

Sécurité des machines : méthodologie d'identification systématique des phénomènes dangereux en conception

Nicholas de Galvez

▶ **To cite this version:**

Nicholas de Galvez. Sécurité des machines : méthodologie d'identification systématique des phénomènes dangereux en conception. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2016. Français. NNT : 2016ENAM0052 . tel-01447385

HAL Id: tel-01447385
https://pastel.hal.science/tel-01447385

Submitted on 26 Jan 2017

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

ARTS ET MÉTIERS ParisTech



2016-ENAM-0052

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Conception "

présentée et soutenue publiquement par

Nicholas de GALVEZ

Le lundi 12 décembre 2016

Sécurité des machines : méthodologie d'identification systématique des phénomènes dangereux en conception

Directeur de thèse : **Patrick MARTIN**
Co-encadrement de la thèse : **Alain ETIENNE et Ali SIADAT**

Jury

M. Benoît IUNG, Professeur des Universités, CRAN, Université de Lorraine	Président
M. Alain BERNARD, Professeur des Universités, IRCCyN, Ecole Centrale de Nantes	Rapporteur
M. Michel TOLLENAERE, Professeur des Universités, G-SCOP, Grenoble INP	Rapporteur
M. Yuvin CHINNIAH, Professeur des Universités, Ecole Polytechnique de Montréal	Examinateur
M. Lionel ROUCOULES, Professeur des Universités, LSIS, ENSAM Aix en Provence	Examinateur
M. Alain ETIENNE, Maitre de Conférences, LCFC, ENSAM Metz	Examinateur
M. Patrick MARTIN, Professeur émérite, LCFC, ENSAM Metz	Examinateur
M. Ali SIADAT, Professeur des Universités, LCFC, ENSAM Metz	Examinateur
M. Jacques MARSOT, Ingénieur de recherche, CPI, INRS	Examinateur
M. Loïc COLIN, Ingénieur, LORMAC Automation	Invité

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Campus de Metz
Laboratoire Conception Fabrication Commande - LCFC

Remerciements

J'ai l'opportunité d'écrire ces mots durant les derniers jours qui précèdent l'évaluation de ce mémoire. Il m'a fallu 3 ans pour arriver à ce point, non sans une certaine émotion vis-à-vis des multiples évènements professionnels et personnels qui ont jalonnés ces années. Durant cette période, j'ai été poussé dans mes limites, j'ai découvert énormément de choses relatives ou non à cette thèse, j'ai eu l'occasion de défendre mes idées dans différentes langues et dans différents endroits, mais surtout, j'ai eu l'occasion de rencontrer de nombreuses personnes qui ont toutes contribuées à leur manière à l'aboutissement de cette thèse. Cette partie vous est consacrée afin de vous exprimer toute ma gratitude pour m'avoir permis d'achever ce travail clôturant près de 10 années d'études dans les domaines de l'ingénierie, de la conception et de la sécurité des machines.

Je remercie tout d'abord les professeurs **Alain Bernard** et **Michel Tollenaere**, rapporteurs qui évalueront ce mémoire, mais également les professeurs **Yuvin Chinniah**, **Benoit Iung** et **Lionel Roucoules** qui complètent le jury devant lequel je défendrai ce travail. Je vous remercie d'avoir accepté de participer à mon évaluation et je souhaite que vous soyez aussi satisfaits que j'espère l'être le 12 décembre prochain.

Je présente mes remerciements à LORMAC Automation et plus particulièrement au responsable du bureau d'études, **Loïc Colin**, et son équipe pour m'avoir fourni les données d'un cas industriel et pour leur disponibilité.

Je remercie ensuite la précédente responsable du département IET (INRS), **Séverine Brunet**, et l'actuel responsable, **Jacques Chatillon**, pour m'avoir permis de réaliser dans des conditions idéales mon doctorat, mais aussi pour leurs conseils et leur bienveillance à mon égard.

Je souhaite ensuite exprimer ma plus profonde gratitude au professeur émérite du LCFC, **Patrick Martin**, pour avoir dirigé cette thèse et pour m'avoir permis de fournir un travail de qualité par ses remarques constructives, sa disponibilité, ses conseils et ses encouragements.

Cette même gratitude est adressée au responsable du laboratoire CPI de l'INRS et co-encadrant de cette thèse, **Jacques Marsot**, pour sa patience tout au long de cette thèse mais également pour son implication, ses conseils, son orientation et sa disponibilité.

Je remercie également le professeur et co-encadrant de cette thèse, **Ali Siadat**, pour ces conseils et ses remarques constructives sur ce travail de recherche et sur les différents enseignements que j'ai pu donner.

Je remercie enfin **Alain Etienne**, maitre de conférences au campus de Metz des Arts et Métiers et dernier co-encadrant de cette thèse, pour m'avoir conseillé, pour ses remarques avisées et pour m'avoir poussé à mon maximum durant ces 3 années.

J'adresse ensuite un grand merci à tous les membres du département IET et de l'INRS et plus particulièrement **Bruno**, **Aurélien, Nellie**, **Jonathan**, **Maël**, **Mélina**, **Pierre**, **Fabien**, **Ghislaine**, **Patrice**, **David**, **Patrick**, **Florence**, **Adel** et **Evelyne**, à **Xavier** pour ses conseils, son soutien et son amitié, aux doctorants du LCFC, **Ismail**, **Roozbeh**, **Fan**, **Qing** et tous ceux que je ne peux pas citer pour m'avoir permis de travailler dans une excellente ambiance et pour leur écoute tout au long de ces trois années.

J'adresse également mes remerciements à **Adrien**, **Alexandre**, **Perrine**, et **Matthieu** pour leur soutien et leur amitié tout au long de cette thèse.

Et bien entendu, je remercie mes parents, **Jésus** et **Sylvie**, mon frère **Jonathan**, sa femme **Emilie**, leur jeune fils **Jean-Baptiste** et ma sœur **Laura** ainsi que tous les autres membres de ma famille pour leur soutient inébranlable, leur patience à mon égard et leurs heures consacrées à la relecture de ce mémoire.

Liste des abréviations

ANACT	Agence nationale pour l'amélioration des conditions de travail
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité
BPMN	Business Process Model and Notation
CARSAT	Caisse d'Assurance Retraite et de la Santé au Travail
CGSS	Caisse Générale de Sécurité Sociale
CPI	Conception - équipements de Protection - Interfaces homme-machine
CRAM	Caisse Régionale d'Assurance Maladie
CTN	Comité Technique National
EPICEA	Etudes de Prévention par l'Informatisation des Comptes rEndus d'Accidents
EZID	Energy analysis for systematic haZard Identification during Design
FBS	Function - Behavior - Structure
IBD	Internal Block Diagram
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
IPRP	Intervenant en Prévention des Risques Professionnels
LC2S	Laboratoire de Conception de Systèmes Sûrs
LCFC	Laboratoire Conception Fabrication Commande
MFE	Modèle Fonctionnel Energétique
MFS	Modèle Fonctionno-Structurel
NAF	Nomenclature d'Activités Française
OPPBTP	Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics
PME	Petites et Moyennes Entreprises
REM	Représentation Energétique Macroscopique
SADT	Structured Analysis and Design Technique
SF	Surface Fonctionnelle
TPE	Très Petites Entreprises
TRIZ	Teorija Reshenija Izobretateliskih Zadatch

Glossaire

La littérature fournissant de nombreuses définitions pour certaines expressions, par exemple pour « démarche de conception » (Hasan, 2002), il est nécessaire d'établir ce glossaire et de fournir les définitions retenues dans ce mémoire.

Vocabulaire	**Définition**	**Source**
Activité de conception	Action de générer l'ensemble des données permettant de fabriquer un produit répondant aux besoins d'un client en mobilisant des connaissances scientifiques, technologiques, du savoir-faire métier	(Godot, 2013)
Démarche de conception	Ensemble d'activités répondant à un ou plusieurs objectifs faisant passer du besoin à la définition de la solution.	Adapté de (AFIS, 2016)
Dommage	Blessure physique ou atteinte à la santé.	(Norme, 2010b)
Données de conception produit	Ensemble des données contribuant à décrire un produit.	(Godot, 2013)
Effet externe	Objet qui agit en tant que contrainte (positive ou non) sur le système processus/produit/ressource considéré. Il participe à la définition du contexte et peut être prévisible ou non. Il influe sur le déroulement des activités.	(Labrousse, 2004)
Equipement de travail	Toute machine, appareil, outil ou installation, utilisés au travail.	(Directive, 2009)
Machine	Ensemble de pièces ou d'organes liés entre eux, dont au moins un est mobile, auxquels sont associés, selon les besoins, des actionneurs, des circuits de commande et de puissance, réunis de façon solidaire en vue d'une application définie, notamment pour la transformation, le traitement, le déplacement et le conditionnement d'un matériau. Le terme «machine» désigne aussi un ensemble de machines qui, afin de concourir à un même résultat, sont disposées et commandées de manière à être solidaires dans leur fonctionnement.	(Norme, 2010b)
Machine spéciale	Machine conçue pour répondre à un besoin spécifique ne pouvant être atteint par des solutions génériques (absence de norme de type C).	
Méthode de conception	Ensemble d'activités ou de sous-activités que le concepteur doit utiliser et intégrer dans un processus de conception.	Adapté de (Cross & Roy, 1989)

Modèle	Représentation partielle d'une réalité dans le but d'en extrapoler certaines caractéristiques.	(Godot, 2013)
Moyen de conception	Elément utilisé par le concepteur durant une activité ou tâche de conception (ex. outil, modèle).	
Outil de conception	Elément manipulé par le concepteur comme support à la réalisation d'une ou plusieurs activités ou sous-activités de conception.	Adapté de (Cross & Roy, 1989)
Paramètre énergétique	Caractéristique d'une accumulation ou d'un échange d'énergie.	
Phénomène dangereux	Source potentielle de dommage(s).	(Norme, 2010b)
Phénomène dangereux pertinent	Phénomène dangereux identifié comme existant sur une machine ou associé à une machine.	
Phénomène dangereux significatif	Phénomène dangereux identifié comme pertinent et qui nécessite, d'après l'appréciation du risque, une action spécifique du concepteur pour éliminer ou réduire le risque.	
Processus	Organisation séquentielle, spatiale et hiérarchique d'activités faisant appel à des ressources et conduisant à des produits.	(Labrousse, 2004)
Risque	Combinaison de la probabilité d'un dommage et de la gravité de ce dommage.	(Norme, 2010b)
Risque industriel	Evénement accidentel se produisant sur un site industriel et entraînant des conséquences immédiates graves pour le personnel, les populations avoisinantes, les biens et/ou l'environnement.	(Cyprès, 2016)
Risque professionnel	Evénement dont l'occurrence met en danger des personnes dans le cadre de l'exercice de leur métier.	(Prévention, 2012)
Risque résiduel	Risque subsistant après que des mesures de prévention ont été appliquées.	(Norme, 2010b)
Tâche de conception	Action de conception élémentaire.	(Godot, 2013)

Avant-propos

Cette thèse est réalisée dans le cadre du laboratoire commun LC2S (Laboratoire de Conception de Systèmes Sûrs) composés du LCFC (Laboratoire de Conception Fabrication Commande - lcfc.ensam.eu) des Arts et Métiers et du laboratoire CPI (Conception, équipements de Protection et Interface homme-machine) de l'INRS (www.inrs.fr).

Les travaux du LCFC portent sur la formalisation des connaissances (technologiques et organisationnelles), la validation de la pertinence des modèles et des démarches proposées dans un souci de cohérence, de robustesse, de gestion des incertitudes et d'optimisation globale liées aux procédés, processus de fabrication et moyens de production. L'objectif est de disposer de modèles, démarches et outils d'aide à la décision pour la conception et la fabrication de produits de haute qualité ou la conception et la commande des moyens de production (machines, actionneurs, surveillance…) performants.

La principale mission de l'INRS est de développer et de promouvoir une culture de la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. Une mission qui répond à des exigences économiques, sociales et politiques et qui s'articule autour de quatre axes majeurs : anticiper, sensibiliser, informer et accompagner. Ses actions sont destinées aux spécialistes de la prévention et aux entreprises et salariés du régime général de la Sécurité Sociale.

Les travaux de recherche du LC2S ont donc pour objectif de développer et de formaliser de nouvelles connaissances pour l'intégration de la prévention des risques professionnels lors de la conception des équipements de travail. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail de thèse concernant plus particulièrement l'identification pour le concepteur des phénomènes dangereux générés par les principes et solutions techniques qu'il propose. Les situations dangereuses et les marges de manœuvres sont traitées dans d'autres travaux de ce laboratoire.

Ce travail fait suite aux travaux réalisés d'un Master recherche (Amara, 2013). L'approche proposée a pu être expérimentée au cours de plusieurs projets académiques et stages (Benizri et al., 2016; De La Fabrègue et al., 2015; Delpanque et al., 2014; Dulché, 2015; Nadi, 2016a, 2016b) et sur un cas industriel fourni par l'entreprise LORMAC Automation basée à Tucquegnieux (Meurthe et Moselle, France).

Ces travaux ont fait l'objet de valorisations au cours de conférences nationales (de Galvez, 2015a, 2015b ; de Galvez et al., 2014; de Galvez et al., 2015c), internationales (de Galvez et al., 2016a; de Galvez et al., 2016b) et dans le cadre d'un article en cours d'acceptation. Cette thèse a débuté au mois de septembre 2013 et a été réalisée en 3 ans.

Sommaire

REMERCIEMENTS 1
LISTE DES ABREVIATIONS 3
GLOSSAIRE 4
AVANT-PROPOS 6
SOMMAIRE 7
TABLE DES FIGURES 10
TABLE DES TABLEAUX 12
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION 13
1. Prévention des risques professionnels 14
1.1. Cadre général 14
1.2. Risques liés aux machines 15
1.3. La prévention intégrée 16
2. Les concepteurs de machines 17
3. Problématiques, objectifs et structuration du mémoire 19
CHAPITRE 2 : ANALYSE DE LA LITTERATURE 23
1. La prévention intégrée 24
1.1. Le processus d'appréciation du risque 24
1.1.1. Détermination des limites de la machine 24
1.1.2. Identification des phénomènes dangereux 25
1.1.3. Estimation et évaluation du risque 26
1.1.4. Littérature relative au processus d'appréciation du risque 27
1.2. Réduction du risque 29
1.3. Conclusion sur la prévention intégrée 30
2. Le processus de conception 31
2.1. Démarches et activités de conception 32
2.2. Méthodes et moyens de conception 33
2.3. Objets intermédiaires et données de conception 34
2.4. Conclusion sur le processus de conception 35
3. Design for Safety 35
3.1. Démarches 36
3.2. Méthodes 36
3.3. Moyens 37
3.4. Conclusion sur le Design for Safety 39
4. Modélisation de machine au travers de ses flux d'énergies 40
4.1. Lien entre énergie et phénomènes dangereux 40
4.2. Analyse de modèles de représentation des énergies 41
4.2.1. Modèles 42
4.2.1.1. Modèle substance-champ 42
4.2.1.2. Bond Graph 42
4.2.1.3. Représentation Energétique Macroscopique (REM) 43
4.2.1.4. Diagramme Sankey 43
4.2.1.5. Internal Block diagram 43
4.2.1.6. Modèle Fonctionno-Structurel 44
4.2.2. Comparaison des modèles 44
4.3. Le Modèle Fonctionno-Structurel (MFS) 46
5. Conclusion du chapitre 48
CHAPITRE 3 : EZID 49
1. La méthode EZID 50
1.1. Objectifs 50

1.2. Identification, description et formalisation des constituants de la méthode 51
1.2.1. Modélisation de la machine dans le formalisme du MFS 51
1.2.1.1. Principe de l'utilisation du MFS 51
a) Rappel sur les opérateurs et règles de modélisation 52
b) Utilisation du MFS 53
1.2.1.2. Compléments au MFS 58
a) Opérateurs complémentaire de modélisation 58
b) Règle complémentaire de modélisation 59
c) Automatisme de modélisation 59
d) Eléments génériques 62
1.2.1.3. Exemple d'application : le cric mécanique de voiture 64
1.2.1.4. Conclusion sur la modélisation 65
1.2.2. Identification des types de phénomènes dangereux 66
1.2.2.1. Construction et exploitation des indicateurs et relations avec les types 67
1.2.2.2. Application au cric mécanique de voiture 70
1.2.2.3. Conclusion sur l'identification du type 71
1.2.3. Identification détaillée des conséquences 71
1.2.3.1. Elaboration et exploitation des règles d'identification 71
1.2.3.2. Application au le cric mécanique de voiture 74
1.2.3.3. Conclusion sur l'identification des conséquences 76
1.2.4. Identification des phénomènes dangereux significatifs 76
1.2.4.1. Détermination des valeurs seuils 76
1.2.4.2. Application au cric mécanique de voiture 77
1.2.4.3. Structuration du retour d'information 78
1.2.4.4. Conclusion sur l'identification de l'aspect significatif 79
2. Exploitation d'EZID 79
2.1. Intégration des mesures de prévention dans la modélisation 79
2.2. Administration des données de références 82
2.3. Eléments pour le développement d'un logiciel basé sur EZID 83
3. Conclusion sur EZID 88
CHAPITRE 4 : APPLICATION INDUSTRIELLE DE LA METHODE 91
1. Présentation du cas industriel et du protocole expérimental 92
1.1. Présentation du cas industriel 92
1.2. Protocole expérimental 92
2. Application d'EZID 93
2.1. Phase de vie : utilisation de la ligne d'approvisionnement 93
2.1.1. Conception conceptuelle 93
2.1.1.1. Etape 1 : Modélisation 94
2.1.1.2. Etape 2 : Identification des types de phénomènes dangereux par association 95
a) Phénomènes dangereux liés aux énergies spécifiées par le client 95
b) Phénomènes dangereux liés aux énergies implicites 96
2.1.1.3. Etape 3 : Identification détaillée des conséquences 96
2.1.1.4. Etape 4 : Identification de l'aspect significatif et organisation 97
2.1.1.5. Discussion sur l'application d'EZID en conception conceptuelle 98
2.1.2. Conception architecturale 99
2.1.2.1. Etape 1 : Modélisation 99
2.1.2.2. Etape 2 : Identification des types de phénomènes dangereux 101
2.1.2.3. Etape 3 : Identification détaillée des conséquences 102
2.1.2.4. Etape 4 : Identification de l'aspect significatif et organisation 103
2.1.3. Conception détaillée 104
2.1.3.1. Etape 1 : Modélisation 104
2.1.3.2. Etape 2 : Identification des types de phénomènes dangereux 106
2.1.3.3. Etape 3 : Identification détaillée des conséquences 106
2.1.3.4. Etape 4 : Identification de l'aspect significatif et organisation 108
2.1.3.5. Actions du concepteur 109

2.2. Autres phases de vie étudiée 110
2.2.1. Phase de montage 110
2.2.2. Phase de stockage et de transport 111
3. Conclusion sur l'application d'EZID 112
CONCLUSION 115
1. Bilan de l'étude 115
2. Discussion 118
3. Perspectives 119
ANNEXES 121
1. Annexe 1 : Processus de conception systématique (Pahl et Beitz, 1977) 121
2. Annexe 2 : Comparatif des modèles de représentation des flux d'énergies 122
3. Annexe 3 : Modèles génériques de modélisation 123
4. Annexe 4 : Récapitulatif des opérateurs, règles et automatismes de modélisation du MFS 124
5. Annexe 5 : Démonstrateur basé sur EZID (Nadi, 2016a, 2016b) 126
6. Annexe 6 : MFS complémentaires 132
7. Annexe 7 : Expérimentations pédagogique sur le MFS 135
7.1. Application du MFE sur une machine existante 135
7.1.1. Déroulement 135
7.1.2. Résultats 136
7.1.3. Conclusion 137
7.1.4. Application d'EZID sur une machine existante 137
7.1.4.1. Application du MFE étendu 137
7.1.4.2. Résultats 139
7.1.4.3. Conclusion 139
7.2. Application pratique d'EZID sur une perceuse à colonne 141
7.2.1. Démarche suivie 141
7.2.2. Résultats 142
7.3. Conclusion sur les projets pédagogiques 143
8. Annexe 8 : Equivalence MFS - IBD 144
BIBLIOGRAPHIE 145

Table des figures

Figure 1. Machines spéciales d'assemblage pour le collage de luminaires (gauche) et l'assemblage par frettage des couronnes abradables (droite) (Lormac, 2016) 13
Figure 2. Répartition par CTN (secteur d'activité défini par le code de la sécurité sociale) des 2194 accidents enregistrés dans EPICEA utilisant le terme « machine » dans leur description (EPICEA, 2016) 15
Figure 3. Evolution de la capacité d'influencer les coûts du cycle de vie et les coûts de développement d'un produit (reprise par (Zimmer & Zablit, 2001) 18
Figure 4. Processus d'appréciation du risque selon (Norme, 2010b) 24
Figure 5. Mécanismes des phénomènes dangereux (inspiré de (CRAMIF, 2003)) 26
Figure 6. Eléments du risque (Norme, 2010b) 27
Figure 7. Processus de réduction des risques (Norme, 2010b) 30
Figure 8. Représentation générique des démarches de conception (Scaravetti et al., 2005) 33
Figure 9. Placement de l'approche vis-à-vis des tâches de conception 35
Figure 10. Modèle d'IRAD pour intégrer la sécurité au plus tôt en phase de conception du produit (Ghemraoui, 2009) 37
Figure 11. Calcul du niveau de risque auquel est exposé un opérateur en fonction de sa trajectoire (à gauche) et de son activité (à droite) 38
Figure 12. Illustration des liens entre les concepts de « solution technique » et de « phénomène dangereux » du modèle MOSTRA (Hasan, 2002) 39
Figure 13. Liens entre les paramètres de conception et ceux utilisés pour l'estimation-évaluation des risques 41
Figure 14. Exemple de modèle substance-champ (en haut) et solutions de prévention proposées par TRIZ (Hasan et al., 2004) 42
Figure 15. Schéma électrique et graphe de liaisons d'un circuit RLC série 43
Figure 16. REM d'une chaine de conversion électromécanique (Lhomme, 2007) 43
Figure 17. Exemple de diagramme SANKEY 43
Figure 18. Aperçu de l'IBD d'un distillateur (SysML™, 2015) 44
Figure 19. Modèle fonctionno-structurel d'un système arbre-poulie 44
Figure 20. Représentation de l'opérateur dans le MFS 46
Figure 21. Processus d'EZID lors de son exploitation 50
Figure 22. Utilisation du MFS par EZID 51
Figure 23. Illustration d'un MFS au cours de la conception conceptuelle 54
Figure 24. Illustration de l'évolution du MFS entre les phases de conception conceptuelle et architecturale 54
Figure 25. Illustration de l'évolution du MFS lors d'une opération de montage 56
Figure 26. Illustration de la règle « agréger des systèmes » 59
Figure 27. Illustration de la transformation des associations internes et des liaisons semi-conductrices 60
Figure 28. Exemple de modélisation et transformation d'une technique de liaison 63
Figure 29. Photo du cric mécanique de voiture 64
Figure 30. MFS du cric mécanique de voiture 65
Figure 31. Eléments modélisables selon les phases de conception (Godot, 2013) 66
Figure 32. Processus d'identification du type des phénomènes dangereux pertinents 71
Figure 33. Arbre des causes de la conséquence entrainement du type de phénomène dangereux mécanique 72

Figure 34. Exemples de règles de construction des conséquences des phénomènes dangereux mécaniques (pour une meilleure lisibilité, l'arbre a été scindé en deux suivant l'état de la matière) 73
Figure 35. Paramètres complémentaires des éléments « Vis de transmission » et « Bras 1 » du cric mécanique 74
Figure 36. Traitement d'identification des conséquences 76
Figure 37. Mise en évidence de l'inversion du flux du cric 78
Figure 38. Ajout d'un élément au MFS sans modification des échanges d'énergies utiles 80
Figure 39. Illustration de l'intégration d'une solution de prévention ayant une action sur un flux d'énergie 81
Figure 40. Exemple de liaison conductrice adaptée 82
Figure 41. Exemple d'une fenêtre de la maquette informatique développée 83
Figure 42. BPMN du démonstrateur en phase d'utilisation (p84-85) et modification (p86) 86
Figure 43. Diagramme de classe du logiciel (Nadi, 2016b) 87
Figure 44. Ligne d'approvisionnement de LORMAC Automation 92
Figure 45. MFS de la ligne d'approvisionnement basé sur le cahier des charges et les spécifications des pièces (pour la phase de vie d'utilisation de la machine) 94
Figure 46. Extrait des arbres des causes 96
Figure 47. MFS de la ligne d'approvisionnement basé sur le cahier des charges et les spécifications des pièces avec les solutions de prévention (pour la phase de vie d'utilisation de la machine) 99
Figure 48. MFS de la ligne d'approvisionnement basé sur le visuel de la solution (pour la phase de vie d'utilisation de la machine) 100
Figure 49. Extrait de l'arbre des causes 102
Figure 50. Représentation du convoyeur électrique (Arcane, 2016) 104
Figure 51. MFS du convoyeur électrique 105
Figure 52. MFS détaillé du moteur électrique 105
Figure 53. Paramètres complémentaires du moteur électrique 107
Figure 54. Illustration de la zone de blocage entre la roue d'entrainement et la courroie 107
Figure 55. Paramètres complémentaires du rouleau 1 108
Figure 56. Phase de montage (Dulché, 2015) 111
Figure 57. MFS des trois modules de la ligne en phase de stockage (Dulché, 2015) 112
Figure 58. Rappel du processus d'EZID 116
Figure 59. Démarche de conception systématique (Pahl & Beitz, 1977) 121
Figure 60. Exemples de modèles générique de modélisation 123
Figure 61. Interface de création du modèle 126
Figure 62. Interface de création des frontières composant le modèle 126
Figure 63. Interface de création des surfaces fonctionnelles d'une frontière 127
Figure 64. Interface de capitalisation des paramètres énergétiques et complémentaires d'une surface fonctionnelle 127
Figure 65. Interface de création des liaisons ou associations internes d'un modèle 128
Figure 66. Rapport d'identification des phénomènes dangereux 129
Figure 67. Interfaces d'alimentation des paramètres énergétiques et des valeurs seuils (en haut) et des combinaisons de paramètres pour l'identification des conséquences (en bas) 130
Figure 68. MFS de la ligne d'approvisionnement pour les pièces organisées en conception architecturale 132
Figure 69. MFS complet de la ligne d'approvisionnement pour les pièces en vrac en conception détaillée 133
Figure 70. MFS du montage du bloc d'approvisionnement (en haut) et du bloc identification (en bas) 134
Figure 71. Visuels de la tronçonneuse (à gauche) et de la cisaille (à droite) 135

Figure 72. Aperçu des MFE de la tronçonneuse (à gauche) et de la cisaille (à droite) pour la phase de vie d'utilisation 136
Figure 73.Aperçu du MFE pour l'utilisation 138
Figure 74.Aperçu du MFE pour la maintenance 138
Figure 75.Aperçu du MFE pour le montage 139
Figure 76. Processus de conception suivi par le groupe de PJM 141
Figure 77. Aperçu du MFE de la perceuse à colonne en phase utilisation 142
Figure 78. Equivalence MFS - IBD 144

Table des tableaux

Tableau 1. Liste des phénomènes dangereux (Norme, 2010b) 25
Tableau 2. Analyse de la littérature (107 documents) concernant les différentes composantes du risque et le nombre de niveaux de quantification associés (Lamy & Charpentier, 2009) 28
Tableau 3. Synthèse de la comparaison des modèles 45
Tableau 4. Variables généralisées liées au Bond Graph (Roucoules, 1999) 46
Tableau 5. Règles de modifications du MFS (Roucoules, 1999) 47
Tableau 6. Exemples d'éléments sources d'énergies (Arcane, 2016) 62
Tableau 7. Variables généralisées pour plusieurs types d'énergies (Borutzky, 2009) et leurs associations avec les types de phénomènes dangereux 67
Tableau 8. Paramètres généralisés étendus (Directive, 2000, 2001, 2002, 2003, 2006, 2013a, 2013b; Norme, 2008a, 2008b, 2008c, 2009a, 2010, 2014a) 69
Tableau 9. Identification des types de phénomènes dangereux du cric mécanique de voiture 70
Tableau 10. Bilan de l'identification des conséquences 75
Tableau 11. Valeurs seuils pour plusieurs types de phénomènes dangereux (Norme, 2002, 2008a, 2008c, 2009a, 2009b, 2010, 2014a, 2014b) 77
Tableau 12. Récapitulatif de la répartition des objets intermédiaires selon les phases de conception 93
Tableau 13. Identification des types de phénomènes dangereux 95
Tableau 14. Utilisation du tableau 11 97
Tableau 15. Résultats de l'application d'EZID sur le cahier des charges du client et les spécifications des pièces à approvisionner (pour la phase de vie d'utilisation de la machine) 98
Tableau 16. Résultats de l'application d'EZID sur le visuel de la solution à concevoir (pour la phase de vie d'utilisation de la machine) 103
Tableau 17. Résultats de l'identification des phénomènes dangereux durant la phase de conception détaillée (pour la phase de vie d'utilisation de la machine) 109
Tableau 18. Résultats finaux d'EZID 110
Tableau 19. Opérateurs, règles et automatismes de modélisation 122
Tableau 20. Opérateurs, règles et automatismes de modélisation 124
Tableau 21. Extrait des résultats obtenus par l'application de cette version intermédiaire d'EZID sur la tronçonneuse 137
Tableau 22. Extrait des résultats de l'identification des phénomènes dangereux obtenus 140
Tableau 23. Extrait des résultats de l'application d'une version intermédiaire d'EZID durant le processus de conception d'une perceuse à colonne 142

Chapitre 1 : Introduction

Cette thèse a pour objectif de proposer aux concepteurs de machines, et plus particulièrement de machines spéciales (dont quelques exemples sont présentés en figure 1), une méthodologie et des outils les assistant pour l'identification des phénomènes dangereux tout au long du processus de conception. Ce chapitre d'introduction présente tout d'abord le contexte de la prévention des risques professionnels et ensuite, celui de la conception des machines industrielles dans lesquels s'inscrivent ces travaux.

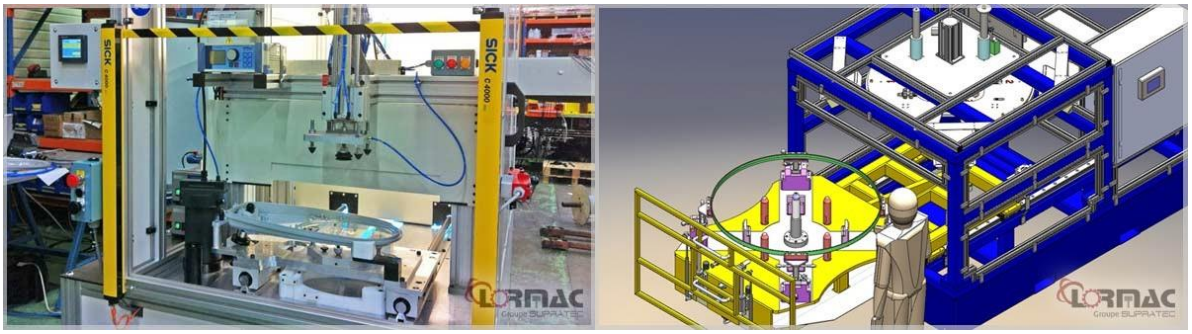


Figure 1. Machines spéciales d'assemblage pour le collage de luminaires (gauche) et l'assemblage par frettage des couronnes abradables (droite) (Lormac, 2016)

La prévention des risques professionnels et plus particulièrement le concept de prévention intégrée est détaillée dans un premier temps afin de positionner l'étape d'identification des phénomènes dangereux ainsi que son rôle dans le processus global de réduction des risques. Cette description permet également d'introduire les données d'entrées et de sorties attendues vis-à-vis de l'approche à développer.

Dans un second temps, le contexte industriel de la conception des machines est présenté afin de mettre en lumière les pratiques des concepteurs ainsi que les contraintes techniques et organisationnelles auxquelles ils sont confrontés lors de la mise en œuvre de la démarche de prévention intégrée.

En fin de chapitre, la problématique identifiée au travers de l'analyse de ces deux contextes est présentée, suivie d'un résumé de la structure de ce mémoire.

1. Prévention des risques professionnels

1.1. Cadre général

Le risque industriel est défini comme un évènement accidentel se produisant sur un site industriel et qui peut, du fait des produits ou des procédés utilisés, entraîner des conséquences pour le personnel, les riverains, les biens et l'environnement (Cyprès, 2016). Bien que le risque industriel soit principalement perçu au travers d'une vision SEVESO, dans le cadre de cette thèse, seuls les risques pour le personnel de l'entreprise, se regroupant sous la dénomination de " risques professionnels ", sont pris en compte.

En 2014, ces risques professionnels ont conduit à 621 111 accidents du travail et 51 631 déclarations de maladies professionnelles pour 18 275 500 salariés du régime général de la Sécurité Sociale (Statistiques, 2015). La prévention de ces risques professionnels est une obligation réglementaire dont les principes sont fixés par le code du travail (Legifrance, 2012). Ces exigences réglementaires mettent l'accent sur la nécessité:

- d'éviter les risques
- d'intégrer la sécurité le plus en amont possible dans le processus de conception, (" Combattre les risques à la source ") ;
- d'analyser les risques et de les évaluer, (" Evaluer les risques qui ne peuvent pas être évités ") ;
- de tenir compte de l'évolution de la technique.

Différents acteurs prennent part à la réalisation de ces actions de prévention. Ils appartiennent tout d'abord à l'entreprise, comme l'employeur qui reste l'acteur principal de la prévention des risques professionnels dans leur ensemble, mais également le médecin du travail, les représentants du personnel, les différents responsables, les services des ressources humaines et les salariés qui peuvent agir à différents niveaux. Ces acteurs sont également externes et peuvent être sollicités par l'employeur. Il s'agit par exemple des acteurs institutionnels comme les services prévention des Caisses d'Assurance Retraite et de la SAnté au Travail (CARSAT/CRAM/CGSS), le réseau régional de l'Agence Nationale pour l'Amélioration des Conditions de Travail (ANACT), les comités régionaux de l'Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics (OPPBTP), les Intervenants en Prévention des Risques Professionnels (IPRP) ou encore des organismes qualifiés, accrédités ou agréés pouvant être sollicités pour réaliser des analyses ou des vérifications sur sites. Parmi ces acteurs externes, certains n'interviennent pas directement pour un besoin de prévention des risques professionnels. C'est notamment le cas des concepteurs de machines qui sont directement sollicités pour concevoir un système répondant aux besoins techniques d'un client, mais qui doivent, entre-autres contraintes, respecter les exigences de sécurité relatives à la conception des machines définies par la directive 2006/42/CE dite « Machines » (Directive, 2006b).

1.2. Risques liés aux machines

Au sens de la directive européenne 2006/42/CE, une machine est définie comme (Directive, 2006b) :

- un ensemble équipé ou destiné à être équipé d'un système d'entraînement autre que la force humaine ou animale appliquée directement, composé de pièces ou d'organes liés entre eux dont au moins un est mobile et qui sont réunis de façon solidaire en vue d'une application définie ;
- un ensemble visé au premier alinéa, auquel manquent seulement des organes de liaison au site d'utilisation ou de connexion aux sources d'énergies et de mouvement ;
- un ensemble visé au premier et au deuxième alinéa prêt à être installé et qui ne peut fonctionner en l'état qu'après montage sur un moyen de transport ou installation dans un bâtiment ou une construction ;
- un ensemble de machines visées au premier, au deuxième et au troisième alinéa ou de quasi-machines (ensemble qui constitue presque une machine, mais qui ne peut assurer à lui seul une application définie) qui, afin de concourir à un même résultat, sont disposées et commandées de manière à être solidaires dans leur fonctionnement ;
- un ensemble de pièces ou d'organes liés entre eux, dont un au moins est mobile, qui sont réunis en vue de soulever des charges et dont la seule force motrice est une force humaine directement appliquée.

Parmi les 621 111 accidents du travail cités précédemment, environ 5% sont imputés à l'utilisation de machines (Statistiques, 2015). En se basant sur la base de données INRS EPICEA, la figure 2 montre que si ces accidents concernent l'ensemble des secteurs d'activité, ceux de la métallurgie et de la transformation de bois/papier/textile sont les plus représentés (EPICEA, 2016).

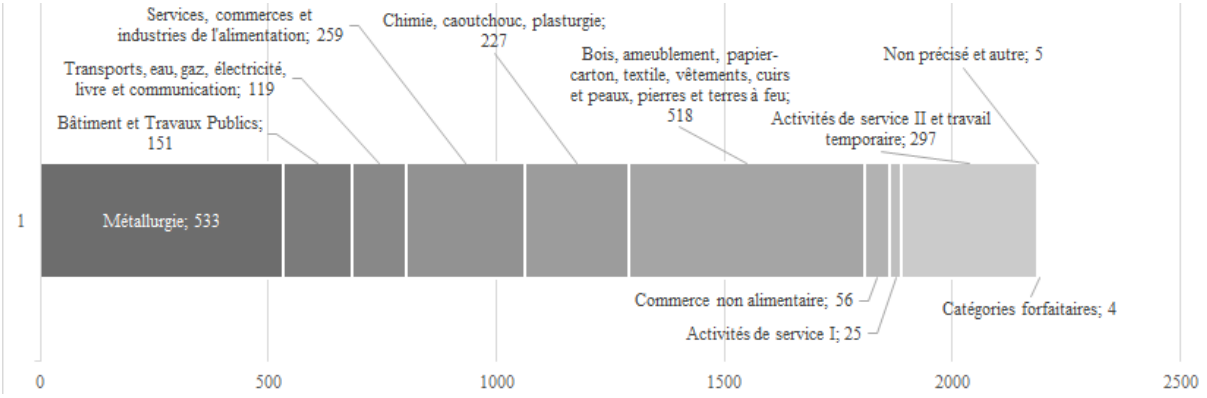


Figure 2. Répartition par CTN (secteur d'activité défini par le code de la sécurité sociale) des 2194 accidents enregistrés dans EPICEA utilisant le terme « machine » dans leur description (EPICEA, 2016)

Les secteurs manufacturiers sont naturellement les plus impactés par les accidents liés à l'utilisation des machines. Les principaux facteurs d'accidents identifiés sont les interventions en cours de fonctionnement, les modes opératoires inappropriés et dangereux, la mauvaise conception des machines, l'insuffisance de formation des opérateurs et le manque de sensibilisation à la sécurité des entreprises utilisatrices (INRS, 2016). Ces facteurs peuvent être répartis en trois familles : la sensibilisation à la sécurité des individus (formation), les interactions homme-machine (intervention, modes opératoires) et les caractéristiques de la machine (mauvaise conception).

En excluant la sensibilisation à la sécurité des individus, une majorité de ces accidents auraient donc pu être anticipés non seulement durant la phase de vie de fonctionnement de la machine, mais également à chaque fois qu'une décision concernant la future machine a été prise durant son processus de conception. Cet axe de la prévention des risques s'appelle la prévention intégrée.

1.3. La prévention intégrée

Comme indiqué précédemment, la prévention des risques liés aux machines concerne non seulement l'entreprise utilisatrice mais également l'ensemble des parties prenantes impliquées dans leurs différentes phases de vie et situations de travail (conception, fabrication, montage, production, démantèlement, etc.). Dans le domaine de la santé et de la sécurité au travail, et plus particulièrement vis-à-vis des accidents professionnels, la phase de conception des machines est un axe de prévention privilégié avec une efficacité qui n'est plus à démontrer (Main & McMurphy, 1998), et dont les principes sont regroupés sous la notion de prévention intégrée. Ce sont les concepteurs de la machine qui sont les acteurs de cette prévention durant le processus de conception.

La directive européenne 2006/42/CE (Directive, 2006b) et les normes associées formalisent les principes de conception sûre devant être appliqués aux machines. Le dispositif normatif associé est construit autour de trois types de normes :

- Les normes de type A (normes fondamentales de sécurité) qui contiennent des notions fondamentales, des principes de conception et des aspects généraux relatifs aux machines;
- Les normes de type B (normes génériques de sécurité) qui traitent d'un aspect de la sécurité ou d'un moyen de protection valable pour une large gamme de machines ;
- Les normes de type C (normes de sécurité par catégorie de machines) qui traitent des exigences de sécurité détaillées s'appliquant à une machine particulière ou à un groupe de machines particulier.

C'est la norme de type A NF EN ISO 12100 relative aux principes généraux de conception qui est au centre de ce dispositif normatif concernant la sécurité des machines

(Norme, 2010b). En plus de définir ce qu'est un phénomène dangereux, cette norme donne également la définition d'une situation dangereuse (situation dans laquelle une personne est exposée à au moins un phénomène dangereux). Comme cela a été évoqué dans l'avant-propos, les situation dangereuse sont étudiées dans un autre axe du LC2S et ne sont donc pas traitées pas cette thèse.

Les concepteurs de machines peuvent s'appuyer sur ces différents documents pour obtenir le niveau de risque résiduel le plus faible possible. Le respect de ces normes apporte en effet une présomption de conformité aux exigences essentielles de sécurité de la directive « Machines ». Il existe cependant une hiérarchisation dans leur application. Dans le cas où une machine est concernée par une norme de type C, c'est celle-ci qui est prioritaire dans son application par rapport aux normes de type A ou B.

Ainsi pour une machine couverte par une norme de type C (ex. : NF EN 12268 pour les scies à ruban alimentaires (Norme, 2010a)), le travail du concepteur se trouve simplifié car il a accès au travers de ce document à l'ensemble des informations sur l'analyse des risques et des moyens de prévention à appliquer. A l'inverse, dans le cas des machines spéciales (conçues pour répondre à un besoin spécifique), leur unicité empêche la création de normes spécifiques. Les concepteurs doivent donc faire des analogies pour exploiter les norme de type C et/ou s'appuyer sur l'ensemble des normes transversales (types A et B), soit près d'une centaine de documents sur les principes généraux de conception, les dispositifs de protection, les circuits de commande, les accès, le dimensionnement des postes de travail, la performance physique des opérateurs, les organes de services et autres (ex. : fonction d'arrêt d'urgence (Norme, 2015)).

La mise en œuvre de la prévention intégrée est en conséquence affectée par le type de machine à concevoir (existence ou non de norme de type C). Elle l'est également par les caractéristiques liées au métier des concepteurs de machines.

2. Les concepteurs de machines

Il est nécessaire de décrire les pratiques des concepteurs afin de comprendre comment ces dernières influencent la mise en œuvre de la prévention intégrée.

Dans le cadre d'une enquête sur les concepteurs de machines, environ 17 000 entreprises ont été identifiées, à partir de leur code NAF (Nomenclature d'Activités Française) comme ayant une activité de conception ou de fabrication de machines (Annuaire, 2015). Parmi celles-ci, plus de 89% sont des très petites, petites ou moyennes entreprises (Marsot, 2015). Cette caractéristique influence leur processus de conception car il est reconnu que les entreprises de ces tailles disposent rarement d'une démarche de conception formalisée (Godot, 2013). Si la plupart se calque sur les principes de la conception systématique de (Pahl & Beitz, 1977) schématisée en annexe 1, des variations apparaissent au niveau de l'organisation ou des temps consacrés à chaque phase, activité ou tâche.

Parmi la population des concepteurs qui ont été sollicités dans l'enquête de (Marsot, 2015) près de 75% déclarent réaliser principalement des machines dites spéciales.

On retrouve également les conséquences de ce manque de formalisation au niveau de la réalisation du processus de prévention intégrée. Celui-ci est en effet généralement mis en œuvre à la fin du processus de conception de la machine, soit une fois que toutes les décisions techniques et technologiques ont été prises (Hale et al., 2007). Si les concepteurs disposent à ce stade de toutes les données pour réaliser complètement une appréciation des risques, les possibilités de réduction des risques sont par contre très limitées, sauf à remettre en considération les choix précédemment réalisés ce qui engendre inévitablement un surcoût important, comme cela est illustré de manière plus générale par la figure 3 (plus le processus de conception avance, moins il est possible de modifier les décisions technologiques sans augmenter significativement les coûts de développement). Une autre conséquence de cette application tardive de la démarche de prévention intégrée est de favoriser la mise en place de moyens de protection additionnels (ex. : protecteur mobile ou fixes), voire le simple signalement des risques dans la notice d'instruction au détriment des mesures de prévention intrinsèques car ces dernières impliqueraient de modifier en profondeur les choix technologiques.

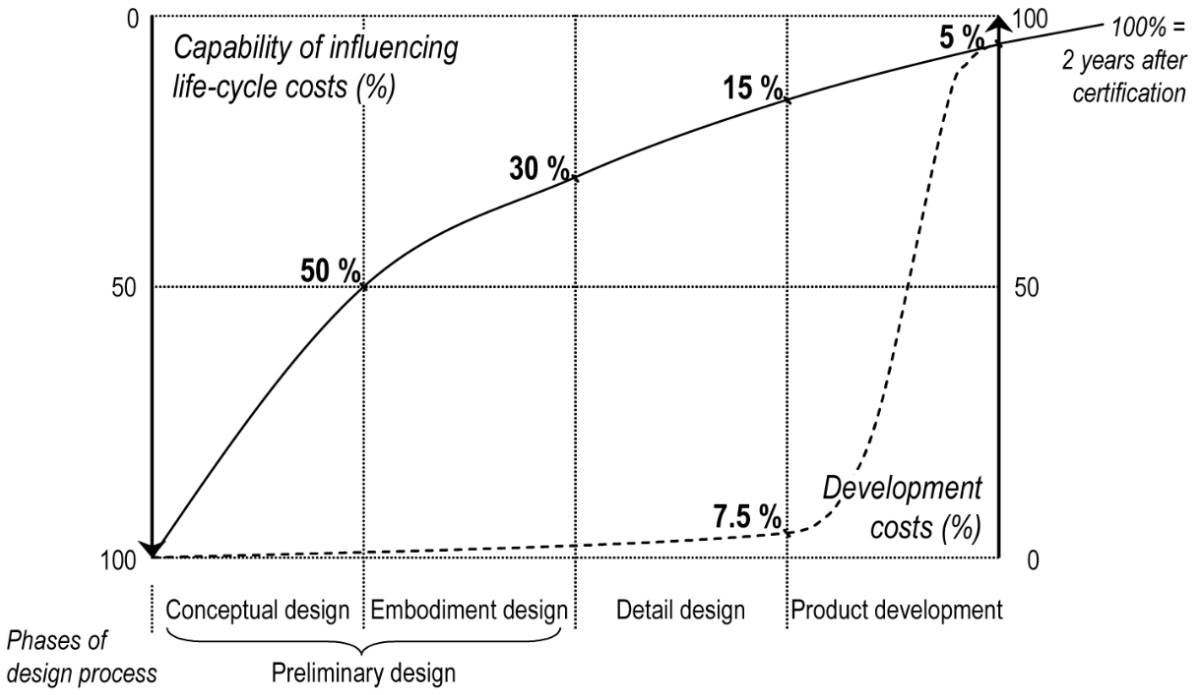


Figure 3. Evolution de la capacité d'influencer les coûts du cycle de vie et les coûts de développement d'un produit (reprise par (Zimmer & Zablit, 2001)

Ce manque de formalisation s'applique également au donneur d'ordre lors de la réalisation de son cahier des charges. En effet, les exigences de santé-sécurité des futurs opérateurs sont généralement peu fournies et souvent limitées à des phrases du type « doit respecter la réglementation et les normes en vigueur » (Daille-Lefèvre et al., 2012). Il s'agit là

d’un obstacle supplémentaire pour les concepteurs pour l’application de la démarche de prévention intégrée.

Une autre conséquence de ce manque de formalisation est de faire reposer la démarche de prévention principalement sur l’expertise des concepteurs. Ils ont donc naturellement tendance à se concentrer sur les risques qui sont proches de leurs domaines de compétence, par exemple les risques mécanique ou électrique (Bluff, 2015). Dans d’autres cas, c’est la trop grande habitude d’une technologie qui réduit la capacité à identifier un nouveau risque (Zimolong & Elke, 2006).

Enfin, le manque de formalisation conduit également les concepteurs à se concentrer majoritairement sur la phase de vie d’utilisation. Si cela permet d’obtenir une machine a priori sécurisée lors du fonctionnement nominal de la machine, cela pose de nombreux problèmes lors des autres phases de vie (ex. : assemblage, maintenance, transport, démantèlement) où des phénomènes dangereux inexistants en utilisation peuvent apparaître.

3. Problématiques, objectifs et structuration du mémoire

Cette analyse du contexte a permis de mettre en évidence les difficultés rencontrées par les concepteurs de machines dans l’application de la démarche de prévention intégrée, notamment pour les TPE-PME qui conçoivent des machines spéciales :

- absence de normes de type C ;
- manque de moyens formels et d’outils pour définir ce qui est applicable et à quel moment sans pénaliser les coûts et délais de leurs projets ;
- connaissances et expériences des concepteurs en matière de sécurité ;
- délais de conception de plus en plus serrés.

En conséquence, l’intégration de la prévention est généralement vue par ces concepteurs comme une suite de contraintes d'adaptation, de correction et de suivi des normes de contrôle-commande et non de conception. Elle est de ce fait le plus souvent traitée en fin de projet et en se basant sur une vision standardisée/normalisée du travail (ex. : fonctionnement nominal, opérateur moyen, mode opératoire prescrit). Cela se traduit par une restriction dans les possibilités de solutions de prévention en privilégiant l'ajout de protecteurs et de consignes d'utilisation aux mesures de prévention intrinsèque.

La problématique industrielle à laquelle ce mémoire veut répondre est donc d’aider les concepteurs de machines spéciales dans l’application de la démarche de prévention intégrée et plus particulièrement pour l’identification des phénomènes dangereux, première étape de cette démarche. Il s’agit donc de **proposer une approche permettant aux concepteurs de machines d'identifier de manière systématique les phénomènes dangereux tout au long du processus de conception**. Les résultats de cette identification pourront ainsi être théoriquement exploités au meilleur moment par les concepteurs dans le but de réduire les

risques potentiels. De plus, les concepts et la démarche à la base de cette approche constituent des éléments de référence que le concepteur pourra garder à l'esprit.

Pour répondre à cette problématique, des caractéristiques ont été identifiées vis-à-vis de l'approche envisagée :

- Elle doit être **générique** afin de pouvoir traiter tous les phénomènes dangereux liés aux types de risques à identifier, afin d'être applicable quelque soient les machines à concevoir et afin de pouvoir être utilisés avec les éléments de conception manipulés par les concepteurs ;
- Ses traitements doivent être **inductif** afin de traiter directement les données de conception (causes) générées par les concepteurs pour en déduire les phénomènes dangereux (effets) ;
- L'approche doit fonctionner de manière **dynamique** et être **traçable** afin de permettre son utilisation et de prendre en compte l'évolution des caractéristiques et de la configuration des composants du système au cours de la conception ;
- Elle doit également s'**intégrée** et/ou être **interconnectable** avec les outils et méthodes de conception actuels, pour permettre son interopérabilité. Enfin, elle devra être **instrumentée** avec des indicateurs de risques potentiels permettant une quantification et une exploitation des données.

Au niveau scientifique, ce travail se positionne dans le cadre de la conception intégrée (Tichkiewitch & Veron, 1997) associant la conception de machine avec le point de vue sécurité des opérateurs. Il porte principalement sur la proposition d'une méthodologie de structuration et de formalisation des connaissances s'appuyant sur des modèles exploitables durant les différentes phases de développement et d'utilisation du produit, qui dans le cadre de cette étude est une machine.

Pour détailler cette approche et les conditions dans lesquelles elle a été développée, le mémoire a été structuré en quatre chapitres dont cette introduction est le premier.

Le chapitre 2 restitue l'analyse bibliographique réalisée sur le processus de prévention intégrée et les processus de conception. Une analyse des travaux existants a permis d'identifier les apports réalisés et de préciser le positionnement de cette thèse et les verrous auxquels elle propose des éléments de réponse. Ce chapitre présente également l'hypothèse à la base de la méthodologie proposée ainsi qu'un état de l'art sur les éléments permettant de l'exploiter.

Le chapitre 3 détaille la méthode appelée EZID (Energy analysis for systematic haZard Identification during Design) qui répond aux besoins précédemment exprimés. Les différentes étapes de la méthode et les résultats attendus en fonction des différentes phases du processus

de conception sont détaillés dans ce chapitre. L'application de chaque étape sur un exemple pédagogique appuie la compréhension de l'explication théorique de la méthode. En fin de chapitre est présentée une première tentative d'automatisation de la méthode par un démonstrateur informatique.

Le chapitre 4 présente le cas industriel qui a permis de tester avec succès la méthode EZID. Il s'agit d'une ligne d'approvisionnement appartenant à une unité d'assemblage de composants pour l'automobile. Ce projet de conception a été conduit par l'entreprise LORMAC Automation et la méthode EZID a été appliquée en parallèle sur les données que les concepteurs ont fournies.

Enfin, la conclusion présente les résultats et les observations critiques réalisées sur la méthode EZID et sur son application industrielle. Les perspectives envisagées pour ce travail de recherche complètent cette conclusion.

Chapitre 2 : Analyse de la littérature

L'analyse bibliographique présentée dans ce chapitre couvre plusieurs domaines et comporte quatre parties.

La première partie porte sur la prévention intégrée qui consiste à intégrer les exigences de santé-sécurité à la conception des machines. Les différents travaux recensés sont notamment positionnés vis-à-vis de l'étape d'identification des phénomènes dangereux qui est au centre de ce travail de recherche.

La deuxième partie porte sur la conception de produits et plus particulièrement de machines industrielles. L'analyse bibliographique réalisée sur ce domaine permet de positionner ce travail vis-à-vis des démarches, modèles, méthodes, moyens et outils utilisés en conception.

La troisième partie présente les travaux se situant à l'intersection des deux domaines précédents : le Design for Safety. Ils visent en effet à renforcer l'articulation entre la démarche de prévention intégrée et le processus de conception d'une machine. Là encore, une attention particulière est portée sur l'étape d'identification des phénomènes dangereux.

Enfin, suite au constat réalisé dans ces différentes analyses bibliographiques sur le fait que « phénomènes dangereux » et « énergie » sont étroitement liés, la quatrième et dernière partie de ce chapitre présente une analyse bibliographique sur les modèles énergétiques utilisés en conception de produit.

1. La prévention intégrée

Comme présenté dans l'introduction, la norme NF EN ISO 12100 est au centre du dispositif normatif lié à l'intégration des exigences de santé-sécurité lors de la conception d'une machine (Norme, 2010b). Elle propose aux concepteurs de machines une démarche dite de «prévention intégrée » qui se décompose selon deux processus : un processus d'appréciation des risques et un processus de réduction des risques.

1.1. Le processus d'appréciation du risque

Comme illustré par la figure 4 ci-dessous, le processus d'appréciation du risque comporte quatre étapes séquentielles qui ont pour but d'identifier les phénomènes dangereux et d'apprécier les risques associés dans les différentes phases de vie d'une machine.

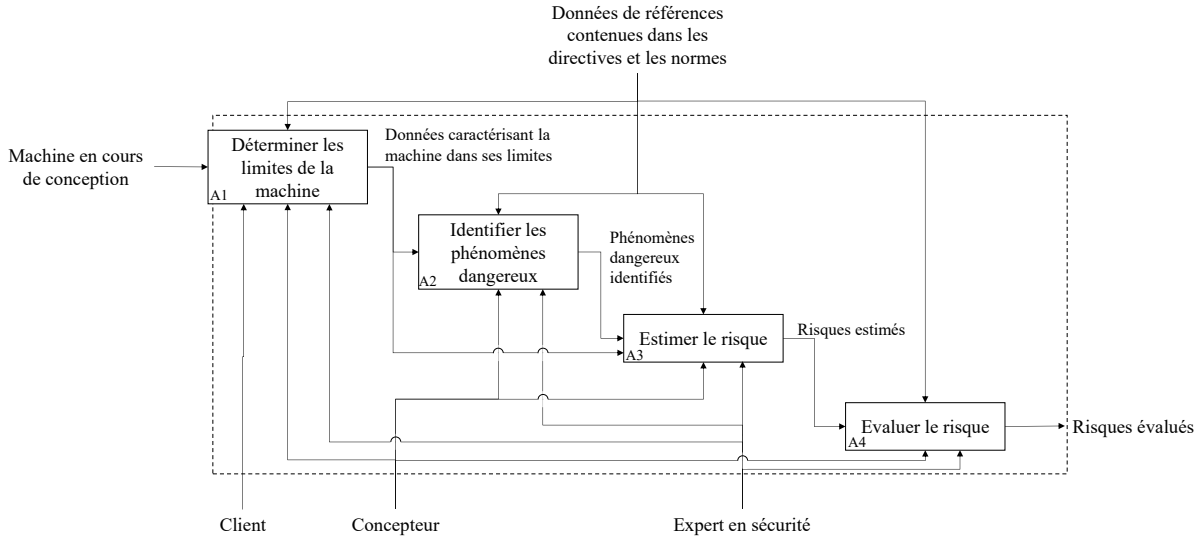


Figure 4. Processus d'appréciation du risque selon (Norme, 2010b)

1.1.1. Détermination des limites de la machine

Cette étape est la première du processus d'appréciation du risque. Au sens de la norme NF EN ISO 12100, il est nécessaire que le concepteur définisse précisément les limites de la machine étudiée, comme c'est également préconisé en conception de système (Le Moigne, 1994). La norme NF EN ISO 12100 définit trois familles principales de limites :

- les limites d'utilisation (usage normal et au mauvais usage raisonnablement prévisible de la machine, modes de marche, matières premières, consommables, outils, production, qualité attendue, etc.),
- les limites dans l'espace (amplitude des mouvements, caractéristiques dimensionnelles, caractéristiques des interfaces d'échanges d'énergies et interactions entre la machine et les opérateurs),
- les limites dans le temps (cycles d'entretien, de fonctionnement et de durée de vie des éléments, phases de vie, etc.).

1.1.2. Identification des phénomènes dangereux

Cette étape est la deuxième du processus d'appréciation du risque et a pour objectif de définir, sur la base des éléments précédemment cités, l'ensemble des phénomènes dangereux susceptibles de survenir durant les différentes phases du cycle de vie de la machine, du montage à la mise au rebut.

Les phénomènes dangereux sont des sources potentielles de dommages caractérisés par différentes propriétés (type, mécanisme, conséquence, capacité à générer un risque). La norme NF EN ISO 12100 répertorie dix types de phénomènes dangereux listés dans le tableau 1. Certains d'entre eux sont également répartis en sous-types, comme c'est le cas pour les phénomènes dangereux engendrés par les rayonnements qui regroupent ceux liés aux rayonnements optiques artificiels, aux lasers, aux rayonnements électromagnétiques et aux rayonnements ionisants. De la même manière, les phénomènes dangereux engendrés par les matériaux et les produits contiennent ceux liés aux produits chimiques et ceux liés aux produits biologiques.

Tableau 1. Liste des phénomènes dangereux (Norme, 2010b)

Type ou groupe de phénomène dangereux	Exemples de conséquences (dommages) possibles
Phénomène dangereux mécanique	Frottement ou abrasion, choc, injection, cisaillement, coupure
Phénomène dangereux électrique	Electrocution, brûlure
Phénomène dangereux thermique	Brûlure, déshydratation, inconfort, gelure
Phénomène dangereux engendrés par le bruit	Inconfort, perte auditive
Phénomène dangereux engendrés par les vibrations	Lombalgie, troubles neurologiques
Phénomène dangereux engendrés par les rayonnements	Lésions oculaires, mutation génétique, maux de tête
Phénomène dangereux engendrés par des matériaux ou des produits	Cancer, corrosion, difficultés respiratoires
Phénomène dangereux engendrés par le non-respect des principes ergonomiques	Fatigue, troubles musculo-squelettiques
Phénomène dangereux associés à l'environnement dans lequel la machine est utilisée	Glissade, chute, suffocation
Combinaisons de phénomène dangereux	

Les phénomènes dangereux associés à l'environnement dans lequel la machine est utilisée représentent un type à part entière car ils ne dépendent pas uniquement de la machine, bien que le résultat de leur identification couvre tous les types précédemment listés. Les combinaisons de phénomènes sont basées sur la complémentarité de différents types de phénomènes dangereux permettant d'en créer un nouveau, et correspondent donc à un type particulier.

Indépendamment de leur type, les phénomènes dangereux se caractérisent également par les risques associés : nature des dommages ou des atteintes à la santé des personnes exposées. Ces derniers sont le résultat de deux mécanismes différents représentés sur la figure 5 : accidentel ou chronique. Les mécanismes accidentels portent atteinte à la santé d'un

individu instantanément (ex. chocs, coupures, brûlures) alors que les mécanismes chroniques affectent progressivement un individu (ex. : troubles musculo-squelettiques, cancer, etc.).

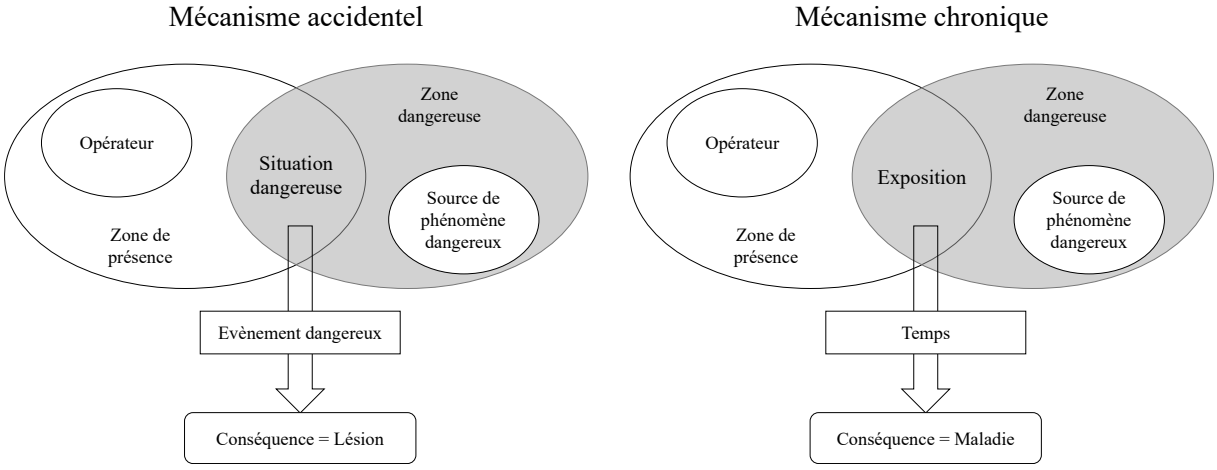


Figure 5. Mécanismes des phénomènes dangereux (inspiré de (CRAMIF, 2003))

Enfin, selon la norme NF EN ISO 12100, les phénomènes dangereux sont qualifiés de *pertinents* s'ils existent sur une machine ou sont associés à une machine, et de *significatifs* si en plus d'être pertinents ils nécessitent une action du concepteur pour éliminer ou réduire les risques associés.

L'identification de ces différentes caractéristiques est importante car elle va permettre au concepteur de prévoir les moyens de protection adaptés aux phénomènes dangereux.

1.1.3. Estimation et évaluation du risque

L'étape suivante concerne l'estimation du risque. Il s'agit de définir un indice pour chaque risque (ou dommage) engendré par les phénomènes dangereux précédemment identifiés. Comme représenté sur la figure 6, le calcul de cet indice est basé sur l'estimation de la gravité et de la probabilité d'occurrence de ce dommage, elle-même fonction de l'exposition de la ou des personnes aux phénomènes dangereux, de l'occurrence d'un événement dangereux, et des possibilités techniques et humaines d'éviter ou de limiter le dommage. Pour estimer ces différents paramètres, il est nécessaire de prendre en considération les caractéristiques liées au système technique (ex. : niveaux d'énergies, géométrie, probabilité de défaillances de certains composants), aux personnes exposées (ex. : nombre, probabilité de défaillance humaine, expertise) et aux caractéristiques de l'exposition (ex. : fréquence, durée). En conséquence, les paramètres utilisés pour l'évaluation des risques ne sont pas directement ceux manipulés par les concepteurs, mais leurs valeurs en dépendent.

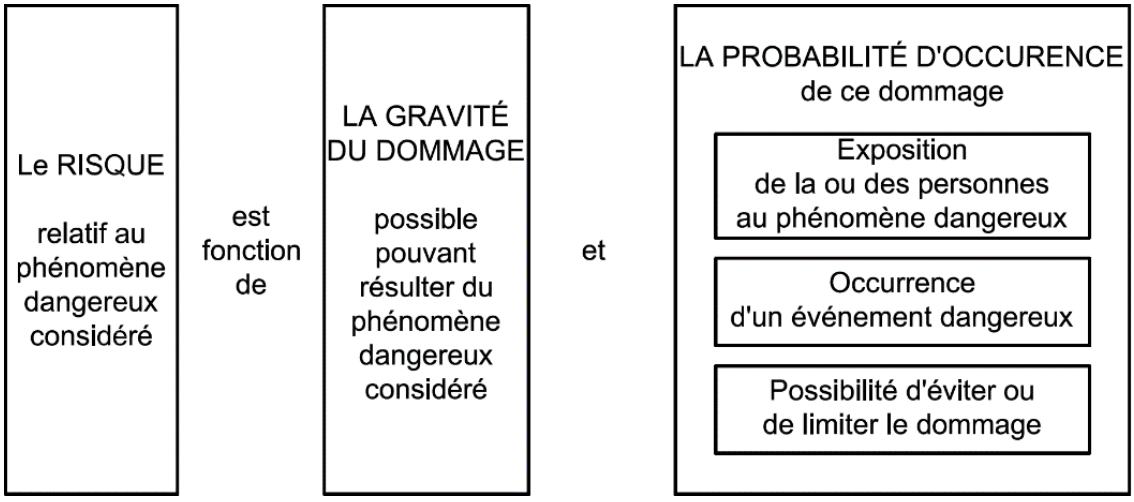


Figure 6. Eléments du risque (Norme, 2010b)

L'évaluation du risque est la dernière étape du processus d'appréciation des risques. Elle a pour objectif de porter un jugement sur les indices définis lors de l'évaluation en les comparant avec les valeurs de références absolues ou relatives définies dans différents référentiels normatifs ou réglementaires (ex. : (Norme, 2008a, 2009b, 2010b)). En fonction du résultat de cette évaluation, le concepteur doit si nécessaire engager le processus de réduction des risques.

1.1.4. Littérature relative au processus d'appréciation du risque

On recense dans la littérature scientifique de nombreux travaux en lien avec ce processus d'appréciation des risques et plus particulièrement les deux dernières étapes d'estimation et d'évaluation des risques.

Diverses approches proposent de détailler les indicateurs existants utilisés pour ces deux étapes (Lamy & Charpentier, 2009; Su et al., 2012). Dans une analyse bibliographique de 107 documents traitant d'estimation des risques dont les résultats sont capitalisés dans le tableau 2, Lamy et Charpentier montrent que les paramètres utilisés restent assez semblables d'une méthode à l'autre. On remarque que les paramètres les plus utilisés sont, comme le préconise la norme NF EN ISO 12100, la gravité du dommage, la fréquence/durée d'exposition, la probabilité d'occurrence de l'événement dangereux et la possibilité d'évitement. La principale différence entre ces méthodes porte sur le nombre de niveaux (ex. : minime, moyen, grave) utilisés pour évaluer ces paramètres, influençant par conséquent la précision des résultats de l'estimation, et surtout la façon de les combiner : matrice, graphe, équation numérique, abaque.

La plupart des méthodes proposées dans les normes telles que (Norme, 2008a, 2008c, 2009a, 2009b) ou dans la littérature scientifique sont spécifiques à un type de phénomènes dangereux, par exemple mécanique (Hu et al., 2012) ou ergonomique (Lyon et al., 2013). Dans une autre comparaison de 62 méthodes d'analyses des risques de sites industriels selon quatre critères (inductif, déductif, qualitatif, quantitatif), Tixier et al. montrent que moins de la moitié

d'entre elles permettent un traitement inductif des données comme souhaité dans ce travail (Tixier et al., 2002). Ces méthodes ne vérifient donc pas les aspects générique et inductif souhaités dans le cadre de ce travail, en plus d'être focalisées sur l'estimation et l'évaluation des risques.

Tableau 2. Analyse de la littérature (107 documents) concernant les différentes composantes du risque et le nombre de niveaux de quantification associés (Lamy & Charpentier, 2009)

	Paramètres exprimés	Nombre de niveaux des composantes									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gravité	107	0	4	24	46	20	8	2	0	1	2
Fréquence d'exposition	18	0	2	6	2	4	2	2	0	0	0
Durée d'exposition	4	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0
Fréquence et durée d'exposition	18	0	6	3	3	3	0	3	0	0	0
Fréquence et durée non spécifiée	31	0	0	6	5	12	6	1	0	1	0
Probabilité d'occurrence du dommage	24	0	1	6	7	7	3	0	0	0	0
Probabilité d'occurrence d'événement dangereux	30	0	1	7	3	13	3	2	0	0	1
Possibilité d'évitement du dommage	15	0	11	1	0	2	0	0	0	0	1
Autres paramètres	27	0	6	12	2	2	1	3	0	0	1

D'autres travaux proposent de compléter les paramètres d'estimation des risques en intégrant de nouveaux indicateurs (Ahmad et al., 2015; Burlet-Vienney et al., 2015; Coulibaly et al., 2008; Hassim & Edwards, 2006; Liu et al., 2013; Ronchetti et al., 2015).

Hassim & Edwards proposent l'index Process Route Healthiness Index (PRHI) qui intègre les effets et l'exposition des différents composants chimiques pour quantifier les risques chimiques liés aux processus d'un bâtiment industriel en cours de conception. Les paramètres utilisés pour calculer le PRHI sont l'Inherent Chemical and Process Hazard Index (ICPHI) qui traduit les conditions de travail et les tâches dangereuses pour la santé, le Health Hazard Index (HHI) qui fournit une information sur la capacité inhérente des produits chimiques à causer des maladies professionnelles typiques, le Material Harm Index (MHI) qui hiérarchise les différents matériaux selon leur qualité sanitaire (basé sur le NFPA Ranking for Health (Hassim & Edwards, 2006), le Worker Exposure Concentration (WEC) qui estime la concentration des produits dans l'environnement immédiat de l'opérateur et l'Occupational Exposure Limit (OEL) qui est la valeur limite d'exposition professionnelle pour les différents produits chimiques concernés. Bien que cet index soit basé sur des paramètres accessibles au concepteur, il est focalisé sur le risque chimique et ne correspond donc pas à l'objectif de généricité recherché dans ce travail. Cette conclusion est également valable pour (Ahmad et al., 2015) qui présentent une méthode pour l'estimation des risques durant la conception d'un processus chimique basée sur l'exploitation graphique des indicateurs de GRAND (Graphical Descriptive Technique for Inherent Safety Assessment), indicateurs prenant en considération des paramètres similaires à ceux de Hassim et Edwards.

Pour les risques liés au stress en environnement professionnel, (Ronchetti et al., 2015) présentent les indicateurs spécifiquement utilisés tels que les relations de travail, le contrôle de l'activité ou encore le support des superviseurs. Ces critères étant liés à l'organisation de

l'activité et non à la conception de l'environnement (et étant exclusivement utilisés pour l'étude du stress), il n'est donc encore une fois pas envisagé de l'utiliser par manque de généricité vis-à-vis des types de phénomènes dangereux.

La méthode en cinq étapes proposée par (Burlet-Vienney et al., 2015) permet d'estimer et d'évaluer les risques liés à l'activité professionnelle en milieu confiné. Lors de sa troisième étape, cette méthode propose une échelle spécifique pour l'évaluation de la gravité des dommages, de la probabilité d'occurrence ainsi qu'une liste de facteurs associés aux phénomènes dangereux et conséquences considérés. Les facteurs proposés vis-à-vis de la gravité sont majoritairement des paramètres de conception, se rapprochant ainsi des objectifs présentés dans le chapitre 1. Ces paramètres pourront servir de base pour l'approche de ce mémoire. Cependant, la méthode étant dédiée aux phénomènes dangereux spécifiques aux environnements confinés, il ne représente pas l'ensemble de ceux capitalisés dans la norme NF EN ISO 12100.

Coulibaly et al. associent aux facteurs classiques d'évaluation (gravité et fréquence) un facteur FRis indiquant la présence ou non d'un risque. Bien que le calcul de ce facteur rejoigne la problématique d'identification des phénomènes dangereux de cette thèse, il n'est pas directement exploitable. Les auteurs proposent en effet pour ce calcul trois paramètres de type booléen qui ne sont pas des paramètres directs de conception. Il s'agit en effet de l'existence ou non d'un phénomène dangereux (Ph), l'existence ou non d'une zone dangereuse (Zo) et l'intervention ou non d'un opérateur dans la zone dangereuse (HIn).

Enfin, comparativement aux étapes d'estimation et d'évaluation du risque, celles sur la détermination des limites et l'identification des phénomènes dangereux sont peu abordées dans la littérature. Elles reposent principalement sur les dires d'experts et/ou l'utilisation d'outils tels que l'AMDEC ou l'arbre des causes (Liu et al., 2013; Rausand & Bouwer Utne, 2009).

1.2. Réduction du risque

Lorsque l'appréciation des risques a abouti à la conclusion que le risque devait être réduit, le concepteur doit choisir une solution de prévention en fonction des caractéristiques de la source du phénomène dangereux. L'objectif de réduction du risque peut être atteint en supprimant les phénomènes dangereux ou en réduisant, séparément ou simultanément, chacun des deux facteurs (gravité et probabilité d'occurrence) qui déterminent le risque associé. Trois familles de mesures de prévention des risques sont répertoriées dans la norme NF EN ISO 12100 : les mesures de prévention intrinsèques, les protections et les mesures complémentaires et les informations pour l'utilisation. Comme illustré par la figure 7, ces trois familles de mesures de prévention sont hiérarchisées selon leur capacité à réduire les risques. Ce processus de réduction des risques est nécessairement suivi d'un nouveau processus d'appréciation du risque afin de valider les résultats de la première itération et/ou d'identifier les phénomènes dangereux qui auraient pu être créés par les mesures de prévention implantées dans la machine.

Une fois les risques suffisamment réduits, la machine est considérée comme sûre au sens du référentiel réglementaire.

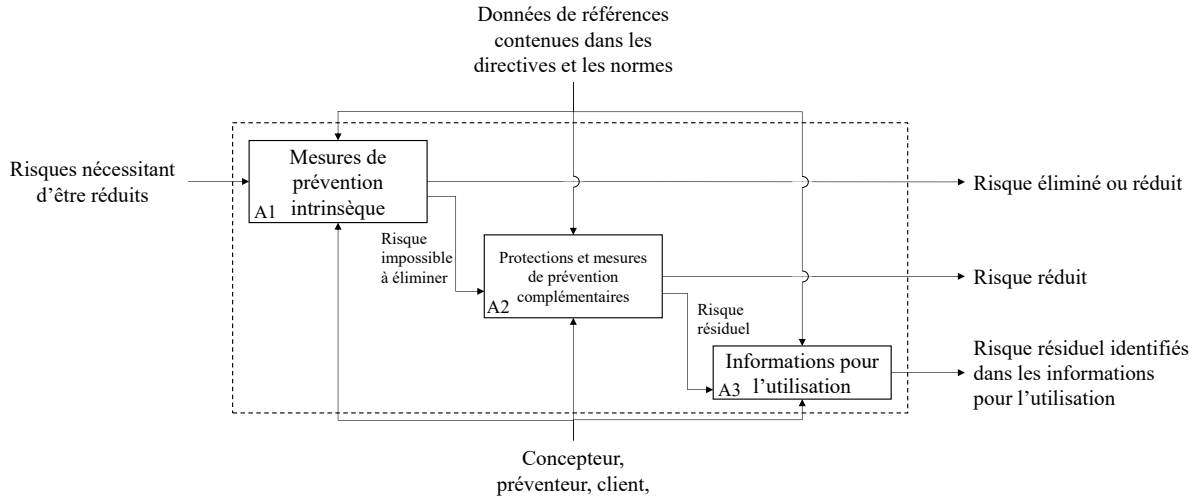


Figure 7. Processus de réduction des risques (Norme, 2010b)

Le processus de réduction des risques est largement détaillé dans la norme NF EN ISO 12100. Il est également couvert par différents travaux scientifiques afin d'aider les concepteurs dans le choix et la comparaison de solutions de prévention. Ces derniers portent sur la gestion (Caputo et al., 2013; Janssens et al., 2015), l'analyse (Vijayan et al., 2016) ou l'évaluation (Cocca et al., 2016) des mesures de protection.

1.3. Conclusion sur la prévention intégrée

Comme nous venons de le voir, le processus de prévention intégrée est bien décrit au niveau de ses différentes étapes, de la détermination des limites de la machine jusqu'à la réduction des risques. En suivant ces différentes étapes, le concepteur est a priori en mesure de concevoir une machine sûre pour les futurs utilisateurs. Il est cependant, important de noter que la norme NF EN ISO 12100 ne donne aucune information sur l'articulation de la démarche de prévention intégrée avec le(s) processus de conception suivis par les concepteurs de machines.

De plus, si les normes et la littérature fournissent de nombreux éléments pour assister les concepteurs lors des étapes d'estimation, d'évaluation et de réduction des risques, ce n'est pas le cas pour les étapes relatives à la détermination des limites et à l'identification des phénomènes dangereux. Elles sont en effet peu traitées dans ces documents alors que ce sont les deux étapes initiales qui, par définition, conditionnent toute la suite de la démarche de prévention intégrée.

L'analyse de la littérature montre également que la plupart des approches proposées pour l'appréciation des risques sont spécifiques à un type de risque. Elles ne permettent donc pas de prendre en considération des risques de natures différentes simultanément. Si pour cela, il est généralement proposé de s'appuyer sur des revues de projets en impliquant des acteurs

avec des expertises différentes, cette solution n'apporte aucune aide aux ingénieurs et techniciens de bureaux d'études lorsqu'ils travaillent de façon autonome entre deux revues de projet (Hale et al., 2007). Ces revues de projet nécessitent également de générer des supports de communication tels que des prototypes ou des modélisations, impliquant d'être assez avancé dans le processus de conception (Kjellén, 2007).

Une étude de la gestion des risques dans d'autres secteurs industriels tels que la gestion du trafic aérien ou la construction de bâtiments montre qu'il est difficile de transposer une démarche de prévention intégrée d'un secteur industriel à un autre (Drogoul et al., 2007; Feng, 2013; Hayns, 1999; Kirwan, 2007; Kjellén, 2007; Kunitomi & Shiozawa, 2004; Petti et al., 2006). L'adaptation de démarches ayant d'autres objectifs, telles que celles de l'écoconception (Bovea & Pérez-Belis, 2012) s'est également révélée infructueuse pour ce travail de thèse du fait de la spécificité des objets manipulés.

Cette analyse de la littérature confirme donc l'intérêt de fournir aux concepteurs de machines, et plus particulièrement de machines spéciales, une approche focalisée sur l'identification des phénomènes dangereux. En effet, cette étape est peu traitée dans la littérature et par définition, il n'existe pas de normes de type C pour les machines spéciales. La proposition d'une approche permettant d'identifier de manière systématique les phénomènes dangereux représente en conséquence un apport à la littérature existante.

Cette approche d'identification des phénomènes dangereux doit également s'inscrire dans un processus de conception qui peut être différent selon les entreprises ou les projets. Afin d'être la plus générique possible, l'approche envisagée doit donc être exploitable à partir des données générées dans les différentes phases qui composent ces processus.

La partie suivante revient donc sur la définition d'un processus de conception et des éléments qui lui sont liés (démarches, étapes, activités, tâches, méthodes, outils, objets intermédiaires et données).

2. Le processus de conception

Dans cette étude, le processus de conception désigne l'ensemble des composantes qui interagissent, guident, organisent et sont générées par le concepteur lorsqu'il doit décrire, définir et créer un produit répondant aux besoins d'un client. Pour cela, le concepteur s'appuie sur des connaissances, compétences et objets. L'ensemble des concepteurs ne suivent pas spécifiquement les mêmes éléments de conception.

L'approche proposée dans ce mémoire doit s'intégrer au processus de conception afin de permettre au concepteur d'élargir son champ de réflexion quant à la prise en compte des aspects santé – sécurité au meilleur moment. Dans cette partie sont détaillés les principaux éléments appartenant à ce processus (démarches, étapes, activités, tâches, méthodes, outils, objets intermédiaires et données). Un très grand nombre de travaux s'intéressent à ces derniers avec des niveaux d'analyse et des domaines d'application diversifiés. Cette analyse de la

littérature s'appuie en conséquence sur des travaux de synthèse (Delpanque et al., 2014; Godot, 2013; Hasan, 2002; Lutters et al., 2014; Tollenaere, 1998).

Devant la multiplicité des éléments composants le processus de conception, il est nécessaire que l'approche repose sur des éléments du processus de conception commun à une majorité de concepteur. Ce dernier critère est celui par lequel les éléments analysés sont comparés. Cette partie présente dans un premier temps ces différents éléments et est conclue par l'analyse de la pertinence de leur exploitation dans le cadre de ce travail.

2.1. Démarches et activités de conception

A l'instar de la conception de produits, concevoir une machine consiste à passer de l'expression des besoins à la fabrication de la solution qui répondra à ces besoins. La multiplicité des domaines (machines industrielles standards ou spéciales, produit de grande consommation, etc.), des objectifs (coûts, délais, performance, qualité, environnement, etc.) implique que de nombreuses démarches ont été développées dans la littérature. Il est possible de citer de manière non exhaustive : la conception systématique illustrée en annexe 1 qui reste une référence aujourd'hui au niveau académique et qui est largement déployée au niveau industriel (Pahl & Beitz, 1977), l'ingénierie système (Faisandier, 2011), la conception intégrée (Tichkiewitch & Veron, 1997), la conception distribuée (Garro et al., 1995) ou encore l'ingénierie concourante (Krishnan et al., 1997; Sohlenius, 1992). Leurs différences se situent au niveau des fonctions et de l'organisation des activités et autres éléments qui les composent, de leur vision du futur produit ou encore de l'organisation du travail des concepteurs. Certaines démarches organisent jusqu'à la manière dont doivent collaborer les participants aux projets. C'est le cas de l'ingénierie concourante (Krishnan et al., 1997) qui propose aux différents acteurs d'un projet un mode de fonctionnement leur permettant de réaliser les activités non plus de manière séquentielle mais simultanée afin de réduire le temps de développement.

Ces démarches présentent toutefois certaines similarités (Scaravetti et al., 2005) : elles procèdent toutes par découpage du processus de conception en phases et activités (Lutters et al., 2014). Elles mettent également en avant le caractère itératif du processus avec des étapes (ou jalons) de validation et des boucles de retour entre ces phases. Comme cela est représenté sur la figure 8, les trois phases suivantes, selon Scaravetti et al., sont communes à la plupart des démarches de conception :

- La conception conceptuelle qui débute par une phase où le besoin du client est détaillé dans un formalisme que le concepteur peut exploiter et se termine par la définition d'un concept de solution permettant de répondre à ce besoin ;
- La conception architecturale où plusieurs solutions basées sur ce concept sont proposées pour répondre au besoin du client et décrites globalement, aboutissant sur une l'architecture de la solution technologique à développer ;
- La conception détaillée qui décrit l'ensemble des caractéristiques liées à cette solution technologique ainsi que tous les documents relatifs liés au produit.

En plus de ce découpage en phase, ces démarches sont constituées d'activités de conception organisées entre elles, ces dernières pouvant changer d'une démarche à l'autre. Une activité de conception est définie comme une partie élémentaire d'un savoir-faire (Godot et al., 2014). Elles contribuent à développer la solution qui répondra aux besoins du client. Ces activités sont elles-mêmes constituées de tâches de conception génériques : enrichir/ créer, représenter, dimensionner, optimiser/ évaluer, valider.

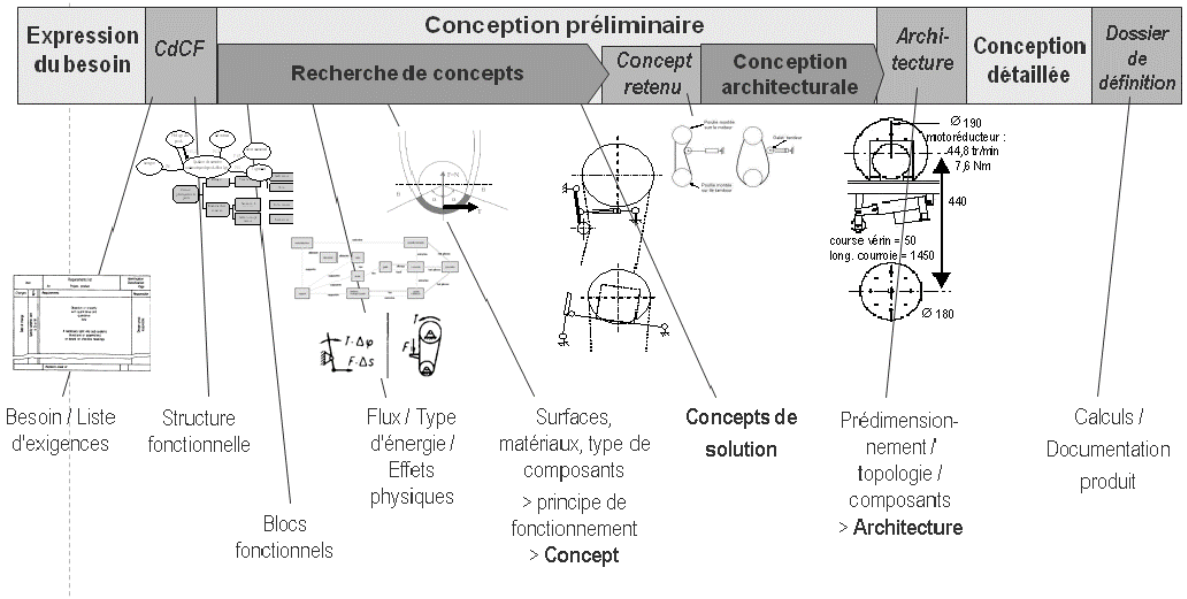


Figure 8. Représentation générique des démarches de conception (Scaravetti et al., 2005)

Pour atteindre les objectifs fixés par les activités de conception, des méthodes et moyens sont mis à la disposition des concepteurs et sont détaillés dans la partie suivante.

2.2. Méthodes et moyens de conception

Les méthodes désignent les suites d'instructions que doivent suivre les concepteurs pour atteindre les objectifs d'une ou plusieurs activités de conception. Elles sont nombreuses dans la littérature (APTE, 2016; Blizzard & Klotz, 2012; Borutzky, 2009; Martin et al., 2004; Mathieu & Marguet, 2001; Tichkiewitch & Veron, 1997; Tomiyama et al., 2009) et reposent sur l'exploitation de moyens qui peuvent être des outils (ex. : logiciel de CAO), des modèles (ex. : schéma cinématique, plan 2D) ou des ontologies (ex. : Function-Behaviour-Structure) (J. S. Gero, 1990; John S. Gero & Kannengiesser, 2004; Lutters et al., 2014).

L'analyse de la valeur, l'analyse fonctionnelle (Benizri et al., 2016) et la méthode APTE (APTE, 2016) sont par exemple connues pour leurs outils comme la « bête à corne » pour définir le besoin du client, le « diagramme pieuvre » pour l'identification des éléments qui interagissent avec le système et les fonctions qui les lient à celui-ci et le SADT (Structured Analysis and Design Technic) pour l'organisation des fonctions du produit avec les entrées/sorties et les ressources mises en œuvre (IGL Technology et al., 1989).

L'ontologie FBS est constituée d'une succession d'étapes permettant de conceptualiser un produit autour de trois notions : les fonctions (Function), les comportements (Behaviour) et la structure (Structure). En suivant les processus permettant de les formaliser, le concepteur est capable de confronter la conception d'un produit tel qu'il est envisagé avec la réalité. Au travers de ces comparaisons, le concepteur peut ainsi adapter la solution (telle que décrite dans les trois ontologies) afin de faire correspondre les attentes du client, la solution envisagée par le concepteur et les possibilités proposées par l'état de l'art technologique. Il est à noter que FBS a été améliorée par Gero et Kannengiesser pour donner le *situated FBS* qui intègre désormais une distribution des étapes autour de trois milieux : le monde envisagé auquel appartiennent les hypothèses et les objectifs attendus (expected world), le monde interprété constitué par les concepts et retours d'expériences (interpreted world) et le monde externe décrit par les données réelles (external world).

Parmi les autres moyens de conception, les modèles fournissent un formalisme pour représenter une vision restreinte du produit à concevoir. Ainsi, le schéma cinématique modélise les aspects structurels globaux et les mouvements, tandis que les graphes de puissance représentent les échanges d'énergies entre composants.

Ces méthodes et moyens ont donc des contextes d'utilisation et vérifient des objectifs différents. Ils utilisent et génèrent des objets intermédiaires et des données de conception présentés dans le paragraphe suivant.

2.3. Objets intermédiaires et données de conception

Le processus de conception peut également être vu comme une génération progressive de données et d'informations qui vont permettre au concepteur de décrire les caractéristiques du produit qu'il conçoit. Ces dernières sont formalisées et capitalisées par les objets intermédiaires de conception qui garantissent leur maturité à un instant donné dans différents langages pouvant être graphique, naturel ou autre (Mer et al., 1995). Ces objets intermédiaires sont également les supports de communication entre les acteurs de la conception.

Ces éléments intermédiaires jalonnent les démarches de conception en séparant deux activités successives. Leurs supports sont multiples (ex. : papier, fichier informatique, document formalisé, prototype). Ils permettent aux parties prenantes (ex. : concepteurs, clients, commerciaux) d'évaluer l'avancement du projet (Boujut & Blanco, 2003; Jeantet, 1998) en capitalisant les informations générées. Cette capitalisation peut concerner l'intégralité du produit à un instant donné (ex. : cahier des charges fonctionnel) ou une partie (ex. : plan, gamme d'assemblage, notice d'utilisation).

Plusieurs éléments intermédiaires ayant des supports et contenant des données dans des langages différents peuvent en conséquence être nécessaires pour capitaliser l'ensemble des caractéristiques de la machine.

2.4. Conclusion sur le processus de conception

Comme indiqué au paragraphe 3 du chapitre 1, l'approche envisagée dans le cadre de cette thèse doit être générique non seulement vis-à-vis des types de phénomènes dangereux mais également vis-à-vis du processus de conception suivis par les concepteurs de machines. Or, comme le montre l'analyse bibliographique, il existe une grande diversité au niveau des démarches, méthodes et moyens qui composent ce processus.

Pour atteindre l'objectif de généricité vis-à-vis des éléments manipulés durant le processus de conception, il est possible de s'appuyer sur la décomposition des activités de conception proposée par (Godot et al., 2014) en 5 taches génériques que doivent réalisées tous les concepteurs. Les données de conception ainsi que les éléments intermédiaires générés durant les trois premières tâches (créer, dimensionner, représenter) seraient traités par l'approche proposée. Les résultats sur l'identification des phénomènes dangereux viendraient alors alimenter la tâche de validation comme cela est représenté sur la figure 9.

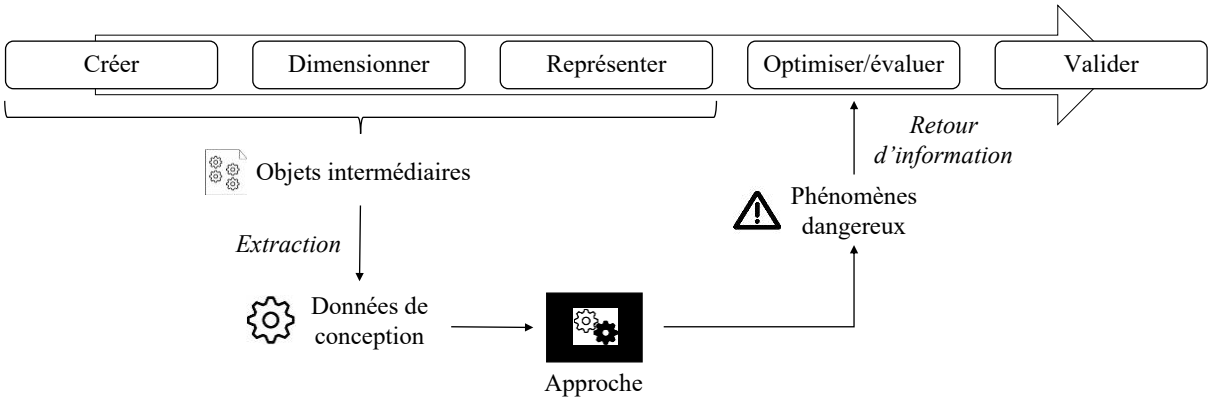


Figure 9. Placement de l'approche vis-à-vis des tâches de conception

Après avoir analysé de façon séparée les travaux sur la démarche de prévention intégrée et sur le processus de conception, cette troisième partie de l'analyse bibliographique porte sur les travaux qui cherchent à articuler ces deux domaines. Il s'agit du Design for Safety.

3. Design for Safety

Parmi les constituants du processus de conception détaillés dans la partie précédente, le domaine « Design for X » introduit par (Meerkamm, 1994) décrit des éléments de conception permettant d'optimiser l'activité de conception autour d'un critère cible pouvant être la protection de l'environnement (Kriwet et al., 1995), le coût (Monreal et al., 2014) ou encore la sécurité et la santé des opérateurs (Sadeghi et al., 2015; Sadeghi et al., 2016). Ce dernier est appelé Design for Safety.

Une partie des travaux se rapportant à ce domaine a déjà été analysée au travers de l'analyse bibliographique sur la prévention intégrée, notamment celle qui concerne l'analyse des risques. Seul ceux portant sur l'articulation de la démarche de prévention intégrée telle que

définie par la norme NF EN 12100 avec le processus de conception seront abordés dans cette partie.

3.1. Démarches

Le contexte du Design for Safety recommande l'amélioration du partage des connaissances entre les différents corps de métiers avec une implication forte de l'expert en santé-sécurité (Dowlatshahi, 2001; Fadier & De la Garza, 2006; Hale & Swuste, 1998; Jouffroy et al., 1999; Rausand & Bouwer Utne, 2009; Vink et al., 1997). Certains travaux proposent pour cela de se baser sur des théories de la conception comme c'est le cas pour Le Modèle de Conception Distribuée (MCD) (Jouffroy et al., 1999), le Knowledge Based Management System (Dowlatshahi, 2001) et l'ingénierie concourante. Dans le cas du MCD, cette démarche propose d'organiser en réseau et en module les équipes de conception. Chaque module dispose d'un objectif propre et peut communiquer avec les autres modules dans le but de paralléliser les tâches. L'intérêt de ce modèle est qu'il permet d'intégrer les acteurs de la sécurité dans le processus de conception au même titre que ceux en charge des aspects structurel, fonctionnel, etc.

Ces démarches se concentrent cependant sur les périodes durant lesquelles de multiples acteurs peuvent être impliqués et sur une externalisation, vis-à-vis du concepteur, des compétences liées à la prévention. En conséquence, lorsque ce dernier travaille de manière autonome, il ne dispose plus de ces compétences et ne peut donc plus prendre en considération de manière efficace les exigences de sécurité, brisant ainsi la continuité de la prévention.

3.2. Méthodes

De nombreuses méthodes sont proposées dans la littérature pour assister les concepteurs vis-à-vis de certains objectifs liés à la prévention intégrée tels que l'estimation des risques (Cacciabue, 2004; Kjellén, 2007); l'analyse des risques globale (A. Hale et al., 2007; Mentes & Ozen, 2015) ou restreinte au non-respect des principes ergonomiques (Didelot, 2001) ou encore l'intégration d'éléments liés à la sécurité des opérateurs dès les premières phases de conception (Ghemraoui, 2009; Sadeghi, 2014).

Ainsi, la méthodologie MAFERGO (Didelot, 2001) propose une méthode en cinq étapes pour améliorer la fiabilité et la sécurité des systèmes homme-machine durant le processus de conception. Cette méthodologie s'intègre dans l'organisation du processus de conception en ajoutant de nouvelles tâches aux acteurs pour identifier les dysfonctionnements des systèmes homme-machine.

La méthode IRAD (Innovative Risk Assessment Design) illustrée par la figure 10 propose de traiter simultanément les fonctions techniques et les fonctions de sécurité tout au long du processus de conception (Ghemraoui, 2009; Sadeghi, 2014). Cette méthode a pour objectif d'obtenir une meilleure intégration des solutions techniques et des décisions liées à la prévention des risques. Cette méthode est inductive, dynamique, intégrée et générique vis-à-

vis des machines et des énergies. Elle s'applique cependant plus au processus de réduction des risques (spécifications de fonctions de sécurité, recherche de principes et solutions techniques). Elle n'apporte donc pas d'éléments supplémentaires vis-à-vis de l'identification des phénomènes dangereux.

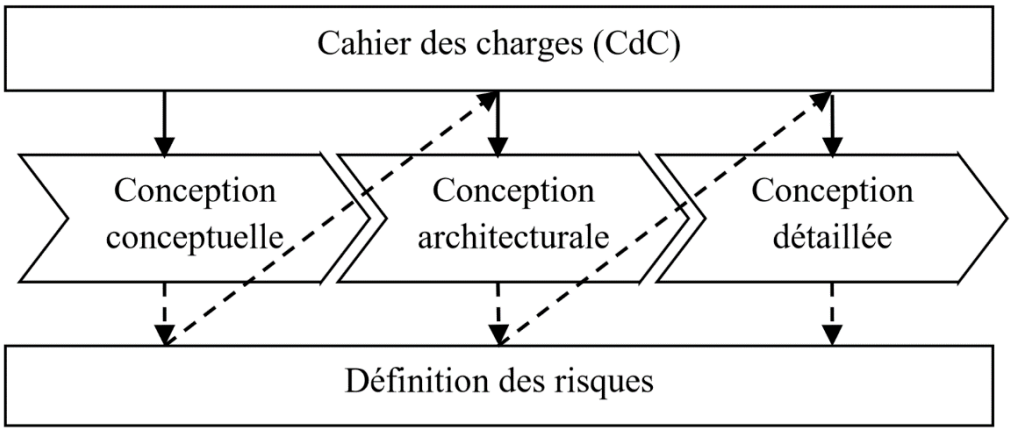


Figure 10. Modèle d'IRAD pour intégrer la sécurité au plus tôt en phase de conception du produit (Ghemraoui, 2009)

Deux méthodes intégrant la prévention en conception de plateformes pétrolières (conception centrée humain et le concept de barrière pour les énergies) ont également été comparées par (Kjellén, 2007). Il en ressort que celles-ci mettent systématiquement en jeux des experts en sécurité, mais également l'exploitation des données issues de plateformes existantes (ex. : retour d'expériences). Les autres acteurs de la prévention tels que les opérateurs sont également mis à contribution lors de revues de projet centrées sur les objets intermédiaires de la plateforme à concevoir. Comme pour le constat réalisé dans le chapitre 1, la mise en œuvre de la prévention intégrée se fait principalement au cours de revue de projet.

Les méthodes du Design for Safety analysées ici ne présentent donc pas de réponses aux attentes de l'approche.

3.3. Moyens

De nombreux outils assistent la conception dans différents domaines comme la construction (Benjaoran & Bhokha, 2010; Zhou et al., 2012), les processus chimiques (Schupp et al., 2006), l'organisation de locaux (Gardeux & Marsot, 2014). Ils permettent de mettre en œuvre les principes du Design for Safety en améliorant ou en complétant ceux déjà utilisés par les concepteurs.

Ainsi, le PAG (Performance Analysis aGent) proposé par (Shahrokhi & Bernard, 2005 ; Shahrokhi & Bernard, 2009) est un système expert d'analyse de performance, en particulier de la sûreté des situations de travail d'un système de production. Comme montré sur la figure 11, il se base sur l'utilisation d'un mannequin numérique qui intègre cinq agents de modélisation (morphologique, biomécanique, cinématique, physiologique et psychologique) et quatre agents

d'analyse (facteurs humains, risques, économique et performance industrielle). Ce système est donc a priori générique vis-à-vis des phénomènes dangereux. Il est également intégré dans les outils de conception et propose un raisonnement basé sur l'utilisation des paramètres de conception d'une situation de travail. Cependant, le PAG nécessite d'être suffisamment avancé dans le processus de conception car il repose sur une simulation numérique détaillée. Il est donc difficilement applicable en début de projet lors de la définition de l'architecture du futur équipement de travail.

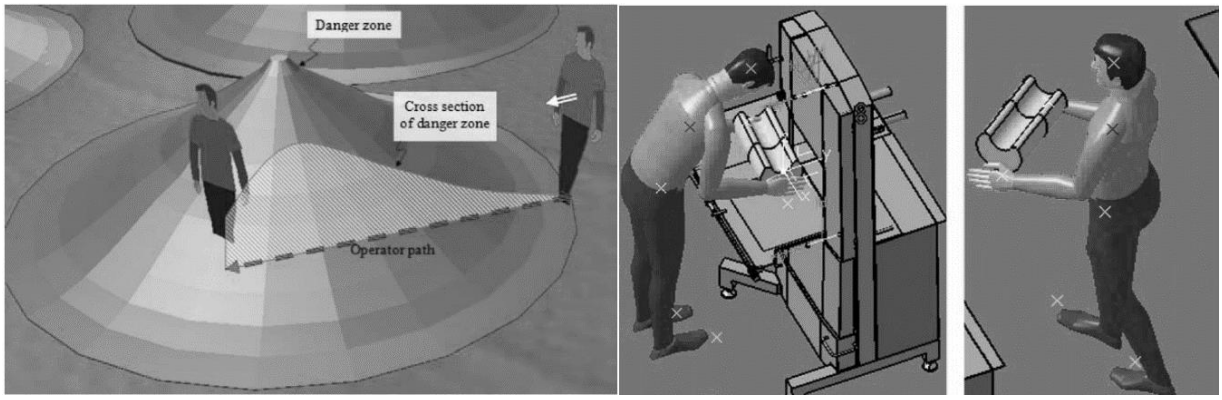


Figure 11. Calcul du niveau de risque auquel est exposé un opérateur en fonction de sa trajectoire (à gauche) et de son activité (à droite)

Des modèles ont également été développés afin de définir des éléments liant l'analyse de risque au processus de conception. Au travers d'organisations des connaissances et de données générées, ces modèles fixent les objectifs à atteindre aux différents acteurs participant à la conception (Hasan, 2002; Le Coze, 2013; Leveson, 2004).

Parmi les travaux précédemment cités, c'est le modèle générique de situation de travail (MOSTRA) qui se rapproche le plus des objectifs fixés dans le chapitre 1 (Hasan, 2002). Ce modèle a en effet été proposé pour aider les concepteurs dans l'application de la démarche de prévention intégrée. Il définit l'ensemble des interdépendances entre les différents constituants d'une situation de travail, notamment entre ceux de « Solution technique » et de « Phénomènes dangereux ». Ce modèle est donc générique vis-à-vis des machines, des éléments du processus de conception et des phénomènes dangereux pris en considération. Cependant, en tant que modèle, MOSTRA ne définit pas la manière dont les classes et paramètres doivent être complétés. Il reste également trop général et les paramètres de conception ne sont pas explicités. Et comme cela apparait sur la figure 12, il ne lie également pas directement les paramètres de conception aux phénomènes dangereux, élément recherché pour cette thèse qui a été amorcé dans d'autres travaux exploitant le MOSTRA (Martin et al., 2012).

Comme cela a été expliqué dans la partie 2.2 sur les moyens de conception en général, ceux relevant du Design for Safety ne répondent pas à l'ensemble des objectifs recherchés dans ce travail de recherche.

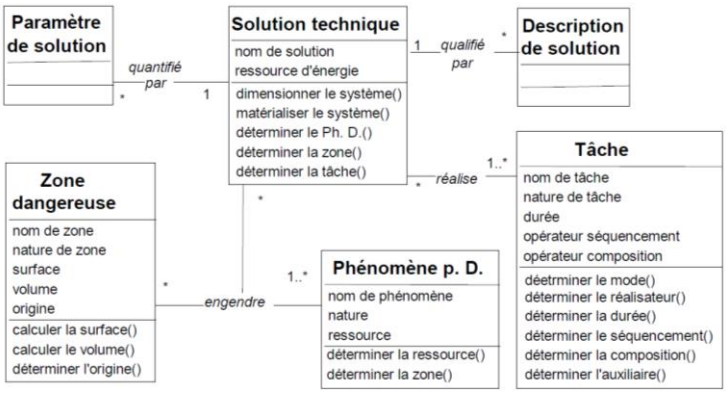


Figure 12. Illustration des liens entre les concepts de « solution technique » et de « phénomène dangereux » du modèle MOSTRA (Hasan, 2002)

3.4. Conclusion sur le Design for Safety

L'objectif de cette partie était d'identifier parmi la littérature relevant du Design for Safety ceux qui portent sur l'articulation entre les principes de la prévention intégrée et le processus de conception, cela afin de rechercher ceux proposant potentiellement des solutions aux problématiques soulevées dans le chapitre 1.

Les constats sont identiques à ceux portant sur la démarche de prévention. Les travaux recensés s'intéressent rarement d'une façon détaillée à l'étape d'identification des phénomènes dangereux durant le processus de conception. Parmi ceux qui l'évoquent, aucun ne l'approfondit ou ne fournit d'éléments concrets pour réaliser cette identification. De même, la plupart de ces travaux portent sur la phase de vie d'utilisation. L'application des méthodes ou moyens aux autres phases de vie est peu ou pas détaillée.

Enfin, l'articulation entre les démarches de conception et prévention reposent le plus souvent sur l'intervention de multiples acteurs lors des revues de projets. Si cette articulation est nécessaire, elle n'est pas suffisante car elle ne concerne pas les activités de conception entre deux de ces réunions. Il apparaît également que peu de travaux vérifient une ou plusieurs des quatre caractéristiques fixées comme objectifs dans ce travail de recherche (générique, dynamique, inductive et intégrée).

On peut toutefois remarquer que plusieurs travaux du domaine « Design for Safety », et de façon plus restreinte sur la démarche de prévention intégrée au sens de la norme NF EN ISO 12100, reposent sur l'hypothèse selon laquelle les phénomènes dangereux sont liés à la présence d'énergie (Ghemraoui, 2009; Hasan, 2002; Kjellén, 2000; Shahrokhi, 2006). Si ce lien existe, il est alors possible d'identifier indirectement les phénomènes dangereux en identifiant les éléments liés aux énergies présentes dans la machine.

En conséquence, l'analyse bibliographique a été étendue aux travaux permettant de modéliser une machine au travers de ses échanges d'énergies.

4. Modélisation de machine au travers de ses flux d'énergies

4.1. Lien entre énergie et phénomènes dangereux

Il est tout d'abord nécessaire d'expliciter le lien entre la présence d'énergies et les phénomènes dangereux afin de mettre en lumière ce qu'il implique pour leur identification. Un phénomène dangereux est une source de dommage (Norme, 2010b). Comme détaillé dans le chapitre 2, le risque issu d'un phénomène dangereux est fonction de deux paramètres :

- la gravité du dommage ;
- la probabilité d'occurrence de ce dommage.

La gravité du dommage est estimée en prenant en compte la gravité des lésions ou de l'atteinte à la santé et l'étendue du dommage. Ces deux paramètres sont de manière évidente directement liés à la quantité d'énergie associée au phénomène dangereux considéré. Par exemple, en cas de choc créé par un élément mobile, la gravité sera dépendante de l'énergie cinétique échangée entre cet élément et l'opérateur. En cas de contact avec un flux d'énergie électrique, le niveau d'énergie différencie le picotement de la paralysie musculaire. Ce constat peut être généralisé aux autres formes d'énergies.

Il faut toutefois remarquer que si la gravité d'un dommage est directement liée à la quantité d'énergie du phénomène dangereux, elle peut également dépendre d'autres paramètres de conception (forme, matériau, etc.) qui vont modifier la nature du dommage : par exemple, pour une même quantité d'énergie cinétique, la gravité d'un contact avec une pièce mobile sera différente selon la forme de cette pièce (contondante ou tranchante), le matériau (rigide ou élastique), la position d'une autre pièce (sur la trajectoire du mouvement ou non), etc.

Pour ce qui est de la probabilité d'occurrence d'un dommage, elle est estimée à partir de l'exposition des personnes au phénomène dangereux, de l'occurrence d'un évènement dangereux et de la possibilité d'éviter ou de limiter le dommage. L'énergie de la machine ou des opérateurs n'intervient donc pas dans l'estimation de ces trois indicateurs. Ces derniers sont en effet principalement liés aux paramètres d'organisation et d'environnement dans lesquels s'intègre la machine.

Ainsi la détection des phénomènes dangereux d'une machine est associée principalement à l'identification des sources et flux d'énergies ainsi qu'à l'analyse des paramètres qui les caractérisent. Comme cela est représenté sur la figure 13, ces paramètres énergétiques sont extraits des caractérisations du produit en cours conception afin que le concepteur puisse les connecter à la gravité dans le but d'identifier les phénomènes dangereux.

Cela peut donc être fait tout au long du processus de conception étant donné que les concepteurs définissent progressivement ces paramètres énergétiques. Le concepteur peut être

alors informé au plus tôt de la présence d'un phénomène dangereux et a potentiellement la possibilité de sélectionner un moyen de prévention approprié.

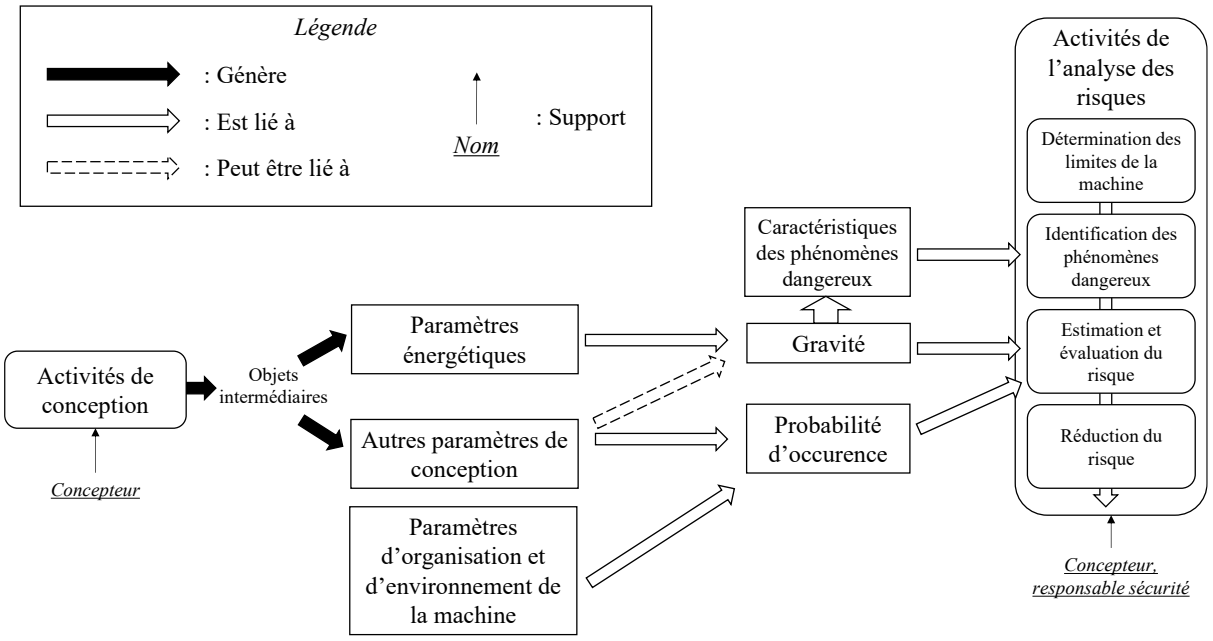


Figure 13. Liens entre les paramètres de conception et ceux utilisés pour l'estimation-évaluation des risques

Ainsi il existe bien un lien entre l'énergie et les phénomènes dangereux, et il est nécessaire maintenant de proposer une modélisation de la machine à concevoir au travers de ses sources et flux d'énergies.

4.2. Analyse de modèles de représentation des énergies

De nombreux modèles sont exploités durant le processus de conception pour représenter un équipement au travers de ses différentes caractéristiques. Le diagramme SADT, le schéma cinématique, les modèles 3D, les mises en plan ou encore un prototype sont autant de modèles permettant de représenter la machine selon la maturité de la conception et le besoin de communiquer sur des caractéristiques particulières de la machine. Si certains se concentrent principalement sur une représentation de l'organisation fonctionnelle (ex. : SADT) ou structurelle de la machine (ex. : schéma cinématique, prototype, etc.), des modèles ont été développés pour représenter cette dernière au travers de ses échanges d'énergies. Le schéma cinématique pour les énergies mécaniques, le schéma électrique et autres diagrammes de puissance pour l'énergie électrique sont parmi les plus connus et les plus utilisés. Ils ne permettent cependant pas de montrer l'ensemble des flux d'énergies d'une machine sur une même représentation.

Il existe toutefois quelques modèles qui permettent de représenter un système au travers de ses échanges d'énergies. Il s'agit du modèle substance champ basé sur les vépoles de la méthode TRIZ (Teorija Reshenija Izobretateliskih Zadatch), du Bond-Graph, de la Représentation Energétique Macroscopique (REM), du diagramme SANKEY, de l'Internal

Block Diagram (IBD) de OMG SysML et enfin du Modèle Fonctiono-structurel (MFS). Ces six modèles sont présentés et comparés dans la partie suivante.

4.2.1. Modèles

4.2.1.1. Modèle substance-champ

Ce modèle intégré dans la méthode TRIZ proposée par (Altshuller et al., 1997) permet de représenter un système ou sous-système en connectant les substances au sens large (ex. : produit, objet) et les champs (ex. : gravité, force élastique, force nucléaire, information). La figure 14 illustre un exemple de ce modèle. Elle représente une substance S1 destinée à être transformée, un outil S2 qui réalise la transformation sur S1, un champ C qui fournit l'énergie nécessaire et deux liens (minimum nécessaire pour le modèle) représentant les échanges entre S1, S2 et C. Dans ce modèle, S1 et S2 reçoivent de l'énergie utile du champ C (ex. : maintien mécanique suivant 2 axes de S1 et force mécanique appliquée sur S2) et S2 transforme utilement S1 (ex. : mise en rotation de S1 par l'action de S2). Ces liens peuvent être de plusieurs types afin de représenter les caractéristiques de ces échanges.

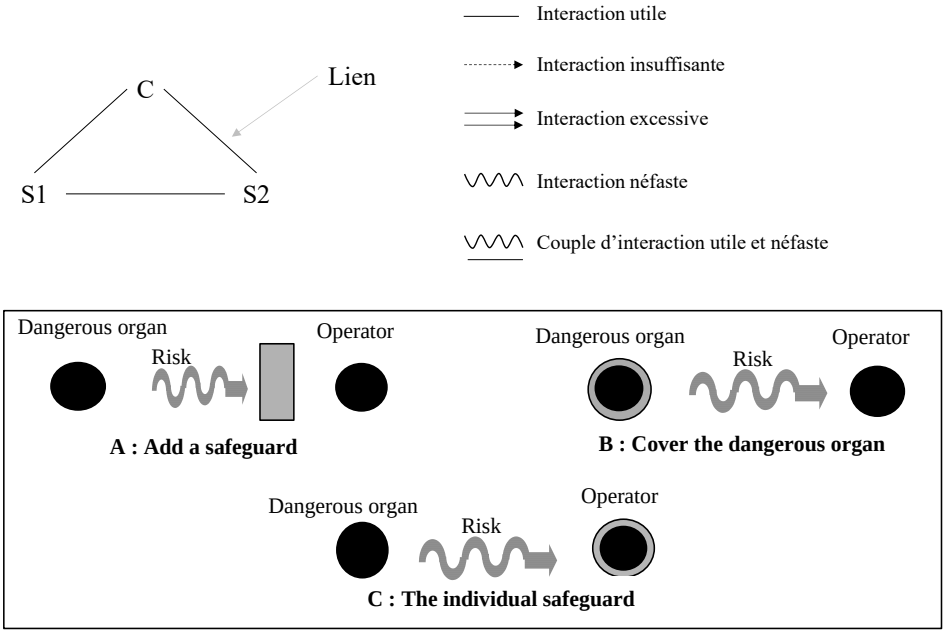


Figure 14. Exemple de modèle substance-champ (en haut) et solutions de prévention proposées par TRIZ (Hasan et al., 2004)

4.2.1.2. Bond Graph

C'est un modèle graphique d'un système dynamique physique (mécanique, électrique, hydraulique, pneumatique, etc.). Il représente les échanges d'énergies existant dans ce système (Paynter, 1961). Comme représenté en figure 15, les flux d'énergies ou d'information sont représentés par des liens. Le Bond Graph repose sur le principe de la conservation de la puissance en exprimant les caractéristiques des énergies au travers d'une source d'énergie et d'un flux d'énergie.

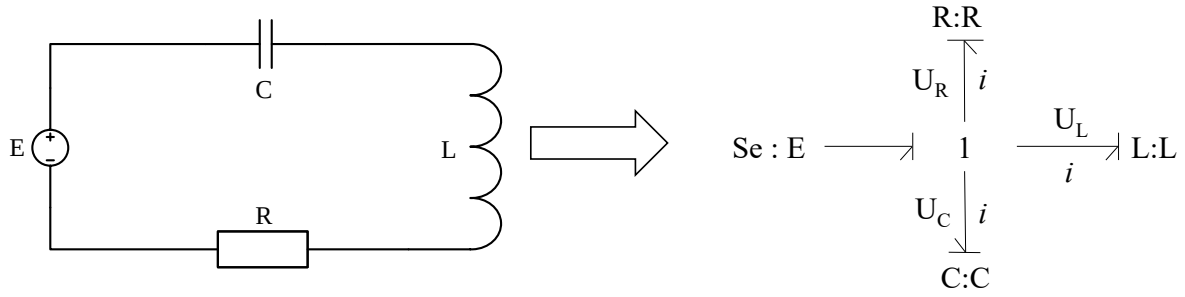


Figure 15. Schéma électrique et graphe de liaisons d'un circuit RLC série

4.2.1.3. Représentation Energétique Macroscopique (REM)

Comme l'illustre la figure 16, cette représentation permet l'analyse des différents flux d'énergies d'un système (Lhomme, 2007). Elle permet aussi l'établissement d'une structure de commande basée sur l'inversion de modèle. L'utilisation de ce formalisme, initialement dédié aux systèmes électromécaniques, a déjà permis de réaliser de nombreuses études dans différents domaines, y compris dans celui des véhicules automobiles.

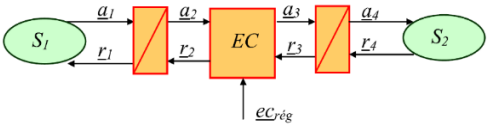


Figure 16. REM d'une chaine de conversion électromécanique (Lhomme, 2007)

4.2.1.4. Diagramme Sankey

C'est un diagramme de flux qui modélise les échanges par des flèches de largeur proportionnelle au flux représenté comme cela est illustré sur la figure 17. Les flux supportés peuvent être de la matière, des informations ou de l'énergie. Les sous-systèmes gérants ces flux sont indiqués aux extrémités des flèches (Schmidt, 2006).

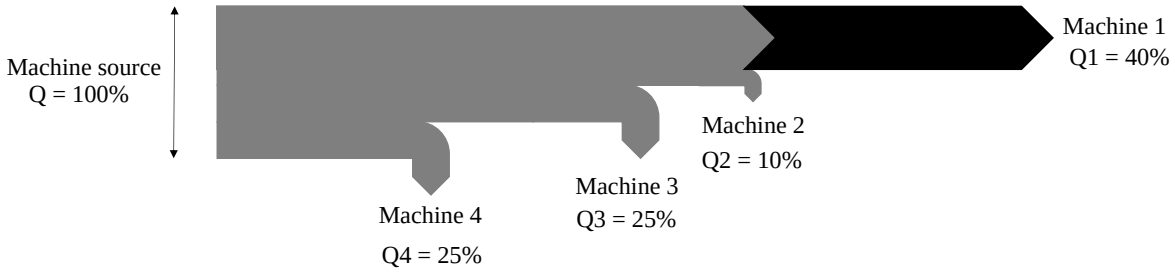


Figure 17. Exemple de diagramme SANKEY

4.2.1.5. Internal Block diagram

Comme le montre la figure 18, l'Internal Block Diagram (IBD) de OMG SysML est un modèle de représentation de système permettant de décrire la structure interne d'un système en termes de sous-systèmes (blocs), interfaces (ports) et connecteurs (flux) (OMG SysML™, 2015).

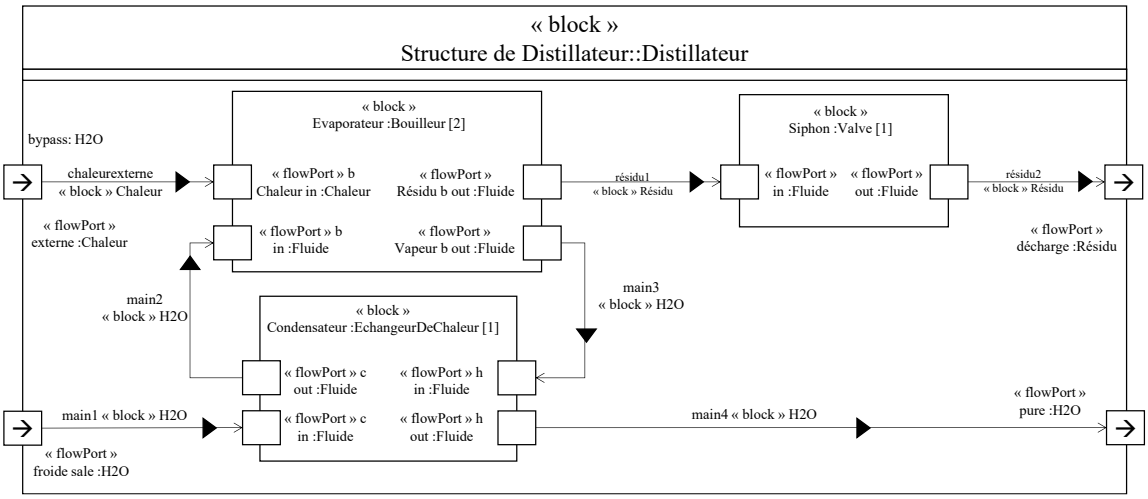


Figure 18. Aperçu de l'IBD d'un distillateur (SysML™, 2015)

4.2.1.6. Modèle Fonctionno-Structurel

Le Modèle Fonctionno-Structurel (MFS) a initialement été développé pour la conception intégrée de produits mécaniques (Constant, 1996). Dans sa thèse, Roucoules utilise ce modèle et ses concepts associés (paramètres généralisés, organisation des données et règles de construction) afin de supporter une méthode de conception intégrée tout au long du processus de conception (Roucoules, 1999). Ce modèle représenté en figure 19 est basé sur la circulation des flux d'énergies au sein d'un système et permet théoriquement de prendre en compte différentes énergies.

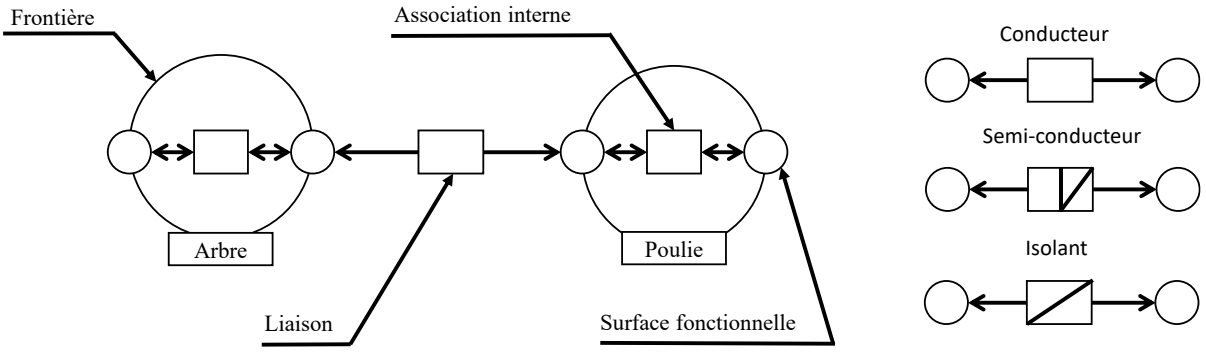


Figure 19. Modèle fonctionno-structurel d'un système arbre-poulie

4.2.2. Comparaison des modèles

Cinq critères ont été définis afin de comparer ces modèles vis-à-vis des objectifs de l'approche recherchée.

En partant de l'hypothèse que les phénomènes dangereux sont liés à la présence d'énergie, notre objectif revient à identifier le plus judicieusement possible les sources et flux d'énergies. En conséquence, le premier des critères de comparaison concerne leur **capacité à modéliser au cours de la conception l'ensemble des sources et flux d'énergies présents** dans une machine, indépendamment du type d'énergie (ex. : mécanique, électrique, chimique).

Les transformations d'énergies reposant sur des technologies réelles, elles génèrent des dissipations. Ces dernières peuvent également être la source de phénomènes dangereux qui doivent être pris en considération. Un autre critère à prendre en compte est donc la **capacité du modèle à pouvoir représenter ces dissipations**.

L'opérateur peut échanger de l'énergie avec la machine lors d'actions définies par le concepteur. Que ce soit le chargement de matières premières, la manipulation de commande en phase de production, les montages ou démontages de pièces en maintenance, etc., toutes ces actions peuvent être ramenées à des échanges d'énergies entre la machine et l'opérateur. Cette énergie peut également être échangée involontairement (ex. : choc involontaire, coupure). Un autre critère de comparaison pour ces modèles est donc la **capacité à pouvoir représenter l'opérateur et ses échanges d'énergies** avec la machine.

Un autre objectif de ce travail est également de fournir une information sur les phénomènes dangereux dès les premières phases du processus de conception. Le modèle doit donc permettre de représenter la machine dès que des données la concernant existent. Un autre critère est donc **la capacité à être exploitable avec un nombre limité de paramètres**.

Enfin, le modèle devra permettre au concepteur de faire évoluer la représentation de la machine tout au long du processus de conception. Il devra donc disposer d'éléments permettant de transformer cette représentation, sans avoir à la refaire à chaque évolution des données de conception. Un dernier critère est donc la **capacité à être dynamique** d'un modèle.

La réponse des modèles précédemment cités à ces 5 critères a été évaluée sur trois niveaux (faible, moyen et fort). Le tableau 3 récapitule les résultats de cette comparaison et l'annexe 2 fournit les justifications de ces résultats.

Tableau 3. Synthèse de la comparaison des modèles

	Modèle Substance Champ	Bond Graph	REM	Sankey	IBD	MFS
Modélisation des énergies	Fort	Moyen	Moyen	Moyen	Fort	Fort
Dissipations	Fort	Moyen	Moyen	Moyen	Fort	Fort
Modélisation de l'opérateur	Fort	faible	Moyen	Moyen	Fort	Fort
Exploitabilité	Faible	Fort	Moyen	Faible	Fort	Fort
Dynamique	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Fort

Le MFS et l'IBD apparaissent comme les modèles les plus compatibles avec l'approche envisagée. Le MFS a finalement été retenu car il possède en plus des règles détaillées et des opérateurs de transformation (aspect dynamique). Il a d'ailleurs été utilisé pour l'étude des systèmes complexes et multi-énergies durant leur processus de conception (Roucoules, 1999).

4.3. Le Modèle Fonctionno-Structurel (MFS)

Comme illustré par la figure 19, le MFS est basé sur quatre éléments : des frontières, des surfaces fonctionnelles, des liaisons et des associations internes. Les frontières délimitent les différents systèmes, sous-systèmes ou composants par rapport à leur environnement externe, les surfaces fonctionnelles modélisent les interfaces par lesquelles le système, le sous-système ou le composant a des relations avec son environnement. Elles sont traversées par une ou plusieurs grandeurs extensives (quantité de matière, de mouvement, énergie, …). Les liaisons associent deux surfaces fonctionnelles n'appartenant pas au même composant. Elles caractérisent ainsi les échanges d'énergies orientés et peuvent être classées en 3 types : conductrices (C,) semi-conductrices (SC) ou isolantes (I). Les associations internes associent deux surfaces fonctionnelles appartenant à un même composant. Elles peuvent également être conductrices, semi conductrices ou isolantes. Les liaisons et les associations internes sont orientées grâce aux flèches pour représenter le sens de l'échange d'énergie (sens unique ou double sens).

Le tableau 4 présente les principales variables généralisées pour caractériser les échanges d'énergies entre les surfaces fonctionnelles. Il s'agit des variables généralisées définies pour les Bond Graph (Borutzky, 2009; Roucoules, 1999).

Tableau 4. Variables généralisées liées au Bond Graph (Roucoules, 1999)

Domaine	Effort généralisé	Courant généralisé
Electrique	Tension (V)	Courant (A)
Mécanique en translation	Effort (N)	Vitesse (m/s)
Mécanique en rotation	Couple (N.m)	Vitesse (rad/s)
Hydraulique	Pression (Pa)	Débit volumique (m^3/s)
Magnétique	Champ magnétique (A/m)	Flux magnétique (Weber)
Chimique	Potentiel Chimique (J/mol)	Flux molaire (mol/s)
Thermodynamique	Température (K)	Flux entropique (W/K)
Acoustique	Pression (Pa)	Débit acoustique (m^3/s)

En considérant les opérateurs qui interagissent avec la machine comme une source d'énergie du système, il est possible de les représenter dans le même formalisme que les autres éléments du MFS. Comme cela est illustré sur la figure 20, l'énergie fournit par l'opérateur à un objet est mécanique (M). En négligeant les frottements liés au contact entre l'opérateur et l'objet, la liaison liant les deux est donc conductrice.

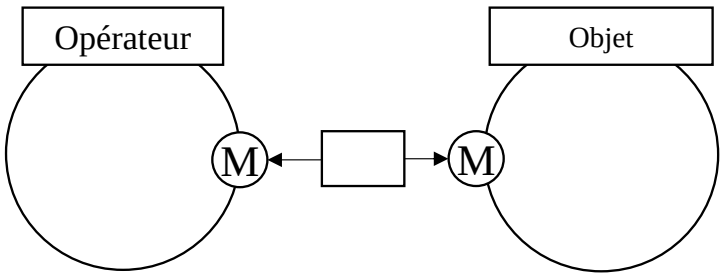


Figure 20. Représentation de l'opérateur dans le MFS

Enfin, le MFS dispose de plusieurs opérateurs de transformation permettant de suivre le principe de décomposition récursive où un système se décompose en sous-systèmes qui se décomposent en composants/pièces élémentaires (Faisandier, 2011). Ces opérateurs de transformation sont les suivants (Constant, 1996; Roucoules, 1999) :

- L'opérateur *décomposition en parallèle d'une liaison ou d'une association interne* permet de remplacer une liaison ou une association par plusieurs liaisons ou associations en parallèle avec leurs surfaces fonctionnelles associées.
- L'opérateur *décomposition en série d'une liaison ou d'une association interne* divise le système initial en plusieurs sous-systèmes. L'association interne ou la liaison initiale est décomposée en des associations internes dans les sous-systèmes et en des liaisons entre eux.
- L'opérateur *découpage d'une surface fonctionnelle* donne la possibilité de raffiner une surface fonctionnelle en la découpant en plusieurs nouvelles surfaces. Ce découpage est lié aux opérations de décomposition des liaisons ou des associations qui induisent de nouvelles fonctions donc de nouvelles surfaces.

A ces opérateurs ont été rajoutés des règles de construction du MFS permettant au concepteur d'être guidé dans sa modélisation lors de certains de ses choix. Le tableau 5 capitalise ces différentes règles. Dans cette table, les fonctions représentent les liaisons et/ou les associations internes.

Le MFS est donc centré sur la modélisation d'un système homme-machine au travers de leurs échanges d'énergies. S'il permet en théorie de couvrir tous les flux d'énergies, il sera cependant nécessaire de compléter aussi bien la liste des variables généralisées pour couvrir les différents types de phénomènes dangereux que les opérateurs de transformations pour permettre les recompositions.

Tableau 5. Règles de modifications du MFS (Roucoules, 1999)

Choix concepteur	**type de fonction**	**règle de construction**	**Opérateur sur le modèle**
Remplacer une fonction par une autre fonction	indépendant	Règle 1 : changer le nom de la fonction	aucun
Remplacer une fonction par une association de fonctions	indépendant	Règle 2 : créer une liaison ou une association interne pour chaque nouvelle fonction	- décomposition en parallèle de la liaison ou de l'association - découpage des surfaces fonctionnelles
Remplacer une fonction par une technologie	association interne	Règle 3 : remplacer le nom de la fonction par le nom de la technologie. Appliquer la règle 3 bis.	aucun
		Règle 3 bis : si la technologie choisie ne peut pas réaliser les autres associations internes de l'élément, il faut donc créer de nouveaux éléments.	- décomposition d'un élément. - décompositions en série.
	liaison	Règle 4 : remplacer la liaison par un nouvel élément représentant la technologie choisie. Cet élément a sa propre association interne. Il faut alors mettre en place les liaisons entre le nouvel élément et le système.	- décomposition en série de la liaison. - découpage des surfaces fonctionnelles

5. Conclusion du chapitre

On recense dans la littérature de nombreux travaux sur l'estimation, l'évaluation et la réduction des risques ainsi que sur le Design for Safety qui abordent ces aspects en lien avec le processus de conception. Malgré cela, peu de ces travaux s'intéressent particulièrement à l'étape d'identification des phénomènes dangereux, bien qu'elle soit essentielle car il s'agit de l'étape initiale de toute la démarche d'intégration de la prévention à la conception. Par ailleurs, leur analyse montre qu'aucun de ces travaