'un opérateur ou des effets d'une défaillance technique, les SAA permettent de développer des recommandations correctives ou préventives plus globales que les modèles centrés sur l'activité. Malgré les avancées qu'ils revendiquent porter, les modèles SAA n'ont pas, à ce jour, été adoptés à grande échelle par les praticiens (toujours largement influencés par la théorie de l'accident organisationnel et le SCM). Ainsi, depuis une vingtaine d'années s'est développé un débat sur la nature des accidents, l'évolution des systèmes sociotechniques et la validité des modèles d'accidents.

4.3.2. Deux écoles incompatibles pour « penser l'accident »

Dans la communauté de recherche des safety sciences il semble aujourd'hui s'opposer deux axes de recherche qui divergent théoriquement sur la nature des accidents. Le paradigme[291] de l'accident organisationnel, sur lequel s'appuient les pratiques de prévention et d'analyse des accidents depuis les années 1990, est mis en cause par la formulation de nouvelles théories (systèmes, contrôle, résonnance). Ces nouvelles théories, bien qu'ayant des singularités, se revendiquent toutes assez explicitement de l'approche systémique. Elles fondent leur légitimité sur les biais et les limites qu'elles attribuent à une approche, qualifiée de « classique » (Hardy, 2010), considérée comme linéaire et causale.

Bien que les apports de l'approche systémique à la compréhension des accidents soient largement appréciés, certains questionnent l'utilité des modèles, souvent complexes, soutenant les théories systémiques. Ces auteurs prônent alors un développement et une augmentation du paradigme de l'accident organisationnel, plutôt que sa remise en cause.

[291] Celui de l'accident *organisationnel* en ce qu'il résulte d'interactions (causales ou systémiques) entre les actions des opérateurs et des conditions *latentes*, découlant des espaces de travail ou des processus organisationnels. Ce paradigme s'est répandu sous l'influence principale des travaux de James Reason.

Cette opposition entre deux écoles de pensée est, bien entendu, manichéenne. Les « appartenances » des auteurs à telle ou telle école sont relatives et évoluent dans le temps. Toutefois, les différentes classifications des modèles d'accidents que nous avons présentées (4.2.2), qu'elles aient une approche historique, par les usages ou par les fondements théoriques, soutiennent bien cette dualité. Le SCM est d'ailleurs un très bon marqueur de ces oppositions entre les tenants d'un développement du cadre existant et ceux de son remplacement. On pourrait parler, au sens de Khun (1962), de période de *révolution scientifique*. En effet, le cadre de Khun sur la *structure des révolutions scientifiques* permet une prise de recul sur le débat académique autour des modèles d'accidents.

Notre propos se bâtit sur cette idée d'opposition entre deux « écoles de pensée de l'accident » que nous proposons de définir. Dans un premier temps, nous passons en revue leurs principaux points de convergence. Cette étape permet de définir des limites, constatées et partagées, du paradigme actuel. Dans un second temps, nous tenterons de caractériser deux *écoles* sur la base d'éléments dialectiques et de postures épistémologiques différentes de la complexité. Cet exercice, que nous reconnaissons empreint de subjectivité et réducteur, n'a pas pour finalité de stigmatiser des courants de pensée mais, au contraire, de discuter (modestement) d'opportunités futures de développement pour la recherche en safety sciences. En effet, définir deux écoles de pensée autorise de convoquer des notions comme la convergence et la collaboration dans un cadre discutable. En quelque sorte, de proposer un *modèle de production collaborative de modèles d'accidents*.

La construction d'un tel *méta-modèle* demande une approche holiste et pluridisciplinaire. Notre propos s'inspire de considérations aussi bien techniques, épistémologiques, ontologiques, que sociologiques. Le choix périlleux de prétendre une telle ouverture du champ disciplinaire semble, sinon nécessaire, justifié dans le champ des safety sciences qui, fort d'une visée utilitariste et éthique (prévenir des accidents ou du moins, de leurs conséquences négatives), mêle la recherche et l'action. En effet, il faudrait idéalement pouvoir rendre compte des interactions continues, sur lesquelles reposent les safety sciences, entre des systèmes techniques, des ingénieurs (aux différentes spécialités), des chercheurs (en psychologie, sociologie, mathématique, géographie, physique, ergonomie, anthropologie, géotechnique, chimie, philosophie, informatique, épistémologie, etc.), des professionnels (opérateurs, cadres, dirigeants, traders, juristes, etc.) et des citoyens (l'auteur de ces lignes, son lecteur, et les autres). Le point de départ de cette réflexion est la lecture critique de publications sur les modèles d'accidents[292]. Depuis une vingtaine d'années, et notamment l'émergence de modèles revendiqués systémiques, différentes prises de positions sur la nature, l'utilité voire la validité des modèles apparaissent se répondre ; formant ainsi un débat académique.

Constats partagés et ligne d'opposition

Dans un premier temps, il convient d'exposer certains constats partagés par les différentes parties prenantes du débat sur les modèles d'accidents :

- des accidents continuent d'arriver, certains sont récurrents (certains auteurs suggèrent même qu'une nouvelle *safety decade* est en train de s'achever ; Le Coze (2013) parle d'une '*déjà-vu experience*').

[292] Voir notamment les parties 2.1.1., 2.3.2, 4.2.2.

- les théories et les modèles à disposition des professionnels n'ont (donc) pas atteint le but (théorique, ultime) de suppression des accidents ou de réduction de leurs conséquences (ces dernières auraient d'ailleurs tendance à augmenter).
- il n'existe pas de modèle ou méthode spécifique qui puisse prétendre être « la meilleure » dans toutes les conditions (Reason, 2008 ; Hollnagel & Speziali, 2008).

Nonobstant ces points d'accord, l'absence de consensus universel sur les concepts d'*accident* ou de *sécurité* induit des hypothèses de développement et des sujets de recherche différents. Il apparaît que certains chercheurs remettent en cause la contemporanéité et l'utilité de modèles, comme le SCM, alors que d'autres au contraire les soutiennent. Le point de désaccord peut être écarté du débat sur les modèles et généralisé à la question de la « nature de l'accident ». La nature de l'accident a-t-elle évolué ? Si oui, les modèles d'accident doivent évoluer également et l'obsolescence des modèles d'anciennes générations peut être avancée. Si non, comment expliquer les limites des modèles d'accidents pour éliminer ceux-là ?

Une réflexion qui analyserait les fondements de ce débat devrait permettre de proposer un cadre de travail pour faire converger les réflexions théoriques des chercheurs. Ce faisant, il serait possible de réduire l'écart qui existe aujourd'hui entre la recherche contemporaine sur l'accident (et les modèles systémiques) et les pratiques des professionnels, encore largement influencées par le SCM et la théorie de l'accident organisationnel. Nous proposons de contribuer à la première étape d'une telle réflexion en discutant des divergences sur la nature de l'accident. Notre hypothèse est que ces divergences ont pour origine une acception différente, entre les chercheurs, de la notion de *complexité* qui n'est pas suffisamment définie par les différentes parties-prenantes.

Complexité épistémologique et complexité ontologique

Dans le premier chapitre, nous avons cité Edgar Morin, l'un des penseurs francophones faisant figure d'autorité dans le domaine de la complexité, qui affirme que « *la complexité est un mot problème, pas un mot solution* » (Morin, 1990 ; voir 1.3.1). Malgré cela, de très nombreux auteurs ont employé la notion de complexité dans le champ des sciences des organisations. C'est ce que montre la revue de littérature de Schapper *et al.* (2005) : « *despite the ubiquity of the use of complex/complexity and the disparate range of activities these words describe the concept itself appear to have been considered unproblematic not deserving of greater clarification* ». Ainsi, des auteurs comme Etzioni ou Perrow (respectivement 1961 et 1979 ; cités par Schapper *et al.,* 2005) publient des livres avec pour titre « *Complex organizations* » mais ne proposent pas d'explication sur l'utilisation du terme *complexe* ; Hage & Aiken (1970 ; cité par Schapper *et al.,* 2005) publient un chapitre introductif à « *Social Change in Complex Organizations* » dans lequel ils définissent « social », « change » et « organisation »... mais pas « complexe ». Cette revue de littérature montre, à un premier niveau, que malgré l'identification de nombreux facteurs contribuant à, ou résultant de, la complexité organisationnelle, le terme est employé sans définition spécifique (donc, dans une acceptation qui relèverait d'un sens commun). Un second enseignement nous semble de grand intérêt pour notre démarche de caractérisation de deux écoles de pensée de l'accident, la revue de littérature amène ses auteurs à noter l'émergence d'une « *ligne de fracture* » (*fault-line*) entre une approche *ontologique* et une approche *épistémologique* de la complexité organisationnelle.

Cette distinction entre deux entendements, deux constructions de « la complexité » apparaît déjà dans un article de Pringle (1951) qui définit la *complexité épistémologique* par le nombre de

paramètres nécessaires pour définir entièrement un système dans le temps et l'espace et qui l'oppose à une *complexité ontologique,* dont le sens ne peut être scientifiquement exprimé, car la complexité d'un système ne pourrait être évoquée indépendamment de la façon dont ce système est observé et décrit. Cette distinction est reprise (et adaptée à la complexité organisationnelle) par Schapper *et al.* (2005) mais semble aussi se retrouver dans l'opposition proposée par Tsoukas et Hatch (2001) entre *complexité de premier ordre,* utilisée pour décrire une réalité considérée objective, et *complexité de second ordre*, utilisée pour décrire des processus de pensée complexes[293]. Nous conserverons les termes de *complexité ontologique* et *épistémologique* en retenant, au niveau le plus simple possible, que l'ontologie se rapporte à la nature du phénomène et que l'épistémologique est la façon dont on accède à la connaissance de celui-là.

Ainsi, la perspective ontologique considère une réalité (naturelle et sociale) dont l'existence est indépendante de l'observateur. L'accès à une connaissance de cette réalité repose sur le domaine du sensible, l'observation ou la mesure ; on parlera d'épistémologie objective ou positive. A l'opposé, une approche subjective de l'épistémologie postule que la réalité que les gens observent est une réalité qu'ils construisent (Gioia, 2003 ; p. 287) ; on parlera d'épistémologie constructiviste[294].

Dans la perspective d'une complexité organisationnelle ontologique[295], la complexité est une propriété objective, réelle, préexistant à la cognition humaine, qui peut être identifiée et mesurée. Elle est donc considérée comme une variable et un attribut de la réalité organisationnelle. La complexité est dès lors identifiée comme la résultante de propriétés objectives telles que la taille d'une organisation, le degré de technologie impliquée dans les processus ou le dynamisme de l'environnement du système organisationnel. Dans la perspective d'une complexité organisationnelle épistémologique[296], les organisations sont complexes car les différentes façons (disciplines, méthodes, outils) qui permettent de connaître l'organisation la rendent... impossible à connaître (Nord & Connell, 1993 ; cité par Schapper *et al.,* 2005). Dès lors, il faudrait se résoudre à reconnaître que la complexité des organisations n'est pas liée à l'existence (ontologique) de variables objectives mais plutôt à l'étendue de ce qui peut être su et plus encore, de ce qui ne sera jamais su au sujet des organisations. La complexité de l'organisation ou du système sociotechnique peut dès lors être considérée comme un problème épistémique plutôt qu'une question ontologique[297] ; « *for Hatch* [1997] *and other writers who work with multiplicity and plurality, the focus of complexity is not, for instance, necessarily on the specifics of organisational structures or task; instead, the complexity lies in their attempts to know and understand organizations* » (*op. cit.*).

En considérant ces deux acceptations de la notion de complexité organisationnelle, on peut justifier de l'émergence de deux écoles de pensée de l'accident. Nous les nommons, de la façon la plus neutre possible, « école 1 » et « école 2 » (sans hiérarchie ou notion d'antécédence).

---

[293] « *Complexity is not only a feature of the systems we study, it is also a matter of the way in which we organize our thinking about those systems* » (Tsoukas & Hatch, 2001).

[294] Il est intéressant de noter que malgré une opposition en apparence rigide, une épistémologie objective suppose l'existence d'une ontologie objective mais une épistémologie constructiviste s'accorde à la fois avec l'idée d'une ontologie objective et subjective (Johnson & Duberley, 2000 ; cité par Schapper *et al.,* 2005).

[295] Sous-entendue objective.

[296] Sous-entendue constructiviste.

[297] Voir Schapper *et al.,* (2005) pour une liste détaillée d'auteurs défendant respectivement les approches par la complexité ontologique et épistémologique dans le champ des organisations.

L'école 1 : accidents et complexité ontologique

Une première logique affirme que les méthodes d'investigation et par extension, les modèles d'accidents, sont en écart par rapport à la réalité des systèmes sociotechniques ; « *accident investigation methods* [...] *typically lag behind the socio-technological developments by 20 years or more.* » (Hollnagel & Speziali, 2012). En postulant que les méthodes d'investigation d'accidents devraient suivre le développement des systèmes sociotechniques, ce propos indiquerait que la *nature* des accidents est, elle-même, fonction de la nature des systèmes sociotechniques. Dès lors, l'évolution des systèmes implique l'obsolescence des méthodes : « *we must expect that the methods developed today will* [be] *partly obsolete, not because the methods change but because the nature of socio-technical systems, and therefore the nature of accidents, do*. » (*op. cit.*).

Cette logique explique donc l'insuffisance des pratiques de gestion de la sécurité (qui contribue au constat partagé de la récurrence des accidents) par un écart entre les modèles d'accidents et la nature des systèmes sociotechniques. L'école 1 pourrait ainsi être qualifiée d'« école du gap sociotechnique ». Parmi les chercheurs largement cités, défendant cette approche, on peut mentionner Erik Hollnagel (2004), Nancy Leveson (2012) ou Sidney Dekker (2002).

Ainsi l'école du « gap sociotechnique »[298] travaille à la production de modèles qui expliqueraient un « monde nouveau », fait de systèmes sociotechniques complexes et considère, dans le même temps, que les modèles utilisés par les praticiens (notamment le SCM) sont limités pour rendre compte de la nature nouvelle des accidents. La pensée de cette école se revendique de la Théorie des Accidents Normaux du sociologue Charles Perrow. Selon cette théorie, les accidents surviennent dans des systèmes au *couplage fort* et à la *complexité élevée*. C'est donc bien dans une perspective de complexité ontologique qu'Hollnagel et Spiazeli (2008) exploitent la classification des systèmes sociotechniques de Perrow pour évaluer 17 méthodes d'analyse d'accidents (*op. cit.*, p. 24). Dans cette étude, Hollnagel utilise une classification des modèles d'accidents qu'il publie en 2004 (présentée au 4.2.2), qui distingue :

- Les modèles *séquentiels* d'accidents, basés sur l'idée de « cause profonde », erronée selon Hollnagel qui affirme que ces modèles impliquent une explication de l'accident par des séries simples et linéaires de relations de « cause - effet ». Pour illustrer cette catégorie, l'auteur cite la Théorie des dominos (Heinrich, 1931), le modèle de Svenson (2001) et Anatomy of an accident (Green, 1988). Hollnagel indique que ces modèles sont dépassés et incapables de rendre compte des accidents dans les systèmes sociotechniques actuels.
- Les modèles *épidémiologiques*, basés sur l'idée que, comme une maladie, l'accident émerge de la combinaison de facteurs « actifs » et d'autres « latents ». Hollnagel considère le SCM comme un modèle épidémiologique[299].
- Les modèles *systémiques*, les plus récents développés, qui (toujours d'après l'auteur) considèrent l'accident, non pas comme un phénomène résultant (prédictible d'après l'état d'un système, explicable de manière causale), mais émergent (fruit d'interactions complexes et dynamiques et par conséquent non explicable de manière causale).

[298] Que l'on pourrait également qualifier d'école de la complexité ontologique.

[299] Ce à quoi Reason opposera : « *I have used medical terms – resident pathogens, the body's immune system, and so on – but I still think of [the SCM] as a systemic model, albeit one that retains some sequential characteristics »* (Reason, 2008 ; p. 94).

Cette classification soutient l'idée d'une validité (vérité) théorique des modèles SAA supérieure à celle des modèles causaux. Ainsi, pour l'école 1 :

- Les modèles d'accidents sont datés, ils ont donc un intérêt contemporain limité et deviennent obsolètes, en raison de l'évolution de la complexité (ontologique) des systèmes sociotechniques.
- Les modèles SAA sont mieux à même de représenter les aspects complexes et combinatoires des accidents. Ces modèles sont donc plus valides que leurs prédécesseurs.
- Le SCM n'est pas un modèle SAA puisqu'il implique une vision causale, linéaire et statique de l'accident. Les pratiques devraient évoluer vers l'usage de modèles SAA (comme FRAM ou STAMP).

L'étude d'Underwood et Waterson (2013) sur le « *gap entre la recherche et la pratique* » dans le cas des méthodes systémiques d'analyse d'accident montre que les méthodes SAA sont souvent en écart avec les pratiques effectives des professionnels. Ces méthodes sont estimées plus coûteuses en ressources et longues à mettre en œuvre, plus difficiles d'accès sur le plan théorique et souvent « plus performantes que nécessaires », soit pour des raisons pratiques (indépendamment de la « complexité » du système sociotechnique, un accident peut être « simple »), soit pour des raisons politiques (dans certains cas, l'attribution d'une sanction peut motiver l'analyse, dès lors, les causes systémiques ne fournissent pas les éléments recherchés). On notera enfin certaines limites de Théorie des Accidents Normaux (qui constitue un des fondements de l'école 1). Perrow lui-même reconnaît que la majorité des accidents ne sont pas des « accidents normaux » (sous-entendu, liés à la présence de nombreuses rétroactions et à une complexité élevée du système) car ils s'expliquent, en grande partie, par des défaillances d'ordre organisationnel ou managérial, non par la complexité ontologique qui découle d'un déterminisme technologique :

> « *Following the publication of the book in 1984, we had a series of notable accidents: Bhopal, Chernobyl, and in the United States, the Challenger and the Exxon Valdez oil spill. I was told I had bragging rights, but this was not true. All of them were just waiting to happen: the result of managerial negligence and, in addition, in the case of the Challenger, of extreme production pressures. Normal accidents are fairly uncommon and, I add, cannot be completely prevented. These accidents were all preventable. The vast majority of accidents are preventable.* » (Perrow, 1999, p. 23).

La première remarque, d'ordre pratique, que l'on peut formuler à propos de l'école 1 est qu'elle risque d'engendrer un double mouvement (1) de rejet des modèles existants, notamment le SCM, considérés obsolètes et (2) de développement de théories en écart avec les pratiques, les moyens voire les besoins des praticiens (Underwood, 2013 ; Underwood & Waterson, 2013). La seconde remarque, d'ordre théorique, est celle des limites de l'approche positiviste de la sécurité (Blazin, 2014 ; chapitre 1) et ontologique de la complexité. Comme le note Le Coze (2015), Perrow avait peut-être raison pour les mauvaises raisons[300] : le déterminisme technologique qui a été attribué à son livre « *Normal Accidents* » (1984) est réducteur. Or, c'est bien de cette complexité ontologique que s'inspire l'école 1 en se revendiquant de Charles Perrow (e.g. Leveson, 2011).

On retiendra donc, à la suite de la partie 4.3.1 et de la présentation de l'école 1, que les modèles SAA offrent une perspective systémique sur les accidents. Ils permettent ainsi de rendre compte du

[300] Dans un article intitulé « *1984–2014. Normal Accidents. Was Charles Perrow Right for the Wrong Reasons?* ».

dynamisme et du caractère émergent de ce phénomène. Toutefois, si le critère de validité importe, l'utilité des modèles d'accidents prévaut. Dans le domaine des safety sciences, recherche et pratiques ne peuvent être dissociées. Or, les modèles SAA (actuellement disponibles) sont en écart avec les pratiques et ont peut-être fondé une légitimité discutable sur un discours associant de façon arbitraire (ou par une lecture biaisée de la théorie de l'Accident Normal) la complexité de l'accident à la complexité ontologique d'un système sociotechnique. Cette approche de l'accident s'oppose avec celle d'auteurs qui, eux, forment ce que nous appelons l'école 2.

L'école 2 : accidents et complexité épistémologique

Les auteurs de l'école 2, estiment que quand bien même la nature des technologies et des organisations évolue, la nature des activités professionnelle des opérateurs n'a pas fondamentalement changé (Hovden *et al.*, 2010). Dans une perspective épistémologique de la complexité, il est en effet possible de concevoir qu'un système sociotechnique peut être complexe pour un observateur sans l'être, pour autant, pour ses acteurs. L'accident a toujours été un phénomène émergent d'interactions entre les facteurs techniques, humains et organisationnels et sa nature n'évolue pas significativement avec les évolutions de la technique. Entre le naufrage du Titanic et celui du Costa Concordia ou entre deux accidents de barrages (1.1.3), la technique et la technologie peuvent varier significativement mais il existe de nombreux invariants. Dans cette perspective, l'évolution constatée depuis des modèles d'accidents linéaires jusqu'à des modèles systémiques n'est donc pas à attribuer à l'évolution de complexité des systèmes, mais constitue plutôt le résultat d'une approche incrémentale dans la modélisation d'un phénomène complexe. Si les modèles d'accidents n'ont pas atteint le but théorique de prévenir tous ces évènements, c'est que nos modèles n'ont pas encore permis de conceptualiser toute la complexité de l'accident. Nous pourrions qualifier l'école 2 d' « école du gap conceptuel » [301].

Cette école est notamment inspirée de la théorie de l'accident organisationnel. Pour Reason, toute étiologie de l'accident qui examine au-delà de l'évènement « local » pour trouver des facteurs contributifs dans l'espace de travail, l'organisation et le système comme un « tout » relève d'une perspective systémique. Cette vision que Reason résume par l'idée selon laquelle les opérateurs (*frontline personnel*) ne sont pas tant les instigateurs d'évènements indésirables, que les héritiers de conditions latentes (ou « agents pathogènes ») qui peuvent d'être accumulés durant une longue période. Reason constate qu' « *examining accident reports will* [bring] *the 'not again!' reaction.* En effet, [f]*ar from being random, accidents in many different domains have a way of falling into recurrent patterns.* » (Reason, 2008 ; p. 113).

Les auteurs de l'école 2 affirment que les modèles SAA, soutenus par l'école 1, sont peu utiles car ils sont éloignés des pratiques des professionnels de gestion de la sécurité (notamment en termes de collecte et d'analyse des données ; Roelen, Lin & Hale, 2011). Les SAA sont coûteux en ressources et en temps, la quantité et le niveau de détail des données d'entrée qu'ils mobilisent n'est parfois pas atteignable en pratique, enfin leurs recommandations à l'échelle du système peuvent être délicates, longues ou coûteuses à mettre en œuvre. Reason considère que, « *when taken to extremes* », les SAA présentent un risque d'inhibition des actions correctrices en situant celles-là hors du champ d'action des individus chargés d'utiliser ces modèles :

[301] Que l'on pourrait qualifier, par opposition, d'école du gap de la complexité épistémologique.

> « *People on the frontline* [of] *any hazardous enterprise generally have little opportunity to bring about rapid system improvements, or any kind of global change, but they can resolve to go the extra mile.* […] *Personal qualities do matter. To think otherwise is to fall prey to 'learned helplessness' – saying to oneself 'What can I do? It's the system'.* » (Reason 2008, p 102-103).

L'école 2 se caractérise donc par des auteurs qui adoptent une vision épistémologique de la complexité et qui discutent la valeur des modèles d'accidents sur la base de leur utilité plutôt que leur validité théorique. Suivant cette logique, l'axe principal de développement des modèles d'accident serait de faire évoluer les modèles les plus influents sur les pratiques (notamment le SCM) afin d'augmenter leur efficacité ; notion d'efficacité relevant du meilleur équilibre possible entre la profondeur de l'analyse, qu'améliore l'approche systémique de la sécurité, et la capacité des acteurs à mettre en œuvre les recommandations. Le SCM, ancré dans les pratiques, est donc perçu comme un levier intéressant à conserver mais auquel il faut attribuer de nouveaux usages, en guidant les pratiques vers une réflexion systémique. De telles tentatives donnent naissance à de nouveaux modèles ou, plus exactement, de nouvelles méthodes et de nouveaux outils, associés à la théorie de l'accident organisationnel (e.g. Shappell & Wiegmann, 2000 ; Eurocontrol, 2005 ; ATSB, 2008). L'utilisation pour l'analyse d'accidents de « SCM augmentés »[302] confirme le caractère systémique de la théorie de l'accident organisationnel (Arnold, 2009 ; Underwood & Waterson, 2014). L'approche de l'école 2, adoptée de façon trop rigide, pourrait à l'extrême conduire à une forme de déterminisme, voire de fatalise. Critiquer les « nouveaux modèles » pour leur complexité (d'usage) et leur manque de pragmatisme tout en négligeant de modifier les « modèles classiques » en considérant que les accidents sont inéluctables, pourrait résulter dans un immobilisme préjudiciable. Pire encore, la recherche théorique pourrait s'exonérer de sa responsabilité, de son influence, sur les pratiques en considérant que le savoir est « disponible » et que c'est aux praticiens qu'il appartient de l'acquérir et le mobiliser.

Considérer que la complexité n'est pas une spécificité du système sociotechnique, de l'organisation étudiée, de sa structure ou de ses activités, mais qu'elle réside dans la tentative de connaître et comprendre ces organisations – perspective épistémologique de la complexité – permet de défendre le caractère contemporain de modèles tels que le SCM. L'efficacité, l'utilité des modèles d'accident sont largement influencées par leurs modalités de mise en œuvre. Pour autant, un modèle d'accident se doit de guider les pratiques et il souvent plus efficace (quoique moins facile), lorsqu'un écart est constaté entre les usages souhaités et les usages effectifs, de remettre en cause l'outil plutôt que son utilisateur. Il convient, pour achever cette présentation de l'école 2, de noter que l'effort de développement des modèles pour améliorer le guidage des pratiques est partagé avec certains auteurs relevant de l'école 1. Il existe ainsi des tentatives de développement, de modification ou d'amélioration des modèles SAA, plus ou moins structurantes, qui visent à dépasser des limites ou des problèmes liés à leurs utilisations (e.g. Kazaras *et al.,* 2014 ; Hassall *et al.,* 2014 ; Rohret, 2015). *In*

[302] Par exemple, la méthodologie SOAM (Systemic Occurrence Analysis Methodology) propose par Eurocontrol, est considérée permettre un analyse systémique des données collectées dans les enquêtes de sécurité (*safety investigations*) ; « *for summarizing this information* [it uses] *a structured framework and standard terminology*. […] *SOAM draws on the theoretical concepts inherent in the Reason Model, but also provides a practical tool for analyzing and depicting the inter-relationships between all contributing factors in a safety occurrence*. » (Eurocontrol, 2005 ; p. 22).

fine, que ce soit pour la conception, le développement ou l'utilisation de modèles, les deux écoles semblent confrontées à ce que « *le simple est toujours faux. Ce qui ne l'est pas est inutilisable* »[303].

Synthèse et discussion sur l'opposition entre l'école 1 et l'école 2

Nous avons décrit deux écoles de pensée de l'accident qui, en adoptant deux regards différents sur le monde, militent pour des développements différents dans le domaine des modèles d'accidents. La controverse sur l'utilité, la validité, la contemporanéité des modèles perdure depuis une vingtaine d'années. Aucun consensus ne semble émerger malgré de nombreuses tentatives de comparaisons systématiques et critiques de méthodes (Lundberg *et al.,* 2009 ; Underwood & Waterson, 2014)[304]. Le Tableau 28, ci-dessous, propose la synthèse des développements de cette partie :

Tableau 28 : Synthèse comparative des divergences entre deux écoles de pensée sur les modèles d'accidents.

	Ecole 1	**Ecole 2**
Perspective sur la complexité	- Ontologique	- Epistémologique
Arguments sur la valeur des modèles d'accidents	- Validité scientifique, capacité à rendre compte de la nature des accidents	- Utilité pratique, capacité à produire des recommandations pragmatiques de prévention
Explication des limites actuelles des modèles d'accidents	- Ecart entre la nature des systèmes pour lesquels les modèles ont été conçus (simples, linéaires) et celle des systèmes pour lesquels les modèles sont utilisés (complexes, dynamiques) - Existence d'un « gap sociotechnique »	- Utilisation simplificatrice des modèles par manque de connaissances théoriques des praticiens - Capacités insuffisantes des modèles à guider les utilisateurs. - Existence d'un « gap conceptuel »
Modèle(s) de référence(s)	- STAMP, FRAM	- SCM (HFACS, Tripod, ATSB)
Axes de développements soutenus	- Développer de nouveaux modèles, à même de rendre compte de la complexité croissante des systèmes sociotechniques - Faire adopter les modèles les plus récents aux praticiens	- Faire évoluer les modèles d'accidents les plus influents sur les pratiques (notamment le SCM) - Guider les usages vers le meilleur équilibre entre la profondeur de l'analyse et le pragmatisme des mesures préventives
Références indicatives	- Hollnagel (2004) - Dekker (2006) - Hollnagel, Woods, Leveson (2006) - Leveson (2012)	- Reason (1997 ; 2008) - Reason, Hollnagel[305], Paries (2006) - Stanton, Rafferty, Blane (2012) - Salmon, Cornelissen, Trotter (2012) - Underwood (2013)

Nous avons insisté sur la différence de points de vue, entre les deux écoles, à propos de la complexité organisationnelle (ontologique ou épistémologique) et par extension, sur la complexité des systèmes

[303] Valéry, P. (1942 ; Ed. 1960). *Œuvres II*. Ed. Gallimard, coll. Bibliothèque de la Pléiade, 1960, p. 864.

[304] Ces deux publications considèrent respectivement le SCM, comme linéaire, causal et dépassé ; et, comme systémique, doté d'un intérêt contemporain.

[305] On note qu'Hollnagel est auteur ou co-auteur de publications qui considèrent respectivement le SCM comme un modèle « *épidémiologique* », « *complexe linéaire* » ou « *systémique* ».

sociotechniques, la complexité du phénomène « accident » et enfin, la complexité des modèles d'accidents. Nonobstant l'importance que nous avons accordée aux perspectives ontologiques et épistémologiques, il est délicat de déterminer un champ précis dans lequel les deux écoles placeraient le débat sur les modèles d'accidents ; des considérations techniques, pratiques, théoriques, philosophiques, étiologiques, ontologiques, épistémologiques, sémantiques se mêlant et se répondant. C'est peut-être l'évolution naturelle des safety sciences, dès lors qu'elle mobilise des concepts et des théories comme la complexité et l'approche systémique ?

> « *Le discours de l'approche systémique reste cependant profondément hétérogène.* […] *Parallèlement aux études assez complètes utilisant la théorie des systèmes comme alibi scientifique, on trouve des analyses mieux centrées sur le concept de système, mais laissant échapper de nombreux facteurs sociopolitiques* […]. *Les tendances récupératrices utilisent le label systémique pour promouvoir d'anciennes disciplines qui en sont parfois fort éloignées par l'esprit* […]. *Les tendances novatrices développent des travaux originaux sans se référer forcément au label systémique, bien qu'ils en suivent l'esprit* […]. » (Walliser, 1977 ; p. 239, 240).

Les approches théoriques des deux écoles, telles que nous les avons décrites, sont incompatibles et incommensurables. Incommensurables car il y a désaccord, entre les chercheurs des deux écoles, sur les définitions des termes (erreur, accident, complexité, systémique), sur les problèmes à examiner (évolution des systèmes sociotechniques, comportements des individus, environnements locaux, système global) et sur les solutions possibles (défenses techniques, humaines ou organisationnelles). Ces divergences n'excluent pas des emprunts, conceptuels ou pratiques, d'une école à l'autre ; mais les usages différents. Travaillant dans des mondes différents, les chercheurs voient « *des choses différentes quand ils regardent dans la même direction à partir du même point* » (Willett, 1996). Ainsi, comme note Reason, « *just as there are no agreed definitions and taxinomies of error so there is no single 'right' view of accidents. In our business, the 'truth' is mostly unknowable and takes many forms. In any case, it is less important than practical utility*. » (Reason, 2008).

Si l'on ne peut pas connaître la « vérité » dans les safety sciences, comme le prétend Reason, c'est qu'il n'existe pas de corpus d'observation *neutre,* qui permettrait de choisir entre deux théories concurrentes pour le statut de paradigme (d'où l'incommensurabilité et l'incompatibilité de ces derniers). En effet, un tel corpus d'observation devrait être décrit par un observateur qui ne soit pas interne au système étudié, or, comme l'exprime Le Coze, un tel dualisme objet/sujet est inconcevable dans les safety sciences (surtout dans une perspective systémique) : « *(techno)science is not value-neutral and scientists (whether engineers, psychologist, sociologists, etc.) cannot be in an external as well as neutral position (i.e. rejecting the fact/value dualism), the consequence of this is that 'there is no outside', there is no one to turn to in order to hear about an objective viewpoint* ».

De plus, la formulation d'une théorie est un processus adapté aux conditions restrictives de son contexte de production ; bien que ce processus puisse être systématisé et contrôlé, il est fondamentalement limité. Les théories sont toujours partielles, elles mettent l'accent sur une partie du réel et en ignorent le reste. « *Une théorie n'est pas la réalité ni un moyen pour révéler la vérité* [mais] *crée une réalité qui permet de concevoir, de percevoir, de comprendre et d'expliquer un aspect du réel de manière logique et formelle. Il est donc plus fécond de se demander si une théorie est utile plutôt que de se demander si elle est vraie* » (Willett, *op. cit.*).

Notre description de deux écoles rend compte d'une tendance marquée dans les prises de positions, parfois très engagées[306], d'auteurs qui sont parmi les plus lus et cités des safety sciences. Toutefois, il existe des mouvements anti-dualistes, des propositions de convergence entre les modèles, les méthodes et les concepts des deux écoles. Ces initiatives peuvent servir de base à une réflexion sur l'intérêt tout particulier, dans le contexte que nous avons décrit, de renforcer les démarches collaboratives dans le cadre du développement de futurs modèles d'accidents.

4.3.3. Double-collaboration : l'émergence d'une troisième voie ?

L'accident est un phénomène dont la complexité, aujourd'hui largement reconnue, requiert une approche pluridisciplinaire. Notre réflexion s'inspire de l'étude du SCM (2.2), elle propose l'ébauche d'un cadre de collaboration entre les différentes compréhensions de l'accident (souvent liées aux rattachements disciplinaires des auteurs) et les différents acteurs des safety science (chercheurs, professionnels, régulateurs, etc.). Cette volonté de faire converger les efforts des deux écoles, sur le terrain du développement de nouveaux modèles apparaît d'autant plus intéressante que « *certains modèles, ou encore une série de modèles, peuvent cacher et perpétuer des erreurs ou des inexactitudes fondamentales, ce qui retarde le développement des connaissances. Ce n'est qu'en confrontant ces modèles à des observations systématiques et à des modèles concurrents qu'on arrive à déceler ces erreurs »* (Willett, *op. cit.*).

Peut-on concevoir l'intégration entre « anciens » et « nouveaux » modèles ?

A travers notre étude des modèles de Reason et la conception d'un dispositif d'analyse des FOH dans les EDD, nous avons évoqué différents critères d'efficacité des modèles d'accident. Nous pouvons, à un premier stade, considérer qu'un modèle d'accident doit permettre de guider les pratiques et les représentations. Pour cela, le modèle doit intégrer des connaissances et des pratiques établies, informer les représentations et répondre aux attentes et besoins des utilisateurs. Lorsque ces conditions sont réunies, le modèle fait sens (Weick & Ashford, 2001) et peut produire des effets, notamment en modifiant les pratiques.

Si les tentatives d'évolutions conceptuelles, soutenues par l'école 1, ne semblent pas être suivies d'effet, c'est que des modèles, comme FRAM ou STAMP (4.3.1), peinent à s'imposer dans les pratiques, en ne remplissant pas l'ensemble des critères évoqués ci-dessus (Underwood, 2013). La convergence de ces « nouveaux modèles » avec le SCM « classique » permettrait de faire progresser la communauté des praticiens vers une approche systémique et dynamique des accidents.

> « *Two most dominant* [models] *are the person and the system. Each has its own theory* […] *over recent years, the system model has gained increasing ascendancy.* […] *My thesis is that the extremes of both views have their shortcomings. We need to strike a balance between the two.* » (Reason, 2008, p. 5 ; nous soulignons).

Il existe, dans ce sens, des tentatives (encore isolées) de concilier les apports des « classiques » avec les connaissances plus récentes sur l'accident, issues de la sociologie, des sciences politiques et du

[306] Par exemple, ces propos sans équivoque de Nancy Leveson : « *the Reason Swiss cheese is no longer adapted to anticipate today's accidents. »* (Leveson, 2004).

courant systémique. Le Coze (2013a) propose deux modèles qui intègrent les avancées, dans le champ de safety sciences, des domaines managériaux, sociaux, politiques mais aussi philosophiques et épistémologiques. Le premier est appelé Systemic and Dynamic Sensitising Model of Safety (SDSMS), il a été conçu pour être un modèle de sensibilisation sur les aspects dynamiques et systémiques de la gestion de la sécurité. Pour être cohérent avec les pratiques et les usages industriels, le modèle introduit les principes des Systèmes de Management de la Sécurité (SMS). Les SMS renvoient également au concept cybernétique de contrôle ce qui confère au modèle un caractère normatif. Les dimensions sociologiques et politiques reposent, elles, sur la distinction entre les différents niveaux micro-, méso- et macroscopiques ; ils confèrent l'aspect descriptif au modèle.

> « *This model is designed as a tool for sensitising situations in order to identify relevant areas of investigation about the ongoing transformations, their impact on safety and the ability of the system to control these impacts. It is derived from a combination of a managerial model and a sociological/political one. It targets the interplay between technological design and tasks, the structural and functional features of organisations, but also the cognitive, cultural and power issues at several nested layers of analysis*. » (Le Coze, 2013a ; p. 213).

Le second modèle s'inspire des travaux de modélisation de Rasmussen (1997) de la gestion de la sécurité dans un système sociotechnique. L'approche Socio-Technical System est étendue pour devenir un modèle constructiviste[307] appelé Socio-Natural-Technical System (SNTS). Ainsi, le SNTS n'admet pas de lecture hiérarchique (contrairement aux travaux de Rasmussen, 1997), intègre des boucles de rétroactions (auto-organisation, causalité circulaire) et surtout, dénonçant le dualisme objet/sujet, le modèle intègre les scientifiques, chercheurs, observateurs, au sein du système. Ainsi, il n'y a plus d'intérieur et d'extérieur (neutre).

En combinant ces deux modèles, l'un montrant le caractère dynamique et systémique de la gestion de la sécurité, l'autre proposant de remettre en cause deux dualismes « classiques », Le Coze prône l'interdisciplinarité et la coopération :

> « *This set of two models also advocates the necessity to approach safety (and accidents) from an interdisciplinary point of view. Given the complexities highlighted in the SDSMS and in the SNTS, only a research strategy built on multi- and inter-disciplinary cooperation can move beyond our current understanding of safety (and accidents), something that is linked to the need for a reflexivity on the part of scientists on this matter*. » (Le Coze, 2013a ; p. 216).

Les deux modèles de Le Coze s'inspirent, notamment sur le plan de la représentation graphique, des travaux de Rasmussen et proposent une forme de cartographie générale de la gestion de la sécurité, convoquant différentes disciplines, rôles, fonctions à différentes échelles.

Cette approche originale permet de penser les théories et modèles SAA comme des leviers pédagogiques. La démarche ne consiste plus à exploiter leurs modèles de façon opérationnelle, concrète, pour analyser ou prévenir des accidents mais à les exploiter de façon indirecte pour modifier des pratiques qui continueraient de reposer sur les outils et méthodes « classiques »[308]. L'objectif devient donc de faire évoluer les usages, via les représentations. Cet objectif, s'il pouvait

[307] Le Coze (2013) convoque Morin, pour son approche de la complexité et Latour, pour ses travaux sur les réseaux. Il qualifie son modèle de constructiviste puisqu'il renonce aux deux dualismes classiques nature/culture et objet/sujet.

[308] Qu'elles soient issues de la sûreté de fonctionnement ou de la théorie de l'accident organisationnel.

être atteint, nécessiterait toutefois que les méthodes et outils « en place » soient également modifiés.

Depuis une vingtaine d'années[309], différentes méthodes ont été développées pour modifier les usages liés à la théorie de l'accident organisationnel. Nous avons présenté en détail certains de ces travaux dont certains provenant d'institutions comme EUROCONTROL ou l'ATSB[310] ont également modifié les éléments de langage de leurs outils basés sur le SCM afin d'éviter que l'analyse ne se focalise sur les gestes et les comportements de l'opérateur, l'un des aspects important des SAA. En appliquant la stratégie « pédagogique » des SAA, l'évolution des méthodes et outils pourrait progressivement intégrer des « modules » relevant explicitement des théories systémiques. Nous avons identifié deux contributions originales qui pourraient initier cette nouvelle aire d'évolution.

La première est l'initiative de Goh *et al*. (2012) qui illustre comment les méthodes existantes (« classiques » et « modernes ») pourraient s'agréger. Les auteurs proposent d'associer des théories systémiques (*system dynamics, loop diagram*) au cadre conceptuel de l'accident organisationnel pour créer un modèle (le *Causal Loop Model*). Ce modèle permet d'étudier les relations entre les objectifs de production et de protection, en approfondissant la théorie de l'accident organisationnel : « *the causal loop model* […] *is developed to explain Reason's (1997) empirical observation of how organizational accidents develop* » (*op. cit.*). Le constat et la volonté de ces travaux sont donc moins généraux que dans les mouvements anti-dualistes de Le Coze. Il s'agit, comme nous l'avons suggéré suite à notre relecture des travaux de Reason (2.2), de considérer qu'ils ouvrent le champ de l'accident à des dimensions organisationnelles, dynamiques, complexes, bien qu'ils ne fournissent explicitement d'outils d'analyse systémique.

> « *Production pressure is often cited as an underlying contributory factor of organizational accidents. The relationship, however, between production and safety protection is complex and has not been adequately addressed by current theories regarding organizational accident. In addressing this gap, this paper uses the methodology of system dynamics to develop a causal model to address the dynamic interaction between management of production and protection, which can accumulate in an organizational accident*. » (Goh *et al.,* 2012).

La seconde découle des travaux de Harris et Li (2011) et consiste en la combinaison « directe » de deux modèles piliers : le SCM et STAMP. Ces travaux illustrent parfaitement la notion de « modules systémiques » qui pourraient être ajoutés, progressivement, aux méthodes dérivées du SCM. Les auteurs proposent d'augmenter la méthode HFACS à l'aide de la taxinomie de défaillance des structures contrôles (*flawed controls taxonomy*) issue de STAMP. Ainsi, les travaux associés au développement de STAMP (notamment le concept de contrôle, issu de la systémique) sont exploités pour fournir un modèle du mécanisme, via lequel les défaillances actives se propagent dans les organisations, ce qui comble l'une des limites identifiées de la méthode HFACS. La méthodologie qui émerge est alors qualifiée de « *HFACS-STAMP revised methodology* ».

L'émergence d'une « école 3 » ?

Les tentatives de faire converger les apports des théories et modèles récents avec les pratiques et la compréhension de l'accident portée par les théories et modèles considérés classiques, pourraient

[309] La publication fondatrice de la méthode Tripod DELTA date de 1994 (Hudson *et al*., 1994).
[310] Australian Transport Safety Bureau.

esquisser l'émergence d'une troisième voie dans le paysage bipolaire que nous avons décrit dans la partie précédente (4.3.2). Cette « école 3 » pourrait être qualifiée d'« anti-dualiste »[311] ou, de façon positive, « d'école de la convergence ». Pour soutenir l'idée de l'émergence d'un courant de pensée « nouveau », on peut mettre en avant des paramètres contextuels favorables. Il faut d'abord une certaine maturité des théories mobilisées dans un champ disciplinaire, cette maturité résulte d'un processus long d'emprunts, de remobilisation, d'adaptations de concepts entre différents champs et par l'obtention et l'analyse, continue, de nouvelles données empiriques. Ainsi, Le Coze note :

> « [A] *certain number of terms have appeared over the years in many writings in different scientific areas both inside and outside the field of safety. These include complexity, emergence, non-linear (or circular, but also self-organising) causality, networks, uncertainty, unpredictability or constructivism.* […] *The presence of these alternative words is related to an important, multifaceted intellectual movement*. » (Le Coze, 2013a)

Ce premier constat permet également d'expliquer que si les modèles « classiques », comme le SCM, permettent effectivement une approche systémique, ils sont largement perfectibles au regard de leurs capacités à transmettre des fondements théoriques systémiques (rétroactions, contrôle) et des modalités d'analyse de la structure organisationnelle des systèmes sociotechniques. « *It must be (partly) associated with the limited availability of models in the field of safety on the topic of safety and organisations at that time (at the end of the 1980s).* » (Le Coze, 2013a).

Dès lors, la convergence doit chercher à orienter les usages et les pratiques, en constatant que « *the SCM remains a viable model for accident analysis* […] *in the cases where practitioners correctly apply [it].* » (Underwood, 2013, p. 198). L'on pourrait alors considérer comme définition des ambitions et de l'orientation de l'école 3, la façon dont Le Coze explicite sa démarche anti-dualiste :

> « *Instead of promoting new models with the idea that they replace old ones, the argument is based on a pluralistic epistemology, where diversity has its virtue. In other words, to cope with complexity, increasing our ability to see with different lenses clearly justifies the need to elaborate alternative models to those that currently exist. They do not entirely replace them, they help to sensitise phenomena differently, to open up new interpretations but also help to guide more precisely, or more analytically, than was previously the case, where and what to look at*. » (Le Coze, 2013a).

Les axes de recherche et de développement offerts par l'école 3, en matière de modèles d'accidents, pourraient donc être résumés en deux points :

- Concevoir des *modèles* de sensibilisation, de communication, des cadres pédagogiques. Ces modèles doivent avoir comme objectif de faciliter la percolation des fondements théoriques systémiques. Ils peuvent également servir de cartes heuristiques ou de cadres génériques pour les analyses mais ne visent pas explicitement l'action (au sens de la méthode ou de l'outil).
- Concevoir des *méthodes* hybrides, qui associent les modèles existants ainsi que des outils associés à ces nouvelles méthodes. Ces méthodes doivent avoir comme objectif de faire évoluer « concrètement » les pratiques, elles devront certainement s'appuyer sur les métaphores ou les analogies dominantes dans les usages pour assurer leur capacité d'appropriation.

[311] En référence à la proposition de Le Coze (2013) de réaliser un « *mouvement anti-dualiste* ».

Ces deux premiers axes peuvent être le fait de travaux théoriques, conceptuels, conduits par des chercheurs isolés. Les produits que nous avons présentés (SDSMS et SNTS, Le Coze, 2013a ; Causal Loop Model, Goh *et al.,* 2012 ; HFACS-STAMP revised methodology, Harris & Li, 2011) ont été imaginés, éprouvés, étalonnés sur la base de rapports d'analyse d'accidents publiés (Goh *et al.* exploitent un accident minier, Harris & Li un accident aérien) ou d'études bibliographiques approfondies et de l'expérience industrielle de l'auteur (Le Coze). Les trois publications proposent des modèles accompagnés de conseils d'utilisation, de questions qu'il reste à adresser, de projet (et d'invitations) de recherches futures. Cependant, lorsque l'on considère le deuxième objectif de développement de l'école 3, une marche est encore à franchir. En effet, ces travaux doivent maintenant percoler entre différentes institutions, différents acteurs, avant de produire des effets tangibles sur les pratiques. On peut alors supposer (1) que la greffe est stérile, ce qui reviendrait à conclure que l'école 3 est une chimère, (2) que les éléments de contexte ne sont pas tous réunis pour garantir la réussite de ces entreprises, ou (3) que ces premières tentatives de convergences peuvent (et doivent) encore progresser dans l'efficience et le pragmatisme de leurs productions.

(1) Les méthodes, ou modèles, adaptés du SCM (HFACS, ATSB, SOAM, Tripod, etc.) sont reconnus utiles pour leurs portées métaphoriques, heuristiques et leurs forces en matière de communication. Ces méthodes utilisent des données d'entrées, généralement accessibles, produites par les audits de sécurité ou les rapports d'accidents ; elles sont relativement simples à mettre en œuvre et bénéficient d'un fort ancrage dans les pratiques. Si ces méthodes permettent d'identifier des défaillances dans de nombreux niveaux de l'organisation elles demeurent limitées dans leurs capacités à guider les utilisateurs au sujet des phénomènes émergents, circulaires et dynamiques. Ce qui peut s'exprimer ainsi, dans les termes de la métaphore du fromage Suisse, « *the holes are visible, but the process by which they are created is not addressed*. » (Arnold, 2009). Les SAA pallient cette limite, par exemple, STAMP propose de guider les utilisateurs dans l'analyse étendue de la structure de contrôle du système (des niveaux opérationnels « bas », aux niveaux politiques « hauts »). Toutefois, une telle analyse peut conduire à des recommandations apragmatiques car les actions qui entendent agir sur les niveaux les plus éloignés de l'évènement sont souvent délicates et coûteuses à mettre en œuvre (Reason, 2008). La stratégie de convergence apparaît donc justifiée.

(2) En matière de contexte, Arnold (2009) note que les accidents éparses ne génèrent pas une contrainte suffisante pour faire accepter les recommandations de portée systémique, c'est-à-dire, orientée vers les structures organisationnelles, les problématiques de contrôle, de gouvernance ou de régulation. Cette remarque contribue à expliquer les difficultés que rencontrent les modèles SAA à être adoptés dans les pratiques. Elle dépasse la question des « moyens » (formalismes, coûts de mise en œuvre ou puissances heuristiques) des modèles SAA pour s'intéresser aux « besoins » (à travers, ici, le contexte sociopolitique). Ce contexte, transcendant les écoles de pensée, présentait donc également un risque d'échec de la stratégie de l'école 3. En effet, chercher à produire de nouveaux « moyens » de faire progresser les analyses d'accidents serait vain face à l'absence de besoins exprimés.

> « *Compelling evidence is necessary to obtain the political traction to implement high end recommendations. Single incidents do not normally generate enough political will to probe into the higher levels of a system's control structure, which is necessary to make a credible STAMP analysis, but when low level countermeasures have proved ineffective, where clusters of incidents indicate deeper systemic problems, or after accidents, then a STAMP analysis would provide a powerful additional perspective.* » (Arnold, 2009).

On peut également mentionner, de façon microscopique cette fois, le rôle des évolutions réglementaires liées à la sécurité des ouvrages hydrauliques et les effets de nouvelles injonctions sur la mobilisation de la DPIH pour le renforcement de la place des FOH dans les analyses de risques. Dans un champ beaucoup plus réduit, les travaux présentés dans cette thèse illustrent donc l'influence du contexte, de l'adéquation entre les besoins et les moyens, sur l'évolution des pratiques opérationnelles.

Nous ne suggérons pas de position définitive sur le caractère favorable du contexte pour l'émergence de l'école 3 et la réussite de ses initiatives. Ce serait une entreprise, sinon ambitieuse, prétentieuse : il est plus aisé, voire uniquement possible, de juger de tels éléments *a posteriori*. Toutefois, le début du XXI^{ème} siècle a été marqué par une série d'accidents industriels de grande ampleur, dans différents domaines, qui évoquent la *safety culture decade* (Figure 71) dont nous avons discuté les effets (propices) sur le développement de modèles, aujourd'hui considérés « classiques ».

Table 1
A 'déjà vu' feeling 20/30 years apart.

High-risk industries	Period	
	1970s–1980s	2000–2010
Nuclear	Chernobyl, 1986	Fukushima, 2011
Offshore drilling	Piper Alpha, 1988	Deepwater Horizon, 2010
Fuel storage	Port Edouard Heriot, 1987	Buncefield, 2005
Aerospace	Challenger, 1986	Columbia, 2003
Aviation	Tenerife, 1977	Rio Paris, 2009
Chemical – petrochemical	Flixborough, 1976, Bhopal, 1984	Toulouse, 2001, Texas City, 2005
Railway	Clapham Junction, 1987	Ladbroke grove, 1999
Maritime I	Zeebrugge, 1987	Costa Concordia, 2012
Maritime II	Exxon Valdez, 1987	Erika, 2003
Air Traffic Management	Zagreb, 1976	Umberlingen, 2002

Figure 71 : 'déjà vu' analogie entre la safety decade et une suite d'accidents, survenus dans divers domaines, depuis le début des années 2000 (Le Coze, 2013a).

Cela vient s'ajouter au degré de « maturité théorique » du des safety sciences que nous avons déjà évoqué. Il nous apparaît donc que le contexte semble favorable au développement de modèles, issus de l'école 3, à différents égards :

- Maturité théorique du champ disciplinaire,
- Opposition de deux écoles de pensée,
- Demande sociale et politique liée à un contexte de sinistralité élevé.

(3) Il nous reste donc, pour expliquer que les premiers les travaux d'une *école de la convergence* n'ont pas encore produit d'effets dans les pratiques opérationnelles, l'hypothèse que les produits de ces travaux (leurs modèles, leurs méthodes) doivent encore gagner en efficience.

Synthèse : l'idée de « double collaboration »

Notre discussion sur les classifications de modèles d'accidents nous a conduits à identifier un débat de fond, dans la communauté des safety sciences, sur le statut du SCM. Il est également apparu qu'un volet de ce débat comprenait la comparaison entre le SCM, considéré comme « le modèle classique » et des modèles systémiques, regroupés sous l'appellation SAA. Après avoir présenté deux principaux modèles SAA (STAMP et FRAM), nous avons proposé une grille de lecture duale du débat académique. Deux écoles de pensée de l'accident semblent avoir émergé, la première soutenant que la complexité (ontologique) des systèmes sociotechniques implique l'obsolescence « programmée » des modèles d'accidents ; la seconde que la complexité des systèmes sociotechniques est une

question épistémologique, que les « nouveaux modèles » sont peu utiles, car éloignés des pratiques et qu'il convient donc de faire évoluer les outils les plus utilisés.

Nous avons, avec d'autres (e.g. Le Coze), postulé la possibilité d'existence d'une troisième voie, qui serait à même de répondre aux critiques que s'adressent réciproquement ces deux écoles. Cette troisième voie relève d'une approche constructiviste des safety sciences (Le Coze, 2011 ; Blazsin, 2014) et d'orientations interdisciplinaires. Nous l'avons qualifiée d'école de la convergence. Dans le cas des modèles d'accidents, certains travaux semblent ainsi initier des rapprochements entre les méthodes et outils dérivés du SCM et les théories ou modèles dérivés des travaux SAA. Ces initiatives sont récentes (2011, 2012, 2013) et doivent encore achever un processus de diffusion dans les structures académiques, mais surtout industrielles, pour produire des effets sur les usages.

Nous proposons de clore cette discussion par un retour aux facteurs clefs de succès du SCM que nous avons identifiés. En effet, nous pensons qu'une collaboration similaire à celle que nous avons caractérisée, à savoir (1) entre sciences de l'ingénieur et sciences humaines, (2) recherche et industrie et (3) inscrite dans la durée, pourrait renforcer l'intérêt des modèles, méthodes ou outils produits par l'école de la convergence.

L'étude des déterminants du succès du SCM revêt un intérêt contemporain. Certains critères d'accession du SCM à son statut de sur-modèle (4.2.1 ; Rey, 2010) semblent déjà réunis :

- Sinistralité forte dans différents secteurs d'activité, croissance de l'attente sociale et politique en matière de sécurité,
- Remise en cause des modèles dominants par la communauté de recherche, mobilisation de différents acteurs constitués en école de pensée (période de révolution scientifique).

Mais, au-delà de ces facteurs de contexte, nous avançons que c'est par un jeu complexe de collaborations, d'emprunts et d'analogies qu'est née la « force » du SCM. Nous avons notamment insisté sur les interactions entre James Reason et John Wreathall qui incarnent la rencontre directe[312] : (1) de la recherche théorique et de la pratique opérationnelle et (2) de la collaboration entre des disciplines aussi différentes que les sciences humaines et les sciences de l'ingénieur.

Il reste à déterminer des modalités pratiques, concrètes, pour initier et multiplier des processus de double-collaboration. Dans quels cadres humains, institutionnels, contractuels, juridiques, culturels, épistémologiques, (etc.) peuvent s'inscrire de tels processus (Bourezak, 2002) ? L'école 3, peut et doit, inventer ses modalités de travail avec l'audace de les inscrire à la hauteur de ses ambitions.

[312] Entre deux acteurs humains et non entre des institutions ou des structures.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette thèse a été structurée afin de présenter deux travaux de natures différentes, articulés autour des modèles d'erreur humaine et des modèles d'accidents.

- La démarche de conception, d'expérimentation et de déploiement d'un dispositif dédié à l'analyse des Facteurs Organisationnels et Humains (FOH), répondant à une demande industrielle
- L'étude qualitative, approfondie, des modèles d'erreur humaine et d'accidents organisationnels de James Reason.

Ces deux « chantiers » de recherche ont été entrepris simultanément, ou presque, dès le début de ces travaux (matérialisé par la signature d'un contrat de recherche entre le Centre de recherche sur les Risques et les Crises, CRC, et le Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF, CIH).

Le besoin de recherche et développement en matière de modèle FOH, relève pour le CIH d'EDF de la conjonction entre une volonté de la direction de développer, dans les collectifs opérationnels, une culture de sécurité et l'injonction, portée par un cadre juridique et des structures de contrôle, de produire des EDD de barrages dont les analyses de risques intègrent l'évaluation des gestes d'exploitation. Nous avons donc entrepris l'étude technique, fonctionnelle et organisationnelle des barrages hydroélectriques et enclenché une démarche de recherche et de développement d'un modèle dédié aux ouvrages d'EDF. La relecture des travaux de Reason relève d'un double constat. D'une part, les modèles d'accidents organisationnels, notamment le *Swiss Cheese Model* (SCM), sont considérés comme les plus influents sur les pratiques de gestion de la sécurité mais la littérature francophone apparaît très limitée au sujet de ces travaux. D'autre part, il existe un débat académique sur la validité de la théorie de l'accident de Reason, le caractère contemporain du SCM et le bienfondé de ses effets pratiques. Ce double constat nous a conduits à un « retour aux sources » par l'étude approfondie des travaux de Reason visant à nous éloigner, un temps, du débat académique et opérationnel, pour espérer y apporter un éclairage nouveau.

Rapidement, nous avons fait dialoguer nos deux démarches : l'action de conception s'appuyant souvent sur l'analyse des travaux de Reason et cette analyse, exploitant les questionnements émergeant de l'action comme des « guides » de lecture. Le défi dans la construction de notre plan a donc consisté à rendre compte, au mieux, du caractère itératif et interactif de notre recherche pluridisciplinaire et ouverte. Celle-là convoque, aussi bien, des concepts, des théories ou des modèles issus de l'ingénierie, de la psychologique cognitive, des sciences de gestion mais qui espère aussi soulever des questions de natures sociologiques, épistémologiques et ontologiques.

Le fil conducteur de ces travaux est tissé autour de « la question des modèles ». Ces objets de la connaissance, communs dans les pratiques académiques et industrielles, soulèvent pourtant de nombreuses questions, très contemporaines, qui renvoient à des disciplines aussi variées que l'épistémologie (Le Moigne, 1987), l'histoire des sciences (Varenne, 2008), la sociologie (Rey, 2010), la science des systèmes (Walliser, 1977) ou encore, la philosophie (Badiou, 2007). Dans le champ,

très vaste, des safety sciences, les modèles sont largement exploités pour des usages variés comme l'analyse d'accidents, les démarches de prévention ou encore la communication et le développement de concepts ou de pratiques. Le cadre particulier de notre recherche partenariale (contrat CIFRE) nous a conduits à formuler simultanément un axe de travail et une question de recherche :

- Concevoir, expérimenter et déployer une solution d'analyse des FOH dans les EDD d'EDF, qui reposerait sur un modèle original de l'exploitation d'un barrage hydroélectrique. Ce travail devant contribuer à répondre à la question suivante :
- Quel est le rôle, la valeur et la place des modèles d'erreur humaine dans la gestion de la sécurité industrielle ?

Nous avons donc mis en place un processus de conception d'un dispositif d'Evaluation et de Cotation des dimensions Humaines et Organisationnelles (ECHO) que l'on peut caractériser de démarche d'ingénierie (Koen, 1985) relevant d'une organisation *adhocratique* (Mintzberg, 1982). En parallèle de cette réponse pragmatique au besoin industriel, nous avons entrepris l'analyse compréhensive et interprétative de l'important corpus de publications de James Reason (N = 136, Larouzée & Guarnieri, 2015a) que nous avons complété par les publications d'autres auteurs, portant sur le SCM ou ses dérivés. Dans cette étude bibliographique, nous avons cherché à situer épistémologiquement un auteur, à historiciser ses travaux pour finalement déterminer leur caractère contemporain. Nous avons enfin fait converger les enseignements de ces deux axes de travail pour discuter (1) du rôle des modèles dans les organisations et (2) dégager des perspectives de développement des modèles de gestion de la sécurité à venir.

Apports des différents chapitres

Cette thèse présente quatre chapitres qui permettent de présenter (1) le contexte industriel de nos travaux, (2) le cadre académique des travaux sur les modèles d'erreur et d'accident ainsi que les apports de notre relecture des travaux de Reason, (3) la démarche de conception, d'expérimentation et de déploiement d'ECHO dans les EDD de barrages d'EDF et enfin, (4) de discuter des perspectives ouvertes par nos travaux, sur le plan industriel d'abord, et dans le cadre du débat académique sur les modèles d'accidents, ensuite. Nous pouvons retenir de ces quatre chapitres, le cheminement intellectuel et les apports suivants :

Premier chapitre : terrain industriel et « état de la question »

Dans le premier chapitre, nous avons défini et décrit les objets « barrages » qui incarnent différentes réponses *techniques* à un besoin universel de l'Homme : exploiter l'eau (1.1). L'un des usages, la production d'hydroélectricité, implique différentes composantes techniques, humaines et organisationnelles qui sont articulées et contrôlées pour atteindre des objectifs. Les barrages constituent donc des systèmes sociotechniques (Perrow, 1984) qui poursuivent simultanément des objectifs : de production (d'électricité) et de protection (des personnes, des biens et de l'environnement). La dérégulation de l'équilibre entre ces objectifs peut conduire à des évènements catastrophiques de grande ampleur (Semenza, 2002 ; Duffaut, 2009). L'étude de ces catastrophes et du retour d'expérience industriel sur les évènements indésirables (incidents, presque accidents) laisse entrevoir qu'en plus des composantes techniques, largement étudiées et discutées par la communauté professionnelle, des mécanismes peu étudiés, liés aux hommes et aux organisations,

sont en jeu dans la (dé)maîtrise du niveau de sécurité des installations hydrauliques (Larouzée *et al.,* 2014a).

En France, les barrages font l'objet de dispositions juridiques, réglementaires et administratives via lesquels l'Etat assure son rôle de contrôle et d'autorisation des ICPE. L'un des vecteurs de cette relation de contrôle est l'EDD, une approche pluridisciplinaire de la sécurité qui impose aux exploitants de justifier du niveau de maîtrise des risques de leurs ouvrages, notamment via l'étude des FOH (1.2). Dans un contexte de renforcement de la culture de sûreté hydraulique et face au très faible état de l'art (1.3), spécifique aux barrages, en matière de FOH, la mise en place des EDD (MEEDDAT, 2008) a catalysé le besoin pour le CIH d'EDF de développer une solution d'étude et de cotation des FOH. Les premières approches (2008 – 2012) de « *l'erreur humaine* » dans les analyses de risques des EDD, très basiques, ont révélé ce que l'on pourrait qualifier de « *crise des représentations* » (Dekker, 2007) qui a conduit à formaliser le besoin d'un travail collaboratif, entre recherche (CRC) et industrie (CIH), visant à améliorer la qualité de la prise en compte des FOH dans les EDD et à initier un changement de « *vision* » sur ces facteurs « non-techniques ».

Ce premier chapitre a donc permis de présenter le terrain industriel et l'état de la question. Les barrages sont des systèmes sociotechniques centraux dans nos sociétés (irrigation, production d'électricité) mais qui présentent des risques majeurs. Les évolutions du cadre de gestion de la sécurité de ces ouvrages, notamment le cadre réglementaire et le très faible état de l'art spécialisé ont conduit EDF à exprimer un besoin de développement et de déploiement d'un dispositif FOH. Le second chapitre s'intéresse aux travaux sur l'erreur humaine et les accidents organisationnels de James Reason, dont l'étude a été la base théorique de notre démarche d'ingénierie.

Deuxième chapitre : modèles en gestion de la sécurité, le cas des travaux de Reason

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une étude des travaux sur l'erreur et les accidents de James Reason. Cet auteur a notamment publié le SCM, l'un des modèles d'accidents les plus cités et utilisés depuis la fin du XX^{ème} siècle (Salmon *et al.*, 2012). Dans un premier temps, nous avons très brièvement proposé une perspective historique sur le développement des courants théoriques liés à la gestion de la sécurité (2.1). Cette présentation permet de situer James Reason au sein d'une communauté de recherche sur l'accident qui s'est montrée particulièrement active et productrice de modèles depuis les années 1980.

Si les travaux de Reason ont été popularisés par le SCM, notre étude approfondie de son parcours de recherche (2.2) met en lumière l'existence de nombreux modèles ayant accompagné le développement d'une réelle théorie de l'accident, que Reason qualifie de « *théorie de l'accident organisationnel* » (Reason, 1990b). Cette théorie repose sur une métaphore médicale : celle des agents pathogènes qui, par la combinaison complexe de phénomènes latents et patents, peuvent mettre en défaut les défenses du système (immunitaire) et lui porter atteinte. Par analogie, la théorie de l'accident organisationnel suggère que des défaillances, à différents niveaux d'une organisation peuvent créer les conditions nécessaires à ce qu'une « défaillance active » (comme une erreur ou le non-respect d'une procédure) déclenche un accident. Avec le SCM, Reason publie un modèle très simple pour véhiculer une notion complexe : les défenses d'un système (sociotechnique, cette fois) sont représentées par des tranches de fromage parallèles ; les défaillances (latentes ou patentes) dans ces défenses sont représentées par des trous. Quand les « trous » dans les tranches s'alignent, une « trajectoire accidentelle » peut alors traverser les défenses, l'accident

organisationnel se produit (Reason, 2008). Malgré le retentissant succès du SCM, tant dans la recherche que les pratiques en gestion de la sécurité, les travaux de Reason sont critiqués (2.3). Certains chercheurs (Hollnagel, 2004 ; Leveson, 2012), considèrent en effet que le SCM soutient une causalité linéaire, réductrice et obsolète des accidents. Selon ces auteurs, les pratiques devraient se tourner vers des modèles d'analyse systémique des accidents (SAA), seuls à même de rendre compte de la complexité de ce phénomène dynamique et émergent. Nous avons discuté les différentes critiques publiées à l'égard du SCM ou, plus globalement, de la théorie de l'accident organisationnel, à la lumière de notre étude bibliographique. Nous défendons sur le plan théorique et conceptuel que les modèles d'accidents organisationnels suggèrent une approche systémique de ces phénomènes[313] bien que la force heuristique du SCM desserve son utilité pratique. L'on pourrait émettre l'hypothèse que Reason *et al.* (2006) n'ont probablement pas été « suffisamment entendus », lorsqu'ils rappellent que le SCM n'a jamais été destiné à guider des usages, mais plutôt à sensibiliser, communiquer ou éduquer. Pour guider les pratiques en accord avec la théorie de l'accident organisationnel, pléthore de méthodes et d'outils ont été produits et destinés à des secteurs ou des besoins spécifiques (Larouzee, *et al.,* 2014b).

A ce stade, on peut noter que l'étude du SCM, qui visait initialement à discuter de son caractère contemporain, dépasse cet objectif et attire notre attention sur l'interaction complexe entre recherche et industrie, modèles et pratiques, théories et représentations. Par exemple, considérer qu'un chercheur puisse (ou ait à) « être (suffisamment) entendu », relève d'un postulat dualiste ou la science produirait des connaissances neutres et objectives, en « observant » un objet industriel avec lequel elle n'interagirait pas (en dehors du cadre contrôlé de l'expérience). En mettant en cause ce dualisme sujet/objet ; science/industrie, en adoptant une posture constructiviste, on peut exprimer un phénomène de construction des usages mais aussi des modèles qui se déroulent dans une matrice où science et industrie se mêlent. Cette posture[314] a accompagné et stimulé le processus de développement d'ECHO, pourtant porté par une volonté pragmatique et opérationnelle forte, qui fait l'objet du troisième chapitre.

Troisième chapitre : analyse FOH dans l'EDD, démarche de conception d'ECHO

Le troisième chapitre présente le processus d'ingénierie *adhocratique* auquel nous avons recouru pour répondre à la commande industrielle. Pour exploiter pleinement les opportunités offertes par la collaboration entre recherche et industrie, une équipe de travail a été constituée pour faciliter les échanges ainsi que le suivi de l'avancement des travaux (3.1). Ce fonctionnement a permis la meilleure convergence possible entre l'impératif de percolation des connaissances académiques chez les différentes parties-prenantes et le respect des contraintes opérationnelles fortes. Le cahier des charges de notre démarche prévoyait ainsi notamment que l'étude des FOH dans les EDD devait pouvoir être réalisée par un groupe de travail pluridisciplinaire, sans compétence spécifique au sujet des FOH et dans un temps de travail en salle n'excédant pas deux heures. Un objectif plus général a été fixé à nos travaux, qui devaient contribuer à « *faire évoluer les représentations des facteurs*

[313] Ce faisant, nous complétons la démarche empirique d'Underwood et Waterson (2014) qui comparent, sur un cas d'accident de train, les résultats d'analyses produits respectivement par des méthodes SAA et le SCM ; « *The study suggests that the SCM remains a viable model for accident analysis and that SAA techniques represent an evolution, rather than a revolution, in the application of the systems thinking approach. Therefore, in the cases where practitioners correctly apply the SCM, the extent of the SAA* [research-practice gap] *may not be that significant*. » (Underwood, 2013, p. 198)

[314] Que nous avons progressivement adoptée au cours de l'étude étendue et détaillée des travaux de Reason.

organisationnels et humains pour en intégrer les fonctions de maitrise de la sûreté [hydraulique] » (note interne, 2013).

L'équipe de travail a conduit une étude comparative de différentes méthodes existantes avant d'entreprendre la production du dispositif ECHO qui articule (1) un modèle de l'exploitation d'un barrage d'EDF, (2) une méthode d'analyse des dimensions humaines et organisationnelles de la sécurité et (3) un outil d'aide à l'intégration de ces analyses dans les EDD (processus dit « de cotation »). La méthode a également pour objectif d'initier une évolution des représentations relatives aux FOH chez les acteurs des GT-EDD. La notion de facteur humain est empreinte d'une image globalement négative chez les différents contributeurs aux EDD ; à cette notion sont ainsi associés les concepts d'accident, d'erreur, d'imprudence, ou de non-respect des consignes. Pour atteindre cet objectif ambitieux, ECHO propose de déplacer le champ d'étude de « l'erreur individuelle » vers « les modalités de réalisation de l'activité attendue ». Ce faisant, le dispositif rend compte du fait qu'erreur et performance sont les deux faces d'une même pièce (Reason, 1990b). En s'inspirant du fonctionnement de la méthode CREAM (Hollnagel, 1998), nous conduisons les GT-EDD, à étudier une activité et son contexte de réalisation pour estimer les facteurs favorables ou défavorables à la réussite de l'activité considérée. Bien qu'il soit le fruit d'un développement rapide et se décline en outils très opérationnels, ECHO a été construit avec comme cadre de référence la théorie de l'accident organisationnel. La percolation parmi les différents membres de l'équipe de conception de cette théorie et les réflexions qui ont découlé de l'étude, présentée dans le deuxième chapitre, sur les (écarts entre les) usages possibles, souhaitables et effectifs du SCM nous ont permis, parfois très empiriquement, d'éviter un certain nombre d'écueils dans le développement d'outils de gestion parfois illusoirement normatifs (Beauvallet, 2009)[315].

Une première validation (3.2) a consisté à expérimenter ECHO à travers un « test utilisateurs », cette méthode, inspirée de l'ingénierie logicielle, nous a permis à la fois l'observation (contrôlée et par conséquent biaisée) de la méthode et l'échange sur sa mise en œuvre avec un échantillon de ses utilisateurs finaux. Après avoir apporté certaines améliorations identifiées lors du test, le dispositif ECHO a été déployé dans l'ensemble des GT-EDD réunis en 2015 (3.3). Des séances d'observations ont permis de documenter, en interne, les effets produits par ECHO sur les représentations et les usages relatifs aux FOH. Conformément au principe de l'écologie de l'action (Morin, 2001), les usages prévus, souhaités et constatés sont en écarts. Ainsi, malgré un niveau de guidage considéré « important », les utilisateurs font émerger des stratégies d'adaptation lors de l'usage opérationnel des outils. L'observation de ces écarts nous permet de discuter de voies d'amélioration d'ECHO, en termes d'ergonomie et de guidage notamment, qui pourraient être inscrits à l'agenda du projet-EDD dans les années à venir.

[315] Nous insistons, à ce stade, sur l'importance des regards croisés impliqués par notre recherche pluridisciplinaire : entre positivisme et constructivisme, solutions techniques et solutions pratiques, choix normatifs et choix empiriques. De tels regards ont été rendus possibles, voire nécessaires, par la situation particulière de « thèse en entreprise ». Le cadre de collaboration, inscrite dans la durée de la thèse, entre une structure industrielle et une structure de recherche, situe à la fois le chercheur dans un univers opérationnel et académique. En conséquence, le débat scientifique et les préoccupations opérationnelles se répondent autour des critères de « vérité » et d'« utilité » des modèles. Cette position « à la croisée des chemins » influence notre position sur le débat académique sur les modèles d'accidents, telle que nous l'avons développée dans le quatrième chapitre.

En conclusion de ces travaux, on peut affirmer qu'ECHO a d'ores et déjà produit des effets sur les rôles et responsabilités au sein des GT-EDD. Ainsi l'animation des séances a été renforcée, à travers l'outil et l'organisation du projet qui augmentent la légitimité d'acteurs identifiés (les Pilotes-EDD) de conduire les analyses FOH ; l'expression des personnels d'exploitation, contribuant aux GT-EDD, a également fait l'objet d'un renforcement conséquent et a été salué par toutes les parties-prenantes (internes à EDF). Le dispositif contribue ainsi à recueillir des éléments, potentiellement nouveaux, de « retours d'expériences » formels ou informels. En ce qui concerne l'organisation du processus EDD, la mise en place d'ECHO a modifié de façon conséquente les phases précédant l'analyse de risque en offrant à la « *prise en compte du facteur humain* » une emprise plus large (à savoir, lors de la collecte de documents et de la visite du site). D'autres modifications ont porté, de façon plus directe (et naturelle) sur les réunions d'analyses de risques avec l'intégration de la méthode et de l'outil ECHO dans les GT-EDD. Naturellement, des voies d'amélioration (des aspects théoriques et/ou pratiques) ont émergé des observations et des échanges avec les premiers utilisateurs. Ces perspectives sont discutées dans le chapitre quatre et complétées par une discussion, plus générale, sur le débat relatif aux modèles d'accidents dans la communauté des safety sciences.

Quatrième chapitre : discussion et perspectives

Le quatrième chapitre est consacré à la discussion des perspectives ouvertes par nos travaux (itératifs et interactifs) sur les modèles de Reason et la conception d'un dispositif FOH dédié aux EDD de barrages d'EDF. Nous évoquons d'abord les perspectives d'ECHO au sein de la Division Production et Ingénierie Hydraulique (DPIH)[316] d'EDF (4.1). Le modèle, la méthode et l'outil que nous avons conçus ont été pensés pour, sinon initier, du moins contribuer à l'évolution des représentations relatives aux FOH et notamment, à celles sur l'erreur humaine. Le processus « type » de changement de regard sur l'erreur humaine proposé par Dekker (2007) nous permet de prendre du recul sur les effets, ainsi que la zone d'influence, de nos travaux. Les principaux effets attendus sont observés lors du déploiement d'ECHO dans les GT-EDD : l'expression de l'exploitant est renforcée, l'étude des gestes d'exploitation interroge des dimensions organisationnelles et gagne ainsi en profondeur. Ces premières observations confirment le rôle que peuvent jouer les modèles et leurs outils associés dans les pratiques et les représentations. La zone d'influence de nos travaux, si elle recouvre une grande diversité de profils d'acteurs, reste cependant restreinte dans le volume de population concernée. Aussi, nous recommandons que les travaux initiés, pour le projet-EDD, avec le développement d'ECHO soient poursuivis (par d'autres moyens) au-delà de ce cadre. Nous avons identifié, durant ces trois années de recherche-action, au moins deux structures sur lesquelles une action, dérivée d'ECHO, pourrait augmenter sa zone d'influence : les analyses d'évènements (démarche de retour d'expérience qui pourrait bénéficier d'un outil de REX portant les concepts des FOH, Desmorat, 2012) et les collectifs d'exploitation. Dans le cas des collectifs d'exploitation, ECHO ne devrait plus être utilisé comme un dispositif performatif mais transformé en modèle pédagogique ; en effet, pour en assurer les effets, il faudrait envisager l'évolution des représentations sans l'intervention d'outils de gestion (Blazsin, 2014). Dans un second temps (4.2), nous revenons sur la question des modèles à un niveau plus général. Ayant constaté dans nos travaux de l'absence de consensus sur le statut du SCM, nous avons entrepris une revue de différentes approches de l'exercice de classification des modèles. Des approches intéressantes

[316] La DPIH est l'échelon structurel supérieur au CIH (voir 1.1.2, « *Acteurs politiques, économiques et techniques français et européens* »).

existent en histoire des sciences, en épistémologie ou en sociologie mais lorsque l'exercice de classification est entrepris dans le domaine des safety sciences, il semble se heurter à la grande diversité et mixité de celui-là. Malgré les caractères incomparables des classifications de modèles d'accidents existantes, un débat de fond apparaît autour de l'utilité et la valeur des modèles SAA ; une question récurrente est de chercher à attribuer, ou au contraire réfuter, le statut SAA au SCM. Nous avons donc (4.3) présenté les principaux fondements de l'approche SAA, qui convoque dans le domaine de gestion de la sécurité des concepts comme, la causalité circulaire, les structures de contrôles et cherchent à rendre compte de l'aspect dynamique et émergent de l'accident. Les auteurs des modèles SAA les plus populaires (STAMP et FRAM) tendent à considérer le SCM obsolète et de justifier cette position en affirmant que la complexité des systèmes sociotechniques a considérablement augmenté, depuis la conception du SCM et que, la nature des accidents a par conséquent également évolué.

Pour discuter du débat sur les modèles d'accidents, nous avons proposé la définition de deux « écoles de pensée » de l'accident qui auraient émergé, au début des années 2000, avec l'avènement des travaux sur les modèles SAA. Nous avons identifié ces écoles sur la base de deux représentations de la complexité des systèmes sociotechniques (Schapper *et al.,* 2005).

- La première école est celle de la complexité ontologique. Cette approche considère la complexité comme une propriété objective du système, par exemple son degré de technologie, le nombre de ses sous-systèmes, ou de paramètres nécessaires pour « décrire » l'organisation. Cette école considère ainsi que les modèles d'accidents sont « datés » car les théories qui les soutiennent sont construites pour des systèmes dont la complexité croit en accélérant (e.g. Hollnagel, 2004 ; Dekker, 2006, Leveson, 2012).
- La seconde école adopte une approche épistémologique de la complexité. C'est alors la façon d'accéder à la connaissance d'un système sociotechnique qui détermine celle-là. L'accident est bien conçu comme un phénomène complexe, toutefois l'évolution technologique des systèmes industriels ne modifie pas nécessairement la nature profonde de ce phénomène. Les théories sur l'accident et les modèles qui en découlent, à une époque donnée, quelle qu'elle soit, sont nécessairement partiels (Willett, 1996 ; Reason, 2008). Les « nouvelles théories » constituent donc des évolutions, plutôt que des révolutions, dans la manière d'analyser et de prévenir les accidents (Underwood, 2013).

Certains travaux récents (Harris & Li, 2011 ; Goh *et al.,* 2012 ; Le Coze, 2013) semblent s'affranchir de cette opposition en proposant des modèles originaux qui font converger les modèles « classiques » (dérivés du SCM) et les « modernes » (se revendiquant explicitement des approches systémiques). Cette troisième voie pourrait constituer une « école 3 » ou « école de la convergence ».

Considérations réflexives sur nos travaux

De manière réflexive, le débat entre l'école 1 et l'école 2 nous amène à soulever la question du caractère contemporain de la démarche FOH qui soutient ECHO. Dès le début de nos travaux, nous nous sommes inspirés (et revendiqués) de modèles ou de méthodes considérés « classiques », c'est à dire, découlant de la théorie de l'accident organisationnel. Les méthodes Tripod DELTA (Hudson *et al.,* 1994) et CREAM (Hollnagel, 1998), si elles reposent sur des modèles différents (respectivement le

SCM et COCOM)[317] ont des implications théoriques très similaires. Le choix de se référer à ces modèles « classiques », tel que nous l'avons explicité et défendu, relève en premier lieu des nécessités pragmatiques et opérationnelles imposées par une commande industrielle. Il témoigne d'une adhérence implicite à la critique, formulée par l'école 2 à l'égard des modèles SAA en raison de leur difficulté de mise en œuvre opérationnelle. En travaillant à l'adaptation des « modèles » classiques aux spécificités d'un système sociotechnique cible (3.1.1, « *spécificité des ouvrages hydrauliques* ») et aux contraintes opérationnelles d'un partenaire industriel (3.1.1, « *contraintes spécifiques à la rédaction des EDD* »), nous avons pu initier des évolutions des pratiques considérables si on les évalue en regard de la situation initiale. Cette expérience nous conduit à penser que le raisonnement sur la contemporanéité des modèles d'accidents ne peut être fondé que sur la scène scientifique, à un niveau d'abstraction qui implique de considérer les acteurs de la scène industrielle comme des « utilisateurs rationnels » (et simplistes) des productions académiques.

Dès lors, nous souhaitons nous interroger sur les liens entre recherche et industrie ; sciences humaines et sciences de l'ingénieur. Cette question a traversé nos deux démarches.

Tout d'abord, notre relecture des travaux sur l'accident organisationnel, a permis de documenter un premier « cas » de ce que nous qualifions de « double-collaboration ». En accord avec le paradigme indiciaire (Ginzburg, 1989), nous avons tenté de documenter les effets, sur les productions de Reason, de ses collaborations industrielles. Sa rencontre et ses différentes collaborations avec un ingénieur nucléaire (John Wreathall) s'avèrent avoir une importance considérable dans la création et le développement des modèles d'accidents organisationnels. On peut, par exemple, rappeler ici que l'ingénieur apporte, dès 1987, un modèle normatif d'organisation qui permet au psychologue de rendre opérationnel ses travaux de classification des erreurs (2.2.1). Wreathall est également à l'origine de la neutralisation de certains éléments de langage du modèle au cours des années 1990[318]. Nous avons rapidement formulé l'hypothèse selon laquelle, ce processus de double-collaboration, inscrit dans la durée, se trouvait être l'un des facteurs clefs de succès du SCM (Larouzee, & Guarnieri, 2015b).

La double-collaboration s'est également « imposée » à nous dans le cadre des travaux relatifs à ECHO. Tout au long des processus de conception et de déploiement, nous avons constaté les différences de visions mais surtout, la vertueuse complémentarité des secteurs d'activité (recherche, industrie) et des disciplines (sciences humaines, sciences de l'ingénieur). Certes, du point de vue purement intellectuel, les contraintes opérationnelles peuvent générer certaines frustrations et commander certains renoncements ; toutefois, composer avec ces contraintes, les considérer en tant que telles, pourrait conduire le chercheur à l'innovation. Ainsi, la recherche-action pour le développement d'ECHO, en acceptant certaines limites au champ théorique du « possible » et en adoptant une organisation *adhocratique* qui facilite les échanges a amené les parties prenantes industrielles à reformuler et affiner l'expression de leurs besoins et les parties prenantes académiques à considérer de nouvelles modalités d'utilisation des méthodes ou des outils.

[317] Voir 3.1.2.

[318] « Neutralisation » qui sera poursuivie par les travaux FHACS (Shappell & Wiegmann, 2000) puis par EUROCONTROL (2005) ou encore l'ATSB (2008) offrant ainsi au SCM la capacité d'exprimer au mieux son caractère systémique (Underwood, 2013).

En retenant comme définition générique de l'innovation la « *capacité à créer de la valeur en apportant quelque chose de nouveau dans le domaine considéré, tout en s'assurant que l'appropriation de cette nouveauté se fait de manière optimale* » (Groff, 2009) ; on peut dégager trois « *piliers* » de l'innovation, (1) la créativité, (2) la valeur (d'estime, d'usage, d'échange) et (3) la socialisation (*op. cit.*). A travers notre expérience nous constatons que la double-collaboration entre recherche et industrie ; sciences humaines et sciences de l'ingénieur[319], catalyse ces différents piliers. La créativité, tout d'abord, est rendue nécessaire par l'acceptation des contraintes opérationnelles qui ont empêché l'utilisation « clef en main » de modèle. La valeur d'usage des travaux est renforcée par les échanges, à différents niveaux de l'organisation, sur les besoins et les moyens des futurs utilisateurs. La socialisation (notion d'appropriation « optimale » de la nouveauté) apparaît, dans notre cas, comme la résultante des efforts investis autour des deux premiers piliers. Si nous avons maintenu une attention constante à ce que notre démarche soit porteuse de sens pour ses utilisateurs, cette attention s'est incarnée dans des ajustements empiriques et itératifs plus que dans une démarche structurée.

Structurellement et conceptuellement, notre démarche relève assurément d'une double-collaboration entre domaines (recherche, industrie) et disciplines (voir les disciplines mentionnées précédemment). Le caractère réflexif de l'analyse des effets de cette double-collaboration sur les parties prenantes admet naturellement des limites et des biais de subjectivité. Toutefois, les premières observations des effets produits tendent à confirmer l'efficience d'ECHO et le caractère optimal de son appropriation (quoi qu'il soit encore trop tôt pour être définitif et que les effets du principe d'écologie de l'action produisent des usages qui, puisqu'ils n'avaient pas été explicitement souhaités, devront être observés avec attention et peut-être accompagnés ou réorientés).

Le fil conducteur de cette recherche s'est tissé autour des modèles d'accidents. Placés au centre des réflexions et des démarches, modèles et les outils de gestion ou de communication qui en dérivent, ont bénéficié d'un « effet loupe », utile à l'analyse. En prenant du recul sur la « croisée des chemins » entre les sciences humaines et les sciences de l'ingénieur, des travaux récents proposent des alternatives originales à la rationalité des organisations qui tendent à imposer l'« outil » comme intermédiaire privilégié de collaboration. Ainsi, par exemple, Hortense Blazsin (2014) note que, face à la complexité de leurs environnements, les démarches de gestion de sécurité des organisations sont en tensions conceptuelles et pratiques. Elle convoque alors la philosophie pratique de Paul Ricœur pour défendre l'idée qu'une « sécurité pratique » est possible. Celle-là reposerait sur la raison pratique des individus plutôt que la rationalité organisationnelle, la volonté plutôt que l'obéissance, pour maintenir son état de sécurité. Un tel cadre restitue à l'individu son attribut de sujet autonome.

Est-il possible que les modèles d'accidents aient été abusivement utilisés comme outils de collaboration et qu'ils aient atteint un seuil de contre-productivité ? Cela pourrait expliquer que ces mêmes modèles soient devenus les points de construction d'une opposition caractérisée entre écoles de pensée.

[319] Comme nous l'avons indiqué, notre démarche a mobilisé à la fois des théories, des modèles et des méthodes en psychologie cognitive, en sociologie des organisations, en ergonomie de conception ou en ingénierie logicielle.

Travaux à venir

Nous proposons, pour achever ces travaux, deux chantiers et une posture de recherche.

Achever une approche « archéologique » des modèles influents

L'étude des travaux de Reason a contribué au développement d'ECHO mais également à la discussion du débat académique autour des modèles d'accidents. Revisiter les travaux des auteurs ayant produits des modèles influents est une démarche qui, si elle était systématisée, pourrait faire progresser significativement les orientations de la communauté des safety sciences. Nos travaux sur Reason viennent compléter deux études de Jean-Christophe Le Coze (2015a, 2015b) :

- La première, sur les travaux de Charles Perrow, « 1*984–2014. Normal Accidents. Was Charles Perrow Right for the Wrong Reasons?* »
- La seconde, sur les travaux de Jens Rasmussen, « *Reflecting on Jens Rasmussen's legacy. A strong program for a hard problem*. »

La démarche pourra être étendue à des auteurs comme Leveson, Hollnagel, Swain, Dekker.

Comprendre le mouvement du modèle à l'outil et de l'outil au modèle

Tout au long de nos travaux, nous avons partagé des considérations relatives aux modèles, méthodes et outils. Tantôt très théoriques et conceptuelles, ces réflexions ont également relevé d'une approche empirique offerte par la recherche-action. Ainsi, nous avons pu trouver des définitions précises et très intéressantes des nuances (parfois subtiles mais épistémologiquement fondamentales) entre « paradigmes », « théories », « modèles », « méthodes » et « outils » (Willett, 1996), mais nous avons également mesuré à quel point ces différences étaient mises à mal par les usages (ainsi il est commun de trouver le « *Swiss cheese model »* qualifié de « méthode » ou la « *Functional Resonance Analysis Method* » qualifiée de « modèle »[320]).

Cette confusion nous suggère qu'il faut poursuivre l'exercice de caractérisation des « objets de connaissance » de l'accident. Maintenir l'effort « *d'archéologie des modèles* », comme nous l'avons suggéré dans un premier temps, permettra de garantir la nature compréhensive de l'approche et, nous l'espérons, d'éviter les écueils réducteurs d'une « classification générale » (4.2.3).

Mettre en évidence et caractériser un « mouvement du modèle à l'outil et (simultanément) de l'outil au modèle » est une ambition que de futurs travaux sur les modèles d'accidents peuvent se fixer. Un tel mouvement ne peut sans doute être mis en évidence qu'à travers une vision intégratrice comme celle proposée par l'école 3, dans un cadre holiste comme celui suggéré par le courant des STS (Sciences-Techniques et-Société).

Les travaux d'ECHO se sont très rapidement orientés vers la conception d'un outil. D'aucun pourrait en conclure que les attentes des parties prenantes industrielles en ce qui concerne la recherche en gestion de la sécurité, sont essentiellement liées à la création d'outils. Cela serait alors naturellement

[320] Hollnagel précise, sur le site dédié à la méthode FRAM (www.functionalresonance.com), que l'acronyme a initialement désigné un modèle : « *In the first presentations of FRAM, the acronym was used to mean Functional Resonance Accident Model. It however soon became clear that FRAM was a method rather than a model, and the acronym now stands for Functional Resonance Analysis Method.* »

imputable à la « quête de pragmatisme » et à la « rationalité instrumentale », des attributs souvent utilisés pour décrire le secteur industriel. Cette situation peut également être lue, non pas dans le cadre de la relation industrie-recherche, mais comme une des conséquences des modalités d'existence de la relation de contrôle. Ainsi, dans le cas d'ECHO, le besoin exprimé par le CIH de développer un outil qui permette de « produire des cotations » FOH est lié à la nature des EDD (1.2.2) et à l'injonction de réaliser ces études. Ainsi, l'importance (discutable) accordée aux outils de gestion dans la sécurité industrielle pourrait être ancrée au sein de la relation de contrôle entre Etat et industrie, plus que dans les relations entre industrie et recherche.

Pour répondre à une injonction de traiter le facteur humain dans (et par) l'EDD, le dispositif ECHO fourni une cotation. Qu'adviendrait-il du dispositif sans une telle injonction ? Dans quelles mesures la gestion de la sécurité peut-elle s'émanciper des outils de gestions ? Qu'adviendrait-il alors des modèles sur lesquels ces outils s'appuient ? Les modèles, réhabilités dans leurs fonctions d'intermédiaires entre théorie et réel (2.1.2), produiraient-ils de nouveaux effets[321] ?

Poursuivre la quête de telles réponses, en partie initiée par Blazsin (2014), constitue un programme de recherche conséquent. Ces orientations semblent s'inscrire dans la voie ouverte par l'émergence de « l'école 3 ».

Revendiquer la recherche-action, pluridisciplinaire et ouverte

Enfin, pour conclure ces travaux, nous souhaitons confirmer, pour l'avenir, l'intérêt d'une recherche-action, pluridisciplinaire et ouverte. Nous avons pu justifier de l'importance, notamment dans la gestion de la sécurité, du « terrain ». Un débat sur la validité des modèles, purement scientifique, qui exclurait leurs forces pratiques, leurs utilités pragmatiques, manquerait l'essentiel.

L'ouverture disciplinaire apparaît alors une réponse naturelle à ce tiraillement du chercheur entre la théorie et la pratique. Nous revendiquant, si tant est qu'elle existe vraiment, de l'école 3, « l'école de la convergence », nous estimons un tel « tiraillement » vertueux… voire agréable.

[321] Pédagogiques, didactiques, informatifs, communicationnels ?

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Académie Française. (2015). *Dictionnaire de l'Académie française* (de *A* à *Renommer*). 9ème Edition (en cours de rédaction), consultée en ligne [http://atilf.atilf.fr/academie9.htm] entre mai et septembre 2015.

AIEA – Agence Internationale de l'Energie Atomique. (1991). *Culture de sureté.* Rapport du groupe consultatif international pour la sureté nucléaire, INSAG-4.

Alain, E. C. (1953). *Définitions.* Paris : Les Éditions Gallimard, 1953, 238 pp. Collection : NRF.

Amalberti, R. (2001). *La maîtrise des situations dynamiques*. Psychologie française, 46(2), 107-118.

Andersson, R. (1991). The *role of accidentology in occupational injury research*. Sweden, National Institute of Occupational Health. Dissertation de doctorat, *Arbete och Hälsa*, *17*, 200.

ARIA. (2010). *Déferlement de 50 millions de m3 d'eau au barrage du Vajont - Le 9 octobre 1963, Erto e Casso (PN), Italie*. Ministère chargé du développement durable – DGPR / SRT / BARPI n°23607. Octobre 2010. 10 pp.

Armatte, M. (2005). *La notion de modèle dans les sciences sociales: anciennes et nouvelles significations.* Mathématiques et sciences humaines. Mathematics and social sciences, (172).

Armatte, M., & Dalmedico, A. D. (2004). *Modèles et modélisations, 1950-2000: Nouvelles pratiques, nouveaux enjeux*. Revue d'histoire des sciences, 243-303.

Arminen I., Auvinen P., Palukka H. (2010). *Repairs as the last orderly provided defense of safety in aviation.* Forthc. Journal of Pragmatics.

Arnold, R. (2009). *A qualitative comparative analysis of SOAM and STAMP in ATM occurrence investigation*. Unpublished MSc thesis, < http://sunnyday. mit. edu/Arnold-Thesis. pdf>, consultee en septembre 2015.

ATSB - Australian Transport Safety Bureau. (2008). *Analysis, causality and proof in safety investigations*. Aviation Research and Analysis Report AR-2007-053. Australian Transport Safety Bureau, Canberra City.

Attwood, D., Khan, F., & Veitch, B. (2006). *Occupational accident models—Where have we been and where are we going?*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19(6), 664-682.

Austin, J. L. (1970). *Quand dire c'est faire* (1962). Paris: Seuil.

Aven, T. (2014). *What is safety science?* Safety Science, 67, 15-20.

Badiou, A. (2007). *Le concept de modèle*. Fayard.

Barberousse, A., Ludwig, P. (2000). *Les modèles comme fictions*. Philosophie, (68), 16-43.

Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: An experimental and social study*. Cambridge: Cambridge University.

Batoufflet, P. (2013). *Rapport 2012 de l'Inspecteur de la Sûreté Hydraulique*. EDF-DPIH. Disponible en ligne.

Baysari, M., McIntosh A., Wilson J. (2008). *Understanding the human factors contribution to railway accidents and incidents in Australia*. Accident Analysis and Prevention 40, 1750-1757.

Beauvallet, M. (2009). *Les stratégies absurdes*. *Comment faire pire en croyant faire mieux ?* Paris, Seuil.

Belmonte, F., Boulanger, J. L., & Schön, W. (2008). *Utilisation d'un modèle d'accident systémique comme référentiel commun à une analyse de risque interdisciplinaire*. In CIFA, Sep 2008, Bucarest, Romania. (pp. T24-1).

Bertalanffy, V., L. (1973). *The meaning of general system theory*. General system theory: Foundations, development, applications, 30-53.

Besnard, D. (2010). *Quelques mythes de la sécurité industrielle*. RSE Risque Sécurité Environnement 1, 3, pages 32-35.

Besnard, D., Baxter, G. (2003). *Human compensations for undependable systems.* Technical Report Series CS-TR-819. University of Newcastle upon Tyne. School of Computing Science. November 2003.

Blazsin, H. (2014). *De l'ingénierie de la raison à la raison pratique. Vers une nouvelle approche de la sécurité. Thèse de doctorat, spécialité « Sciences et Génie des Activités à Risques », sous la direction de Franck Guarnieri, Mines Paristech, Centre de Recherche sur les Risques et les Crises (CRC) – 319 pages.*

Bolvin, C., Balouin, T., Vallee, A., & Flauw, Y. (2011). *Une méthode d'estimation de la probabilité des accidents majeurs de barrages: la méthode du noeud papillon*. In *Colloque technique CFBR/AFEID" Pratique des études de dangers des barrages"* (pp. 33-40). CFBR.

Bordes, J.-L. (2010). *Barrage et méthode expérimentale.* Edifice book, Conception / Modélisation et expérimentation. Septembre 2010, 303-313.

Boring, R. L., Hendrickson, S. M. L., Forester, J. A., Tran, T.Q., Lois, E. (2010). *Issues in benchmarking human reliability analysis methods: A literature review.* Reliability Engineering and System Safety 95. 591-605.

Bouaziz, S. & Leconte, G. (2011). *Modèles et théories - Présentation.* Article de blog (www.implications-philosophies.org), rubrique épistémologie, sciences. Consulté en ligne août 2015.

Bouilloud J.-P. (2007). *Le chercher, un autobiographe malgré lui.* In Vincent de Gaulejac *et al.*, *La sociologie clinique*. ERES « Sociologie clinique ». p. 75-89.

Bourezak, A. H. (2002). *Le partenariat université-industrie en recherche et développement dans le secteur manufacturier au Canada*. Mémoire de Master, Université de Sherbrooke.

Bourrier M. (2011). *The legacy of the High Reliability Organization Project. Journal of Contingencies and Crisis Management*. Vol 19 Number 1 March 2011.

Brandon, E., Rival, F. (2011). *Apports de l'analyse des évènements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) dans les études de dangers (EDD) de barrages*. In *Colloque technique CFBR/AFEID" Pratique des études de dangers des barrages"*. (pp. 145-164). CFBR.

Brickhill, P. (2009). *The dam busters*. Pan Macmillan. 272 p.

Bulle, N. (2006). *Modèle et sciences humaines*. In Mesure, S., Savidan P. (dir.), *Dictionnaire des sciences humaines*, Paris, PUF : 781-784.

Cambon, J. (2007). *Vers une nouvelle méthodologie de mesure de la performance des systèmes de management de la santé-sécurité au travail*. Thèse de doctorat, spécialité « Sciences et Génie des Activités à Risques », sous la direction de Franck Guarnieri, Mines Paristech, Centre de Recherche sur les Risques et les Crises (CRC) – 300 pages.

Cambon, J., Guarnieri, F. (2008). *Maîtriser les défaillances des organisations en santé et sécurité au travail: La méthode Tripod*. Lavoisier, Col. Sciences du Risque et du Danger (SDR).

Cambon, J., Guarnieri, F., Groeneweg, J. (2006). *Towards a new tool for measuring Safety Management Systems performance*. Proceedings of the second resilience engineering symposium 370 p.

Cambon, J., Guarnieri, F., Groeneweg, J., Hinrichs, J., Scholten, E., & Lancioni, G. E. (2006). *Bringing Tripod Delta to France for the analysis of organizational factors*. In *Esrel 2006 conference*. pp. 18-22.

CFBR – Comité Français des Grands Barrages. (2015). *Comité Français des Grands Barrages*. Site internet (http://www.barrages-cfbr.eu) consulté en ligne, juin 2015.

CGE Risk. (2013). *Revisiting the Swiss Cheese model - Unifying Bowtie, Tripod Beta and Tripod Delta*. Article consulté en ligne sur http://www.cgerisk.com/knowledge-base/incident-analysis-methods/ en mai 2014.

Chapanis, A., Garner, W. R., & Morgan, C. T. (1949). *Applied experimental psychology: Human factors in engineering design*. Hoboken, NJ, US: John Wiley & Sons Inc. 434 p.

Charpak, G., & Broch, H. (2002). *Devenez sorciers, devenez savants*. Odile Jacob.

Chikofsky, E., Cross, J.I. (1990). *Reverse engineering and design recovery: a taxonomy*. IEEE software.

CIGB – Comission Internationale des Grands Barrages. (2015a). *Comité International des Grands Barrages*. Site internet (http://www.icold-cigb.org) consulté en ligne, juin 2015.

CIGB. (2015b). *Charte CIGB sur les barrages et l'environnement.* Consultée en ligne (http://www.icold-cigb.org/userfiles/files/PUBLICATIONS/Others/Dams-Env-CharteBarrageetEnvironnement.pdf), juin 2015.

Colas, A. (1998). Les facteurs humains à EDF. *Revue générale nucléaire*, (1), 33-38.

Cousquer, Y., Carlier, M., (1985). *Dam construction : French techniques and relalizations.* Comité Français des Grands Barrages, Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports, Direction des Affaires Economiques et Internationales. Paris, France : Ed. du Moniteur. 71 p.

Coyne, A. (1943). *Leçons sur les grands barrages*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Documentation personnelle.

Cridelich, C. (2011). *Management du risque à l'hôpital: évaluation d'une nouvelle méthode d'analyse du risque appliquée à la prise en charge du patient par chimiothérapie* (Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris).

Crozier M., Friedberg E. (1977). *L'acteur et le Système*. Rééd. Seuil, coll. « Points essais », 1992.

Crozier M., Friedberg E., Grémion C., et al. (1975). *Où va l'administration française ?* Revue française de sociologie, 1975, vol. 16, n° 4, pp. 561-563.

De Terssac, G, Mignard, J (2011). *Les paradoxes de la sécurité – Le cas d'AZF*. Paris : PUF, collection Le Travail Humain.

Dejours, C. (2014). *Le facteur humain.* PUF, collection *Que Sais-Je ?* 128 p.

Dekker, S. (2002). *The Field Guide to Human Error Investigations*. Ashgate.

Dekker, S. (2006). *Past the edge of chaos*. Technical Report 2006-03. Lund University, School of Aviation; Sweden.

Dekker, S. (2007). *Six stages to the new view of the human error*. Safety Science Monitor, Issue 1, vol. 11, article 5.

Dekker, S. (2015). The psychology of accident investigation: epistemological, preventive, moral and existential meaning-making. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *16*(3), 202-213.

Desmorat G. (2012). *L'entreprise à l'épreuve des facteurs humain et organisationnel : la pratique de l'analyse d'accident au service de la sécurité à GrDF*. Thèse de doctorat, spécialité « Sciences et Génie des Activités à Risques », sous la direction de Franck Guarnieri, Mines Paristech, Centre de Recherche sur les Risques et les Crises (CRC) – 220 pages.

Desmorat, G., Guarnieri, F., Besnard, D., Desideri, P., & Loth, F. (2013). *Pouring CREAM into natural gas: The introduction of Common Performance Conditions into the safety management of gas networks*. Safety science, 54, 1-7.

Dion, E. (2003). *Introduction critique à la mémétique*. Référence, (31), 9-14.

Doran, J.A., Van Der Graaf G.C. (1996). *Tripod-BETA : Incident investigation and analysis.* Society of Petroleum Engineers. SPE Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production Conference, 9-12 June 1996, New Orleans, Louisiana.

Duffaut, P. (2009). *Cinquantenaire de la rupture des fondations et du barrage de Malpasset (Var).* Travaux du Comité français d'histoire de la géologie (COFRHIGEO). Troisième série, t. XXIII, 2009, n°9. 24 p.

Duffaut, P. (2013). *The traps behind the failure of Malpasset arch dam, France, in 1959.* Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 5 (2013) 335–341.

Edwards, E. (1988). *Introductory Overview*. In Wiener, E. L., & Nagel, D. C. (Eds.). (1988). *Human factors in aviation*. Gulf Professional Publishing.

EUROCONTROL (2005). *Guidelines on the Systemic Occurrence Analysis Methodology (SOAM)*. EAM2 GUI 8 ESARR Advisory Material. Guidance Document.

Farret, R. (2008). L'étude des dangers: contenu, limites et spécificités françaises. In *Séminaire" Les enjeux d'une gestion territorialisée des risques technologiques. Séance n° 2: Les outils de l'analyse des risques industriels. De l'étude de danger à la caractérisation des aléas technologiques. Principes généraux, méthodes et débats actuels sur la sécurité industrielle"* (pp. 8-11).

Faure, A., Maisonable, A. (2012). *Bort-les-Orgues, les mots sous le lac. Récits et témoignages d'avant le barrage*. Toulouse, France : Ed. Privat. 95 p.

Fenneteau, H. (2002). *Enquête: entretien et questionnaire*. Dunod, 125 p.

Froggatt P., Smiley J. (1964). *The concept of accident proneness: a review.* British Journal Ind. Med. 21(1) : 1–12.

Fukuoka, K. (2015). *Visualization of a hole and accident preventive measures based on the Swiss cheese model developed by risk management and process approach*. WMU Journal of Maritime Affairs, 1-16.

Gallais, M. (2012). *Modèles scientifiques comme fictions: Propriétés et fonctions hintikkiennes*. In *Klesis* No. 23, pp. 101-116.

Galland, J.-P. (2010). *Une mise en perspective historique de l'étude de dangers et de ses contributions à l'action publique*. In Galland J.-P., Martinais E. (2010). *La prévention des risques industriels en France - Bilan et perspectives*. Actes de séminaire « Les enjeux d'une gestion territorialisée des risques technologiques. Spécificités françaises et mise en perspective international ». PUCA, LATTS, EVS-RIVES, Paris, 2007-2009.

Gérard, P. (1996). *L'épopée hydroélectrique de l'Electricité de France.* AHEF, Col. récits historiques. 681 p.

Gilbert, C. (2003). *La Fabrique Des Risques.* P.U.F. - Cahiers Internationaux De Sociologie 2003/1 - n°114, pages 55 - 72.

Ginzburg, C. (1989). *Mythes, emblèmes, traces: morphologie et histoire*. Flammarion.

Gioia, D. A. (2003). *Give it up! Reflections on the interpreted world (a commentary on Meckler and Baillie)*. Journal of Management Inquiry, 12(3), 285-292.

Goblot, H. (1967). Sur quelques barrages anciens et la genèse des barrages-voûtes. *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, 109-140.

Goh, Y. M., Love, P. E., Brown, H., & Spickett, J. (2012). *Organizational accidents: a systemic model of production versus protection.* Journal of Management Studies, 49(1), 52-76.

Gordon, J. E. (1949). *The epidemiology of accidents*. American Journal of Public Health and the Nations Health, 39(4), 504-515.

Goubet A. (1979). *Risques associés aux barrages.* La Houille Blanche n°8 - 1979, pages 475 – 491.

Granier, F. (2012). *Du censeur au coproducteur de normes: le cas de contrôleurs-inspecteurs publics*. In *XII èmes Journées internationales de Sociologie du Travail,* Nancy.

Greenwood, M., Woods, H.M. (1919). *A report on the incidence of industrial accidents upon individuals with special reference to multiple accidents.* British Industrial Fatigue Board, No 4.

Groeneweg, J. (2002). *Controlling the controllable*. Preventing business upsets, fi fth editio. Global Safety Group Publication. pp. 1-528.

Groeneweg, J., Roggeveen, V. (1998). *TRIPOD DELTA: Safety Performance Redefined*. In *SPE International Conference on Health Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production*. Society of Petroleum Engineers.

Groff, A. (2009). 100 questions sur « manager l'innovation ». Editions AFNOR.

Guarnieri, F., Besnard, D. (2013). *Redécouvrir l'erreur humaine de James T. Reason*. (Préface à la deuxième Edition). In James Reason, *L'erreur humaine*. Paris, Presses des Mines, Collection Economie et Gestion, 2013.

Guarnieri, F., Cambon, J., Boissière, I. (2008). *De l'erreur humaine à la défaillance organisationnelle : Essai de mise en perspective historique.* Revue de l'électricité et de l'électronique n°8. pp. 67-76.

Guarnieri, F., Travadel, S. (2014). *Fukushima-Daiichi, le temps de l'ingénierie de l'urgence*. Papier de recherche du CRC de MINES Paristech. Mai 2014.

Hardy, K. (2010). *Contribution à l'Etude d'un Modèle d'accident Systémique - Le Cas du Modèle STAMP : Application et Pistes d'améliorations*. Thèse soutenue en décembre 2010. Centre de Recherche sur les Risques et les Crises, MINES ParisTech, France. 212 p.

Hardy, K., Guarnieri, F. (2012). *Modéliser les accidents et les catastrophes industrielles : la méthode STAMP*. Lavoisier, Col. Sciences du Risque et du Danger (SDR).

Harris, D., & Li, W. C. (2011). *An extension of the human factors analysis and classification system for use in open systems.* Theoretical Issues in Ergonomics Science, 12(2), 108-128.

Hassall, M. E., Sanderson, P. M., & Cameron, I. T. (2014). *The Development and Testing of SAfER A Resilience-Based Human Factors Method*. Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, 8(2), 162-186.

Heinrich, H.W. (1939) *Industrial Accident Prevention.* McGraw-Hill, New York.

Henderson, A. (2007). *Swiss cheese: analyszing the cause of service delivery failures*. Euro CHRIE Leeds Conference Preceedings – 2007.

Hickey, J. (2012). *A system Theoretic Safety Analysis of U.S. Coast Guard Aviation Mishap involving CG-6505*. Thèse soutenue en mai 2012. Massachusetts Institute of Technology – System Design and Management Program.

Hollnagel, E. (1998). *Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)*. Elsevier.

Hollnagel, E. (2001). *Anticipating failures: what should predictions be about?*. Linkoeping Univ (Sweden) Graduate School For Human-Machine Interaction. EDP010439.

Hollnagel, E. (2004). *Barriers and accident prevention*. Hampshire: Ashgate.

Hollnagel, E. (2009). *Safer complex industrial environments: A human factors approach*. CRC Press.

Hollnagel, E. (2011). *Understanding Accidents, or How (Not) to Learn from the Past*. Cours donné à l'Université de Syddansk (Denmark).

Hollnagel, E. (2012). *FRAM: the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems*. Ashgate Publishing, Ltd..

Hollnagel, E. (2014). *Is safety a subject for science?* Safety Science 67 (2014) 21 – 24.

Hollnagel, E., Pruchnicki, S., Woltjer, R., & Etcher, S. (2008). *Analysis of Comair flight 5191 with the functional resonance accident model.* In 8th International Symposium of the Australian Aviation Psychology Association (8 pages).

Hollnagel, E., Speziali, J. (2008). *Study on Developments in Accident Investigation Methods: A Survey of the" State-of-the-Art*. SKI Reports.

Hollnagel, E., Woods, D., Leveson, N. (2006). *Resilience Engineering : Concepts And Precepts*. Ashgate.

Holtermann J.H. (2010). *A "Slice of Cheese" – A Deterrence-based Argument for the International Criminal Court.* Human Rights Review Vol. 11 Issue 3. 289-315.

Hopkins A. (2001). *Was Three Mile Island a "Normal Accident"?* Journal of Contingencies and Crisis Management, 9(2), 65-72, 2001.

Hovden, J., Albrechtsen, E., & Herrera, I. A. (2010). *Is there a need for new theories, models and approaches to occupational accident prevention?.* Safety Science, 48(8), 950-956.

Hudson P., Reason J., Wagenaar W.-A., Bentley P.D., Primrose M., Visser J.P., (1994). *Tripod Delta: proactive approach to enhanced safety.* Journal of petroleum technology n°1. pages 58 à 62.

ICAO (1998). *Human factors training manual.* First Edition, Doc 9683-AN/950. International Civil Aviation Organization.

INSAG (1996). *Defense in depth in Nuclear Safety.* Report by the International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG). IAEA, Austria, 1996. 48 pages.

Johns A.M. (2009). *Critical Thinking: Plugging (or moving) a hole in our Swiss Cheese*. 10th Wildland Fire Safety Summit, International Association of Wildland Fire & NWCG Safety & Health Working Team.

Jones B.M.S. (2008). *Organizational Accidents: From Swiss Cheese to Swiss Chateau*. Process Contracting Limited – March 2008.

Jones B.M.S. (2009). *Unpacking the blunt end – changing our view of organizational accidents.* Contemporary Ergonomics 2009. Philip D. Bust Ed.

Katsakiori, P., Sakellaropoulos, G., & Manatakis, E. (2009). *Towards an evaluation of accident investigation methods in terms of their alignment with accident causation models*. Safety Science, 47(7), 1007-1015.

Kazaras, K., Kontogiannis, T., & Kirytopoulos, K. (2014). *Proactive assessment of breaches of safety constraints and causal organizational breakdowns in complex systems: A joint STAMP–VSM framework for safety assessment*. Safety science, 62, 233-247.

Kert, C. (2008). *Rapport sur l'amélioration de la sécurité des barrages et ouvrages hydrauliques*. Rapport à l'Assemblée nationale n°1047 n°454. Enregistré le 9 juillet 2008.

Kjellén, U. (2000). *Prevention of accidents through experience feedback*. Taylor & Francis, CRC Press.

Koen, B.V. (1985). *Definition of the engineering method.* Washington, DC: American Society for Engineering Education. 79p.

Kuhn, T. S. (2012). *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago press.

Ladrière, J. (1999). Représentation et connaissance. *Encyclopaedia universalis*, *19*, 822-824.

Lafond, J. (1986). *La notion de modèle*. In Jean Lafond (dir.), *Le modèle à la renaissance*. Librairie Philosphique J. Vrin.

Laloux, S., Castel, Y., Boubée, D. (2011). *Analyse de risques : comment faire quand la statistique ne suffit plus ?* In *Colloque technique CFBR/AFEID" Pratique des études de dangers des barrages"*. (pp. 53-70). CFBR.

LaPorte, T. R., & Consolini, P. M. (1991). *Working in practice but not in theory: theoretical challenges of" high-reliability organizations"*. Journal of Public Administration Research and Theory: J-PART, 19-48.

Larouzée, J. (2012a). *Amélioration des pratiques de l'Ingénierie Hydraulique d'EDF relatives à l'activité des études de sûreté - Analyse et traitement des remarques de l'administration au sujet des études de dangers de barrages EDF*. Mémoire pour l'obtention du titre d'ingénieur, Institut Polytechnique Lasalle Beauvais.

Larouzée, J. (2012b). *Evolution guide de cotation « facteur humain »*. Note interne CIH – 17 avril 2012. Non publiée.

Larouzée, J., Duffaut, P., Guarnieri, F. (2014a). *La catastrophe de Malpasset à l'épreuve des facteurs organisationnels et humains.* Actes de colloque. Journées Nationales de Géologie et Géotechnique (7ème édition), Beauvais, France. Juillet 2014.

Larouzée, J., Guarnieri, F., Besnard, D. (2014b). *Modèle d'erreur humaine de James Reason : perspectives historique et épistémologique.* Papier de recherche du CRC de MINES Paristech. Mai 2014.

Larouzée, J., Guarnieri, F. (2014c). *Huit idées reçues sur le (s) modèle (s) de l'erreur humaine de James Reason.* Revue d'électricité et d'électronique, (5), 83-90.

Larouzée, J., Guarnieri, F. (2015a). *Fonds bibliographique Sir James Reason - Une vie dans l'erreur*. Rapports de recherche du CRC, WP 2015 25, MINES ParisTech. 16 p.

Larouzée, J., Guarnieri, F. (2015b). *From theory to practice: itinerary of Reasons' Swiss Cheese Model*. In, Podofillini, L., Sudret, B., Stojadinovic, B., Zio, E., and Kröger, W., *ESREL 2015*, Sep 2015, Zürich, Switzerland. CRC Press Safety and Reliability of Complex Engineered Systems. pp. 817 – 824.

Le Breton, A. (1985). *Les ruptures et accidents graves de barrages de 1964 à 1983*. La Houille Blanche n°6/7 – 1985, pages 530 – 546.

Le Breton, D. (1995). *La sociologie du risque*. Paris: Presses universitaires de France.

Le Coze, J. C. (2008). *Disasters and organisations: From lessons learnt to theorising*. Safety Science, 46(1), 132-149.

Le Coze, J. C. (2011). *De l'investigation d'accident a l'evaluation de la securite industrielle : proposition d'un cadre interdisciplinaire (concepts, methode, modele)*. Thèse de doctorat, spécialité « Sciences et Génie des Activités à Risques », sous la direction de Franck Guarnieri, Mines Paristech, Centre de Recherche sur les Risques et les Crises (CRC) – 190 pages.

Le Coze, J. C. (2013a). *New models for new times. An anti-dualist move*. Safety Science n°59. 200-218.

Le Coze, J. C. (2013b). *What have we learned about learning from accidents? Post-disasters reflections.* Safety science, 51(1), 441-453.

Le Coze, J. C. (2015a). 1*984–2014. Normal Accidents. Was Charles Perrow Right for the Wrong Reasons?*. Journal of Contingencies and Crisis Management.

Le Coze, J. C. (2015b). *Reflecting on Jens Rasmussen's legacy. A strong program for a hard problem*. Safety science, *71*, 123-141.

Le Delliou, P. (2003). *Les barrages, conception et maintenance*, Presses Universitaires de Lyon, 270 pages.

Le Moigne, J. L. (1987). *Qu'est-ce qu'un modèle*. Université d'Aix-Marseille III, Faculté d'économie appliquée. GRASCE, CNRS.

Le Moigne, J. L. (1994) [2006]. *La théorie du système général: théorie de la modélisation*. Collection Les Classiques du Réseau Intelligence de la Complexité (RIC). 338 pp.

Lederman, R.M., Parkes, C. (2005). *System failure in hospitals – using Reason's model to predict problems in a prescribing information system.* Journal Med Syst 29(1), 33-43.

Lehto, M., & Salvendy, G. (1991). *Models of accident causation and their application: review and reappraisal*. Journal of Engineering and Technology Management, 8(2), 173-205.

Lehto, M., Miller, J. (1968). *Warnings: Fundamentals, design, and evaluation methodologies*. Fuller Technical Publications. 288 p.

Leveson, N. (2004). *A new accident model for engineering safer systems*. Safety science, 42 (4), 237-270.

Leveson, N. (2011). *Applying systems thinking to analyze and learn from events*. Safety Science, 49(1), 55-64.

Leveson, N. (2012). *Engineering a safer world: applying systems thinking to safety*. Col. Engineering Systems – MIT Press.

Leveson, N. (2013). *An STPA Primer – v1 August 2013.* MIT.

Leveson, N., Dulac, N., Marais, K., & Carroll, J. (2009). *Moving beyond normal accidents and high reliability organizations: a systems approach to safety in complex systems*. Organization Studies, 30(2-3), 227-249.

Leveson, N., Dulac, N., Zipkin, D., Cutcher-Gershenfeld, J., Carroll, J., & Barrett, B. (2006). *Engineering resilience into safety-critical systems.* Resilience Engineering–Concepts and Precepts. Ashgate Aldershot, 95-123.

Leveson, N., Stringfellow, M., Thomas, J. (2011). *A Systems Approach to Accident Analysis*. MIT.

Li, Y., Thimbleby, H. (2014). *Hot cheese: a processed Swiss cheese model.* JR Coll Physicians Edinb, 44, 116-21.

Lubnau T., Okray R., Lubnau T. (2004). *Crew Resource Management for the Fire Service*. PennWell Books. pp. 20–21.

Lundberg, J., Rollenhagen, C., & Hollnagel, E. (2009). *What-You-Look-For-Is-What-You-Find–The consequences of underlying accident models in eight accident investigation manuals.* Safety Science, 47(10), 1297-1311.

Luxhoj J.T., Kauffeld K. (2003). *Evaluating the Effect of Technology Insertion into the National Airspace System*. The Rutgers Scholar – An Electronic Bulletin of Undergraduate Research. Vol 5.

Marchand, P. (1991). *Une catastrophe d'origine administrative, l'aménagement de la Volga par la bureaucratie/An administrative disaster: the bureaucratie development of the Volga*. Revue de géographie de Lyon, 66 (3-4), 231-237.

Martel, J. M., Rousseau, A. (1993). *Cadre de référence d'une démarche multicritère de gestion intégrée des ressources en milieu forestier*. Gouvernement du Québec, Ministère du loisir, de la chasse et de la pêche, Ministère des forêts, Ministère de l'environnement. Consulté en ligne (août 2015) ftp://ftp.mrn.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Mono/2012/05/1112628.pdf

Martinais E. (2010a). *L'écriture des règlements par les fonctionnaires du ministère de l'écologie la fabrique administrative du plan de prévention des risques technologiques*. Politix 2010/2 - n° 90 pages 193 à 223.

Martinais, E. (2010b). *Les fonctions sociales et politiques de l'étude de dangers dans le domaine des risques industriels*. In Galland J.-P., Martinais E. (2010). *La prévention des risques industriels en France - Bilan et perspectives*. Actes de séminaire « Les enjeux d'une gestion territorialisée des risques technologiques. Spécificités françaises et mise en perspective international ». PUCA, LATTS, EVS-RIVES, Paris, 2007-2009.

Mary M. (1968). Barrages-voûtes, historique, accidents et incidents. Paris: Dunod.

Maurino, D. E., Reason, J., Johnstonton, N., & Lee, R. B. (1995). *Beyond aviation human factors: Safety in high technology systems*.

MEDAD - Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durable. (2007). *Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement*. Journal Officiel de la République Française. 13 décembre 2007. Texte 3 / 149.

MEDDE – Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de l'Energie. (2005). *Arrêté du 20 avril 2005*, relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à déclaration sous la rubrique n° 1433 (installations de mélange ou d'emploi de liquides inflammables).

MEEDDAT – Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (2008). Arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu.

MI – Ministère de l'Intérieur (1999). *Circulaire du 13/07/99 relative à la sécurité des zones situées à proximité ainsi qu'à l'aval des barrages et aménagements hydrauliques, face aux risques liés à l'exploitation des ouvrages* Ministère de l'intérieur, de l'économie, des finances et de l'industrie, de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

Minsky, M. (1975). *A framework for representing knowledge* in Winston (Ed.), *The psychology of computer vision,* New York, McGraw-Hill.

Mintzberg, H. (1982). *L'adhocratie*. Structure et dynamique des organisations, 375-406.

Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. ESF éditeur, Paris. 107 p.

Morin, E. (1995). La stratégie de reliance pour l'intelligence de la complexité. *Revue internationale de systémique*, *9*(2), 133-165.

Morin, E. (2001). La méthode, tome 5. *L'humanité de l'humanité. L'identité humaine*.

Mucchielli, R. (1993). *Le questionnaire dans l'enquête psycho-sociale: connaissance du problème, applications pratiques*. ESF éditeur, col. Formation permanente en sciences humaines. 10ème Edition.

Newell, A. & Simon, H. (1972).*Human Problem Solving.* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Norman D.A. (1981). *Categorization of action slips*. Psychological Review, 1981, 88, 1-15.

Nouvel, D., Travadel, S., & Hollnagel, E. (2007). *Introduction of the Concept of Functional Resonance in the Analysis of a Near-Accident in Aviation*. In 33rd ESReDA Seminar: Future challenges of accident investigation. 9 p.

Okstad, E., Jersin, E., Tinmannsvik, R.K., 2012. *Accident investigation in the Norwegian petroleum industry—common features and future challenges*. Safety Science 50 (6), 1408–1414.

Pariès, M. J., Wreathall, M. J., Woods, D. D., & Hollnagel, E. (Eds.). (2012). *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*. Ashgate Publishing, Ltd..

Peng, M., & Zhang, L. M. (2012). Analysis of human risks due to dam break floods—part 2: application to Tangjiashan landslide dam failure. *Natural hazards*, *64*(2), 1899-1923.

Perneger, T. (2005). *The Swiss cheese model of safety incidents: are there holes in the metaphor?* BMC Health Services Research 5:71.

Perrow, C. (1984 ; Ed. 1999). *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies* New York: Basic Books.

Pierlot S., Dien Y., Bourrier M. (2006). *Veille technologique et scientifique. Accidents, incidents et crises. Définition des facteurs organisationnels pathogènes de la sécurité et identification de marqueurs génériques liés aux facteurs organisationnels.* EDF R&D, management des risques industriels. 3 décembre 2006.

Pierron, A., Zevort C. (1840). *La métaphysique d'Aristote.* Ebrard & Joubert, Paris, France. Première traduction française. Tome Premier.

Planès, J. (2012). *Note Mission Maîtrise des Risques – Facteur humain et EDD.* Note interne CIH – juin 2012. Document interne.

Poupart, M. (2002). *La sûreté hydraulique : nouvelle approche.* 30 décembre 2012, documen EDF, 15 p.

Poupart, M. (2011). *Analyse de risques et barrages - Eléments De Contexte International*. Actes De Colloque, CFBR « Pratique des Etudes de Dangers des Barrages ». Nov. 2011, Lyon, France.

Pringle, J. W. S. (1951). *On the parallel between learning and evolution.* Behaviour, 3, 175-215.

Proctor, R. W., & Van Zandt, T. (2008). *Human factors in simple and complex systems*. CRC press.

Qureshi, Z. H. (2007). *A review of accident modelling approaches for complex socio-technical systems.* In *Proceedings of the twelfth Australian workshop on Safety critical systems and software and safety-related programmable systems*-Volume 86 (pp. 47-59). Australian Computer Society, Inc..

Rasmussen J. (1986). *Information Processing and Human-Machine Interaction*, Amsterdam, North Holland. Elsevier Science Inc. New York, NY, USA.

Rasmussen, J. (1983). *Skills, rules, knowledge : Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models.* IEEE Trans. Syst. Man Cybern., SMC-13(3). P. 257-267.

Rasmussen, J. (1997). *Risk management in a dynamic society: a modelling problem*. Safety science, 27(2), 183-213.

Reason, J. (1977). Skill and error in everyday life. *Adult learning. London: Wiley.*

Reason, J. (1979). *Actions not as planned: the price of automatization*. In Geoffrey Underwood & Robin Stevens (eds.), *Aspects of Consciousness*. Academic Press 1—67.

Reason J. (1984). *Lapses of attention in everyday life*. In R. Parasuraman & D.R. Davies. *Varieties of attention*, Academic Press. 515-549.

Reason J. (1986). *Recurrent errors in process environments: some implications for the design of intelligent decision support systems.* In : Hollnagel, E., Mancini, G. & Woods, D. D. (Eds.) (1986) *Intelligent decision support in process environments*. Berlin: Springer Verlag.

Reason J. (1987a). *Cognitive aids in process environments: prostheses or tools?* International journal of man-machine studies n°27 (1987) pp. 463-470.

Reason J. (1987b). *Generic Error-Modelling System (GEMS): A cognitive Framework for Locating Common Human Error Forms*. In J. Rasmussen, K. Duncan and J. Leplat (Eds), *New Technology and Human Error*. Wiley. 1987. 63-86.

Reason J. (1988). *Resident pathogens and risk management*. World Bank Workshop on Safety Control and Risk Management, Ocotober, Washington, DC.

Reason J. (1990a). *The contribution of latent failures to the breakdown of complex systems*. Philosophical Transactions of the Royal Society B 327. Pages 475 à 484.

Reason J. (1990b). *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press.

Reason J. (1993a). *Managing the management risk – New approaches to organisational safety.* Chap 1 – B. Wilpert, Qvale T « Reliability and safety in hazardous work systems ».

Reason J. (1993b). *The identification of latent organizational failures in complex systems.* In: *Verification and Validation of Complex Systems – Human Factors Issues*. Edited by J.A. Wise, V.D. Hopkin & P. Stager. Computer and Systems Sciences Vol. 110. 223-237.

Reason J. (1994). *Errors, outcomes and circumventions: a reply to Dougherty*. Reliability Engineering and System Safety n°46. pp 297-298.

Reason J. (1997). *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Aldershot, UK: Ashgate Publishing Limited.

Reason J. (1998). *Achieving a safe culture: theory and practice.* Work & Stress n°12. Pp. 293 – 306.

Reason J. (2000a). *Heroic Compensation : The Benign Face of Human Factor*. In G. Edkins & P. Pfister (Eds) *Innovation and consolidation in aviation: Selected contributions to the Australian Aviation Psychology Symposium 2000* (pp. 1-6). Aldershot, I.K.: Ashgate.

Reason J. (2000b). *Human Error: models and management.* BMJ 2000, 320:768-70.

Reason J. (2005). *Safety in the operating theatre – Part 2: Human error and organizational failure.* Quality Safety Health Care n°14 (2005) pages 56 à 61.

Reason J. (2008). *The Human Contribution – Unsafe acts, accidents and heroic recoveries*. UK: Ashgate Publishing Limited.

Reason J. (2013). *A life in error – From little slips to big disasters*. UK: Ashgate Publishing Limited.

Reason J., Embrby D.E. (1985). *Human factors principles relevant to the modelling of human errors in abnormal conditions of nuclear power plants and major hazardous installations.* Parbold, Lanes, Human Reliability Associates, 1985.

Reason J., Hollnagel E., Paries J. (2006). *Revisiting the "Swiss Cheese" Model of Accidents*. EEC Note No. 13/06. European Organisation for the Safety of Air Navigation. October 2006.

Reason J., Mycielska K.(1982). *Absent-Minded ? The psychology of mental lapses and everyday errors*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. A Spectrum Book.

Reason J., Shotton, R., Wagenaar W.-A., Hudson P., & Groeneweg, J. (1989). *Tripod Delta: a Principled Basis for Safer Operations.* The Hague: Shell Internationale Petroleum Maatschappij (Exploration and Production).

Reason, J., Mycielska, K. (1982). *Absent-minded?: The psychology of mental lapses and everyday errors*: Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.

Ren J., Jenkinson I., Wang J., Xu D.L., Yang, J.B. (2008) *A methodology to model causal relationships on offshore safety assessment focusing on human and organisational factors*. J Safety Res 39(1) : 87-100.

Rey, F. (2010). *Le concept de modèle.* Les Cahiers du LISE n°01-2010, CNRS.

Roelen, A. L. C., Lin, P. H., & Hale, A. R. (2011). *Accident models and organisational factors in air transport: The need for multi-method models*. Safety science, 49(1), 5-10.

Rohret, D. (2015). *An Adaptive Approach to Achieving Acceptable Functional Resilience and Identifying Functional Resonance*. In *Iccws 2015-The Proceedings of the 10th International Conference on Cyber Warfare and Security* (p. 269). Academic Conferences Limited.

Rollenhagen, C., Westerlund, J., Lundberg, J., & Hollnagel, E. (2010). *The context and habits of accident investigation practices: A study of 108 Swedish investigators*. Safety science, 48(7), 859-867.

Royce, W. W. (1970). *Managing the development of large software systems*. In *proceedings of IEEE WESCON* (Vol. 26, No. 8, pp. 328-388).

Ruault, J. R., Luzeaux, D., Colas, C., & Sarron, J. C. (2011). Résilience des systèmes sociotechniques Application à l'ingénierie système. *Génie logiciel*, (96), 40-52.

Ruffier, J. (2001). *Accidents normaux: la gestion du risque inconnu dans les industries dangereuses.* Society for the advancemnet of socio-economics," Knowledge-The next wealth of nations.

Rumelhart, D. E. (1977). *Introduction to human information processing*. John Wiley & Sons.

Salmon P., Regan M., Johnston I. (2005). *A system Perspective on Road User Error in Asutralia: Swiss cheese and the road transport system.* Australasian Road Safety Research Policing Education Conference, 2005, Wellington, New Zealand.

Salmon, P. M., Cornelissen, M., & Trotter, M. J. (2012). *Systems-based accident analysis methods: A comparison of Accimap, HFACS, and STAMP*. Safety science, 50(4), 1158-1170.

Sarramea J. (1999). *Le drame de Malpasset : catastrophe naturelle?* L'information géographique. Volume 63 n°5. pp. 219-222.

Savage, I. (2013). *Research in Transportation Economics: The Economics of Transportation Safety, v*olume 43(1), pages 9 -22.

Schapper, J., De Cieri, H., & Wolfram Cox, J. (2005). *The ontological and epistemological dimensions of complex organizations*. In *ANZAM 2005: Engaging the multiple contexts of management: convergence and divergence of management theory and practice:* proceedings of the 19th ANZAM conference.

Schnitter, N. J. (1994). *A History of Dams*. Rotterdam: Balkema.

Seed H.B. & Ducan J.M. *The Teton Dam Failure – A retrospective review*.

Semenza E. (2002). *La Storia del Vaiont - Racontata dal geologo che a scoperto la frana.* Tecomproject Editore Multimediale, mai 2002, Italie.

Shappell S.A., Wiegmann D.A. (2000). *The Human Factors Analysis and Classification System – HFACS*. U.S. Department of Transportation. Office of Aviation Medecine, Washington, DC 20591 – February 2000.

Shorrock, S., Young, M., Faulkner, J., & Braithwaite, G. (2005). *Who moved my (Swiss) cheese*? Aircraft and Aerospace, 31-33.

Sklet, S. (2004). *Comparison of some selected methods for accident investigation*. Journal of hazardous materials, 111(1), 29-37.

Solava & Delatte (2003). *Lessons from the Failure of the Teton Dam,* Proceedings of the 3rd ASCE Forensics Congress, October 19 - 21, 2003, San Diego, California.

Sovacool, B. K. (2008). The costs of failure: a preliminary assessment of major energy accidents, 1907–2007. *Energy Policy*, *36*(5), 1802-1820.

Stanton N.A., Salmon P.M., Rafferty L.A., Walker G.H., Baber C., Jenkins D.P. (2013). *Human Factors Methods – A practical Guide for Engineering and Design.* 2nd Edition, Ashgate, USA. 625 pages.

Stanton, N.A., Rafferty, L.A., Blane, A., (2012). *Human factors analysis of accidents in systems of systems*. Journal of Battlefield Technology 15 (2), 23–30.

Stein, J., & Heiss, K. (2015). *The Swiss cheese model of adverse event occurrence-closing the holes*. In Seminars in Pediatric Surgery. WB Saunders.

Surry, J. (1968). *Industrial Accident Research, a Human Engineering Appraisal.* Labour Safety Council, Toronto, Ontario.

Swain, A. D. (1963). *Method for performing a human-factors reliability analysis* (No. SCR--685). Sandia Labs., Albuquerque, N. Mex.(USA).

Swain, A. D., Guttman, H. E. (1983). *Handbook for human-reliability analysis with emphasis on nuclear-power-plant applications, NUREG/CR-1278* Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. (USA).

Terminski B. (2013). *Development-Induced Displacement and resettlement: Theoretical Frameworks and Current Challenges.* Development, vol. 10, p. 101.

Tingey-Holyoak, J., Pisaniello, J. D., & Burritt, R. L. (2011). Analysis and application of international dam safety policy benchmarks. *Benchmarking: An International Journal*, *18*(2), 301-317.

Toft, Y., Dell, G., Klockner, K. K., & Hutton, A. (2012). *Models of causation: safety*. Safety Institute of Australia, Tullamarine, Victoria.

Tsoukas, H., & Hatch, M. J. (2001). *Complex thinking, complex practice: The case for a narrative approach to organizational complexity.* Human Relations, 54(8), 979-1013.

Turner, B. (1978, [1997]). *Man-Made Disasters.* Butterworth-Heinemann.

Underwood, P. (2013). *Examining the systemic accident analysis research-practice gap* (Doctoral dissertation).

Underwood, P., & Waterson, P. (2013). *Systemic accident analysis: examining the gap between research and practice.* Accident Analysis & Prevention, 55, 154-164.

Underwood, P., & Waterson, P. (2014). *Systems thinking, the Swiss Cheese Model and accident analysis: A comparative systemic analysis of the Grayrigg train derailment using the ATSB, AcciMap and STAMP models*. Accident Analysis & Prevention, 68, 75-94.

Varenne, F. (2008). *Epistémologie des modèles et des simulations*. Colloque « Les modèles : possibilités et limites », Société Française de Physique. BNF, 2008.

Varenne, F. (2012). *Théorie, réalité, modèle*. Paris: Editions Matériologiques.

Vincent C., Taylor-Adams S., Stanhope N. (1998). *Framework for analyzing risk and safety in clinical medicine*. BMJ 1998;316:1154.

Walker M. (2003). *Reasoning with the Reason Model*. ASASI 2003 – Australian Transport Safety Bureau. Conference.

Walliser, B. (1977). *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes*. Paris : Seuil.

Walliser, B. (2005). *Les modèles économiques, en particulier la théorie des jeux, aident-ils à comprendre l'économie et à prendre des decisions ?* Séminaire du 29 janvier 2005, Philosophie & Management « *Question Time »*.

Watzlawick, P., Weakland, J. H., Fisch, R., & Furlan, P. (1975). *Changements: paradoxes et psychothérapie*. Ed. du Seuil.

Weick, K., Ashford, S. J. (2001). *Learning in organizations.* The new handbook of organizational communication: Advances in theory, research, and methods, 704, 731.

Weick, K., Sutcliffe, K., Obstfeld, D. (1999). *Organizing for high reliability*. Research in Organizational Behavior, 21: 81–123.

Welford, A.T. (1968). *Fundamentals of skill*. London: Methuen.

Wiegmann, D.A. & Shappell, S.A. (2003). *A human error approach to aviation accident analysis: The human factors analysis and classification system.* Burlington, Vermont, USA: Ashgate Publishing Ltd.

Willett, G. (1996). *Paradigme, théorie, modèle, schéma: qu'est-ce donc* ? Communication et organisation, (10).

Young M., Shorrock J., Faulkner J., Braithwaite G. (2004). *Who moved my (Swiss) cheese? The (r)evolution of human factors in transport safety investigation.* ISASI, Gold coast 2004, Australia.

GLOSSAIRE

ANRT : Association Nationale de la Recherche et de la Technologie

ATSB : Australian Transport Safety Bureau

BETCGB : Bureau d'Etudes Techniques et de Contrôle des Grands Barrages

BMJ : British Medical Journal

CFBR : Comité Français des Barrages et Réservoirs

CIFRE : Convetions Industrielles de Formation par la REcherche

CIGB : Commission Internationale des Grands Barrages

CIH : Centre d'Ingénierie Hydraulique

CREAM : Cognitive Reliability and Error Analysis Method

DPIH : Division Production Ingénierie Hydraulique

DREAL : Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

ECHO : Evaluation et Cotation des dimensions Humaines et Organisationnelles

EDD : Etude(s) De Dangers

EI : Evènement Initiateur

ENEL : Ente Nazionale per l'Energia Elettrica

ERC : Evènement Redouté Central

FRAM : Functional Resonance Analysis Method

GEMS : Generic Error Modelling System

GT-EDD : Groupe de Travail Etudes De Dangers

GU : Groupement d'Usines

HFACS : Human Factors Analysis and Classification System

HRA : Human Reliability Analysis

HRO : High Reliability Organisation (organisation hautement fiable)

ICPE : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

MAO : Modèle(s) d'Accident(s) Organisationnel(s)

MMR : Mission Maîtrise des Risques

MRO : Maîtrise des Risques Opérationnels

NAT : Normal Accident Theory (théorie de l'accident normal)

PHE : (cote des) Plus Hautes Eaux

REX : Retour d'EXpréience

RN : (cote de) Retenue Normale

SAA : Systemic Accident Analysis

SADE : Società Adriatica Di Elettricità

SCM : Swiss Cheese Model

SGS : Système de Gestion de la Sécurité (ou Système de Gestion de la Sûreté)

SRK : Skill Rule Knowledge

STAMP : Systems-Theoretic Accident Model and Processes

TAO : Théorie de l'Accident Organisationnel

TMI : Three Mile Island

UP : Unité de Production

USBR : United State Bureau of Reclamation

USGS : United State Geological Survey

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Fonctions des grands barrages dans le monde. En bleu les barrages à fonction unique, en orange ceux à fonctions multiples. Les trois usages principaux des barrages sont l'irrigation des cultures, la production d'hydroélectricité et l'approvisionnement en eau (CIGB, 2015a). 13
Figure 2 : Les trois principaux types de barrages. A gauche, le barrage poids-remblai (a), en son cœur, en noir sur le schéma, est représenté le noyau étanche. Au centre, le barrage poids-béton (b), possède une emprise au sol plus limitée du fait de la densité de ses matériaux plus élevée que les poids-remblai. A droite, le barrage voûte (c) est une technique de construction plus récente, économique et souvent considérée élégante ; il est toutefois réservé aux canyons ou aux vallées encaissées. 14
Figure 3 : Le barrage de Daniel-Johnson (à gauche) mesure 1 314 mètres de long et présente 13 voûtes, une principale au centre et 6 secondaires de chaque côté. Le barrage de Roselend (à droite) combine une voûte centrale et une série de contreforts pour une longueur de 804 mètres (libre de droit). 15
Figure 4 : Déversoir libre à crête circulaire de type « tulipe ». Déversoir à seuil libre. Evacuation d'eau par une vanne de vidange de demi-fond. (De gauche à droite ; source CFBR). 16
Figure 5 : Schéma de principe d'un aménagement. Dans cet exemple, l'usine est intégrée au barrage (on parle de barrage usine), ce n'est pas toujours le cas et l'usine peut être située à plusieurs kilomètres de la retenue. Une fois turbinée, l'eau est restituée à l'aval (libre de droit). 17
Figure 6 : Territoire saturé. Cette carte représente l'ensemble des barrages répertoriés en France (digues, écluses, et autres « obstacles à l'écoulement ») sans critère de hauteur (consultable en ligne sur le site CARMEN du Ministère de l'Environnement). 22
Figure 7 : Courbe et répartition type de la consommation et de la production électrique sur une période de 24 heures en France (en hiver). La production nucléaire est maintenue constante pour des raisons économiques et techniques, elle complète le faible potentiel d'hydraulique « au fil de l'eau ». La variable principale d'ajustement est l'hydraulique de lac. L'ajustement précis de l'offre à la demande est effectué par les installations STEP (pompage-turbinage). Elles permettent de stocker de l'eau dans un lac situé à une altitude supérieur à l'usine (stockage d'énergie potentielle). Lorsque la demande est basse (0h-6h) l'excédent de production nucléaire est utilisé pour pomper l'eau. En période de pics (21h) cette eau est turbinée pour produire de l'électricité. (Syndicat des Energies Renouvelables). 24
Figure 8 : Mix énergétique du groupe EDF en 2015 (d'après le site internet d'EDF) 25
Figure 9 : Nombre de victimes liées à des accidents survenus dans le domaine énergétique de 1907 à 2007 (Sovacool, 2008) 30
Figure 10 : à gauche, le barrage au printemps 1959, au premier plan on observe la culée en béton constituant l'appui rive gauche de l'ouvrage. A droite, le barrage rempli (1959). 34
Figure 11 : Graphique représentant le niveau du réservoir de 1955 à 1959. L'encart représente le niveau lors des quatre jours précédant la rupture. Les points A – D, les dates des mesures géodésiques réalisées sur le barrage (Mary, 1968). 35
Figure 12 : Schéma des sous-pressions des fondations de Malpasset (source : Lithothèque Académie Aix-Marseille) 36
Figure 13 : Photos du barrage du Vajont pendant les travaux (à gauche) et une fois achevé (à droite). 37
Figure 14 : La courbe du haut montre le niveau de la retenue du barrage de 1961 à 1963. La courbe du bas représente la vitesse d'ouverture de la faille au gré des mouvements de terrain sur cette même période (Semenza, 2002). 1) Première apparition d'une fissure en surface. 2) Premier éboulement après une semaine de fortes pluies, la faille devient visible mais reste considérée superficielle. 3) Mise en place du by-pass. 4) La fracture s'élargit de plusieurs mètres. 5) Des secousses sismiques sont ressenties dans la vallée, des maisons fissurées, mais le second remplissage se poursuit. Le glissement atteint une vitesse d'1,5 cm par jours. 6) A

l'hiver 1962, la côte 700 est atteinte puis le niveau de la retenue est diminué. Les secousses cessent. 7) La retenue atteint la cote 722.50 m NGF. *38*
Figure 15 : La photo de gauche présente une vue de la ville de Longarone avant la catastrophe (le 9 octobre 1963), celle de droite, de la ville une semaine après (mises en lignes par le site officiel de la catastrophe : www.vajont.net). *39*
Figure 16 : Photo de la brèche ouverte en rive droite du barrage de Grand Teton, en référence d'échelle la partie intègre du barrage, visible en bas à droite, mesure 93 mètres (source : IDAHO-L-0010 by WaterArchives.org - Sacramento, California, USA). *42*
Figure 17 : Représentation graphique d'un nœud papillon type. Légende : Ein / EI : évènement indésirable / évènement initiateur, dans les EDD de barrages on ne parlera que d'EI, ce peut être une cause externe, d'origine naturelle, non naturelle ou une cause interne. ERC : évènement redouté central, évènement conduisant à la libération du potentiel de danger. PhD/EM : phénomènes dangereux / effets majeurs : phénomène physique pouvant provoquer des dommages majeurs sur les tiers, les biens ou l'environnement, dans les EDD de barrages on assimile le phénomène dangereux à ses effets majeurs (d'après le guide PPRT ; INERIS, 2007). *59*
Figure 18 : Une porte OU entre deux initiateurs (évènements 1 et 2) implique de retenir en sortie la probabilité d'occurrence la plus élevée : ici B. *60*
Figure 19 : Une porte ET entre deux initiateurs (évènements 1 et 2) diminue la probabilité de « sortie ». *60*
Figure 20 : historique des EISH de la DPIH (Batoufflet, 2014) *65*
Figure 21 : articulation des quatre dimensions étudiées pour la cotation des EI-FH (méthode 2012). *85*
Figure 22 : Principales ères dans la gestion de sécurité industrielle (adapté de Groeneweg, 2002). *94*
Figure 23 : Proposition de positionnement de différents objets de la connaissance. *107*
Figure 24 : Représentation alternative du corpus bibliographique. Les publications d'ouvrages marquent l'achèvement de « périodes de recherche » consacrées à un thème principal (Larouzée & Guarnieri, 2015a). . *114*
Figure 25 : Modèle GEMS (Generic Error Modelling System). Cette figure représente le traitement cognitif des problèmes. Les trois divisions horizontales correspondent aux trois niveaux de l'échelle SRK. A chaque niveau est associé un type d'erreur. RB signifie « Rule-Based », KB « Knowledge-Based » (adapté de Reason, 1990b). *118*
Figure 26 : Taxinomie de l'erreur humaine selon James Reason. La première distinction entre deux actes non sûrs est l'aspect volontaire (ou non) de l'action. Les distinctions suivantes dépendent du niveau de contrôle de l'activité. A chaque type d'erreur sont associés des facteurs explicatifs (à l'extrémité droite de l'arborescence) (Reason, 1990b). *119*
Figure 27 : Eléments basiques de production constituant les éléments invariants, nécessaires, de tout système productif (d'après Reason, 1990b). *123*
Figure 28 : Différentes sources de défaillances. La distinction est faite entre les erreurs actives et les défaillances latentes. Les faiblesses ou l'inadéquation des barrières (symbolisées par un trou), peuvent être le fait de défaillances latentes et/ou d'erreurs actives (d'après Reason, 1990b). *124*
Figure 29 : Version alternative du modèle Mk I (Reason, 1990b). Dans cette représentation, l'accident est vu comme la combinaison complexe de (1) précurseurs psychologiques induits par ce qui sera nommé plus tard des « conditions latentes », auxquelles s'ajoutent (2) un ou des actes « non sûrs » et (3) une défaillance simultanée des barrières mises en places sur le système, articulée selon les concepts de la « défense en profondeur ». *125*
Figure 30 : Modèle Mk II de l'accident organisationnel. Ce modèle suggère que les barrières d'un système peuvent être affectées directement par les décisions managériales (chemin du bas). Cependant ces décisions peuvent également se diffuser dans l'organisation (chemins du haut), créant dans les espaces de travail les précurseurs aux erreurs ou violations (erreurs actives) des opérateurs. (D'après Reason, 1993b). *127*
Figure 31 : Version alternative du Modèle Mk II. Cette version intègre les General Failures Types (GFTs) de la méthode TRIPOD (Reason et al., 1989). *128*
Figure 32 : Autre version alternative du Modèle Mk II. Cette représentation soutient l'aspect systémique de l'OAT en adoptant une orientation verticale et en représentant l'accident comme la perte de contrôle sur les risques (hazards). Elle introduit deux chemins distincts pour les défaillances ainsi que la distinction entre culture et climat. Enfin, les doubles flèches horizontales indiquent les rétroactions existant entre les facteurs locaux et organisationnels, humains et techniques. (Morino, Reason, et al. 1995). *129*

Figure 33 : Modèle Mk III. Présente trois éléments basiques d'un accident (danger, défenses et pertes) et les facteurs de risques pouvant conduire à l'accident en altérant les défenses du système. (Reason, 1997). 130
Figure 34 : Le modèle d'accident organisationnel tel que présenté dans l'article BMJ par Reason. Le texte explique la distinction entre erreurs actives et conditions latentes. La représentation graphique, elle, est uniquement produite à des fins heuristiques et ne fait apparaître aucun label (Reason, 2000b). 132
Figure 35 : Genèse du SCM. Présentation des principales collaborations et influences dans la conception du modèle paradigmatique d'accident organisationnel de James Reason (en orange, le « chemin direct » ; en bleu les influences et contributions). 134
Figure 36 : La balance entre production et protection expliquée à travers les facteurs influençant les décisions du haut management d'une organisation (Reason, 1990b). 136
Figure 37 : « Itinéraire » d'une organisation hypothétique dans l'espace « production - protection » (Reason, 1997). 136
Figure 38 : Classification des types et token inspirée par Patrick Hudson lors du développement de la théorie Tripod au début des années 1990 (Reason, 1993a). 137
Figure 39 : Modèle « pathogène » d'accidents (Reason, 1993a). 138
Figure 40 : Agrégation de différents modèles de Reason (1990b, 1993, 1997, 2000). En orange, le lien entre la vision macroscopique et mésoscopique de l'accident. En vert, une explication mésoscopique des défaillances dans les barrières (N.B. : le « SCM » (2000) a été replacé dans la version Mk III (1997) où il s'insère parfaitement). A droite, en bleu, jaune et rouge, les modèles « microscopiques » permettant de finaliser la chaîne. Nous illustrons ici l'idée « qu'une théorie est l'ensemble de ses modèles ». 139
Figure 41 : Quelques appropriations du modèle de Reason. Le nombre de tranches, le niveau de détail, l'orientation, les différents labels, sont adaptés par les utilisateurs du modèle. (Google Image ; mots clés Swiss Cheese Model, 2014). 141
Figure 42 : Les trois éléments fondateurs de la philosophie Tripod (d'après Reason, 1997). 142
Figure 43 : Diagramme d'état d'une unité opérationnelle diagnostiquée avec la méthode Tripod DELTA. Plus une barre est grande plus il importe de considérer le GFT dans les mesures de prévention. (Hudson et al., 1994). . 143
Figure 44 : Les onze GFTs de la méthode Tripod BETA 143
Figure 45 : Le modèle du Château Suisse. L'équipe, représentée par le donjon, constitue à la fois la dernière défense et un enjeu à protéger. (Jones, 2008). 151
Figure 46 : Le "hot cheese" modèle propose de modifier la représentation des barrières par des tranches horizontales de fromage fondu pour supporter l'effet potentiellement négatif de la mise en place de nouvelles barrières de défense (Li & Thimbleby, 2014). 151
Figure 47 : Processus d'ingénierie d'un dispositif pour améliorer la prise en compte des EI-FH dans les EDD de la DPIH. 155
Figure 48 : Classification de différents types de systèmes sociotechniques dans le plan « représentabilité ; couplage ». On remarque la position singulière des barrages (cercle rouge) avec un couplage serré et une importante capacité à décrire l'état du système à un instant donné. D'après Hollnagel & Spieziali (2008). 162
Figure 49 : Classification des méthodes d'analyse d'accidents représentant les barrages (dams) et deux des méthodes exploitées dans notre démarche de conception d'un dispositif FOH pour les EDD : Tripod (SCM) et CREAM. (D'après Hollnagel & Speziali, 2008). 163
Figure 50 : Modèle FOH-EDD. Deux lectures sont possibles (1) en partant de l'homme (H), du centre vers l'extérieur ou (2) de gauche à droite avec une vision fonctionnelle où l' « activation » précède l'action humaine. 175
Figure 51 : L'objectif de notre démarche peut être vu comme la détermination d'un dispositif reproductible et justifiable permettant d'attribuer à une situation d'exploitation donnée une classe (de probabilité) d'occurrence. 177
Figure 52 : Les 9 dimensions permettent une première réduction du réel par leur étude qualitative et pluridisciplinaire ainsi que l'attribution, à chacune, d'un « état » par choix-multiples. En vert la phase de mathématisation vise à automatiser le passage des 23328 configurations aux 3 classes d'occurrences. 181

Figure 53 : Matrice d'interrelations entre les 9 dimensions du dispositif FOH-EDD. La présence d'une croix signifie que la dimension en colonne impacte corrélativement la dimension en ligne. Les lignes « environnement de travail » et « travail en équipe » sont neutralisées. 183
Figure 54 : Matrice de cotation des EI-FH. Les plages associées à chaque classe ont été définies d'après la méthode CREAM et adaptées empiriquement aux EDD d'EDF DPIH. La zone grisée correspond à des points d'arrêt pour le groupe de travail. 186
Figure 55 : Ecran de prise en main de l'interface ECHO. Le bloc 1 permet l'identification de l'ouvrage et de l'EI-FH considéré, le bloc 2 est utilisé pour le recueil des éléments d'analyse du GT-EDD et les états des neuf dimensions, le bloc 3 permet de justifier une modification de la classe d'occurrence proposée. 187
Figure 56 : Synthèse du processus d'ingénierie du dispositif ECHO destiné aux EDD de la DPIH. Les deux premières phases ont été consacrées à la définition des objectifs. Les quatre phases de la conception initiale à l'opérationnalisation résultent des travaux de l'équipe de conception. Les deux dernières phases ont été exploitées afin de tester le dispositif, de l'ajuster puis d'en observer le déploiement opérationnel. 205
Figure 57 : typologie des modèles et condition d'existence des « sur-modèles » (d'après Rey, 2010)..... 217
Figure 58 : Les trois axes de classification énoncés par l'auteur définissent graphiquement un « espace modèle » dans lequel situer ces objets pour les comparer (d'après Walliser, 1977) 218
Figure 59 : Liste des modèles et des méthodes, classée puis discutée par Letho et Salvendy (1991) 221
Figure 60 : Classification des modèles d'accidents sur des attributs méthodologiques (Hollnagel, 2011). 224
Figure 61 : Classification des modèles d'accidents et représentation temporelle (Hollnagel, 2010). 224
Figure 62 : La classification des modèles d'accidents d'Hollnagel constitue une approche causale de l'exercice (représentée en rouge, pointillés) or, rien ne semble justifier d'exclure, par exemple, une approche matricielle (proposée en bleue, traits pleins). (Modifié d'après Hollnagel, 2011). 225
Figure 63 : Correspondance entre les modèles d'accidents (à gauche) et les différentes méthodes d'investigation (à droite). S'il est presque trivial qu'un modèle soit « à l'origine » de plusieurs méthodes, on remarque qu'une méthode (ex : SCAT) mobilise plusieurs modèles. (Adapté de Katsakiori et al., 2009). 226
Figure 64 : Cadre d'étude général pour l'étude des publications sur les accidents industriels (Le Coze, 2013b). 227
Figure 65 : Trois états des connaissances sur l'accident par analogie avec le Rubik's Cube™. Les travaux de recherche en safety sciences peuvent dès lors contribuer à renseigner sur de nouveaux objets ou processus et ainsi compléter le corpus (A) ou tenter d'articuler suivant un cadre voulu universel des connaissances préexistantes (B). 227
Figure 66 : Structure de contrôle type pour un système sociotechnique (adapté de Leveson, 2005 par Hardy, 2010). 232
Figure 67 : Défaillances dans une boucle de contrôle (adapté de Leveson, 2010 par Hardy, 2010). 233
Figure 68 : Résumé des phases statiques (étapes 1 à 5) et dynamiques (étapes 6 et 7) de la méthode STPA (adapté de Leveson, 2004 par Hardy, 2010). 234
Figure 69 : Codage des fonctions FRAM, les six attributs sont les inputs (i) ou « entrées » de la fonction, les outputs (o) ou « sorties », les ressources (r) et le temps (t) nécessaires à la réalisation de la fonction, les contrôles (c) ou contraintes qui régissent l'exécution de cette fonction et les préconditions (p) qui représentent les éléments qui doivent être satisfaits ou réunis pour que la fonction puisse être réalisée (Hollnagel, 2012). . 236
Figure 70 : Exemple de réseau FRAM où chaque hexagone représente une fonction ou une activité du système caractérisée par son type (humaine, H ; technique, T ; organisationnelle, O). Les connexions entre les fonctions représentent leurs interdépendances (d'après Belmonte et al., 2008). 237
Figure 71 : 'déjà vu' analogie entre la safety decade et une suite d'accidents, survenus dans divers domaines, depuis le début des années 2000 (Le Coze, 2013a). 253

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse : principaux types de barrages, matériaux constitutifs, avantages et inconvénients (techniques, structurels et économiques). 15
Tableau 2: Années de mise en service des barrages français (h > 15m). Plus de 60 % des grands barrages ont été construits et mis en service entre 1945 et 1990 (CFBR, 2015). 22
Tableau 3 : Classes d'ouvrages en France, selon le décret 2007-1735 de 2007. 23
Tableau 4 : Obligations réglementaires du responsable d'un ouvrage hydraulique et fréquences d'actualisation, en fonction de sa classe..... 55
Tableau 5 : Titre des chapitres d'un EDD et résumé de leurs contenus. 57
Tableau 6 : composition « type » d'un GT-EDD de la DPIH, les principales contributions attendues sont résumées par fonction. 58
Tableau 7 : Grille définissant 5 classes de probabilité d'occurrence. Dans le cas des EDD d'EDF, seule l'appréciation qualitative est utilisée, les probabilités affichées le sont donc sous formes de lettres (A à E) et non quantifiées. (D'après l'annexe 1 MEDDE, 2005). 61
Tableau 8 : Classes d'occurrences utilisées dans la cotation des EDD de la DPIH (2015). 61
Tableau 9 : Liste des mots clefs utilisés pour le repérage des publications. 72
Tableau 10 : Synthèse des publications relatives aux FOH dans la sûreté des barrages. Les catégories portent sur l'institution (A : académique / I : industrielle) et sur l'objet des travaux (REX : post-accidentel / PRO : diagnostic proactif). 73
Tableau 11 : « Best practices for dam safety » d'après Alvi (2015). 76
Tableau 12 : Principales différences entre les théories HRO et NAT (adapté de Sagan, 1993 ; d'après Hardy, 2010 p. 42). 100
Tableau 13 : Proposition d'une méthodologie de caractérisation des modèles d'accidents. 109
Tableau 14 : Découpage du corpus bibliographique étudié et nature des apports potentiels. 111
Tableau 15 : Principaux thèmes de recherche de James Reason (Larouzée et al., 2014b). 114
Tableau 16 : Liste non exhaustive des milieux d'application des travaux de James Reason (Larouzée et al., 2014b). 144
Tableau 17 : Adaptation de la matrice de Martel & Rousseau à notre processus d'ingénierie. 157
Tableau 18 : Composition du groupe de travail et contributions de ses membres aux EDD de la DPIH. 158
Tableau 19 : Résumé des modalités d'accès aux terrains, cibles et méthodes. 160
Tableau 20 : Méthodes sélectionnées et critères de choix. Tripod et CREAM ne sont pas spécifiques aux ouvrages hydrauliques mais « adaptées » par leurs modèles sous-jacents et modes opératoires. La méthode FOP a été développée par la R&D d'EDF et le Guide FH 2012 était, à notre connaissance, la seule méthode dédiée aux barrages. 169
Tableau 21 : Références relatives aux quatre méthodes présélectionnées. A titre indicatif sont rapportées les noms et nombre d'indicateurs de chaque méthode. 172
Tableau 22 : Comparaison des "indicateurs" respectifs des quatre méthodes présélectionnées. L'ordre des indicateurs correspond, ici, à une volonté de regroupement thématique avec comme méthode de référence Tripod (choix arbitraire), il ne soutient ni l'idée de gradation d'importance des indicateurs, ni celle de priorité d'analyse. 173
Tableau 23 : Les dimensions retenues pour la construction d'un modèle FOH-EDD et leurs définitions respectives. A un premier niveau, ces dimensions peuvent être regroupées suivant qu'elles portent sur le contexte ou la temporalité de l'activité (vert), sur les interactions entre l'individu et le système technique (orange) ou sur l'organisation de l'activité (bleu). 174
Tableau 24 : Les neuf dimensions d'ECHO, leurs états admissibles et leurs scores associés. 182

Tableau 25 : Exemple d'effet produit par les règles complémentaires sur le score de la dimension « temps disponible ». *185*
Tableau 26 : Synthèse des rôles des différents acteurs en fonction des phases de production d'une EDD. *189*
Tableau 27 : Synthèse des effets d'ECHO observés après son déploiement opérationnel, en comparaison des deux approches précédentes des EI-FH. *204*
Tableau 28 : Synthèse comparative des divergences entre deux écoles de pensée sur les modèles d'accidents. *246*

THEORIE ET PRATIQUE DES MODELES D'ERREUR HUMAINE DANS LA SECURITE DES BARRAGES HYDROELECTRIQUES : LE CAS DES ETUDES DE DANGERS DE BARRAGES D'EDF.

RESUME : Cette thèse présente des travaux de deux natures différentes ; (1) l'étude approfondie des travaux de James Reason (*Swiss cheese model*) et (2) l'activité d'ingénierie d'un modèle (ECHO) pour l'étude des facteurs organisationnels et humains dans l'exploitation des barrages d'EDF. Ces travaux sont articulés autour de la question du rôle, de la valeur et de la place des modèles d'erreur humaine dans la gestion de la sécurité industrielle.

Une revue de littérature montre que les dispositions de sécurité dans les barrages sont essentiellement techniques. Les considérations relatives au facteur humain, bien que prégnantes dans l'accidentologie, semblent faire défaut dans les pratiques. Constatant sa très large utilisation, nous présentons en détail le modèle de Reason. Nous mettons en lumière une « double » collaboration (peu documentée) entre *recherche* et *industrie* d'une part, *sciences humaines* et *sciences de l'ingénieur* d'autre part. Partant de cette *double collaboration* comme une condition de réussite à des évolutions culturelles de sécurité, nous présentons le processus d'ingénierie qui a permis la conception puis la mise en place d'un modèle *facteur humain* dans les études de dangers de barrages d'EDF. Nous tentons enfin de mesurer et de présenter les effets produits par ECHO sur les représentations et les pratiques.

La discussion porte sur l'intérêt et les modalités de *double collaboration* dans la sécurité industrielle et espère contribuer à un recadrage du débat sur la *nature* et la *valeur* des modèles.

Mots clefs : modèles d'accidents, Swiss cheese model, facteurs organisationnels et humains, barrages, études de dangers

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN ERROR MODELS IN HYDROELECTRIC DAMS SAFETY: THE CASE OF EDF POWER DAMS' HAZARD STUDIES.

ABSTRACT: This thesis presents two different works: (1) an in-depth study of James Reason's work (*Swiss cheese model*) and (2) the engineering activity of a model (ECHO) of organizational and human factors in operation of EDF's dams. These works are articulated regarding the role, value and place of human error models in industrial safety management.

A literature review shows that dams' safety is mainly based on technical issues. The considerations relating to human factors, although pervasively present in the accidents, seem to be lacking in practice. After its wide use, we present in detail the Reason's model. We highlight a *double* collaboration (poorly documented) between research and industry on the one hand, Humanities and engineering Sciences on the second hand. Based on this dual partnership as a success condition for efficient safety culture developments, we present the engineering process associated with the design and the implementation of a human factor model in EDF dams' hazards study. Finally, we try to measure and report the effects produced by ECHO on the representations and practices.

The discussion focuses on the interest and modalities for *double collaboration* in industrial safety and, therefore hopes to contribute to reframe the debate on model's nature and value.

Key words: accident models, Swiss cheese model, human and organizational factors, power dams, hazard studies

MINES ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY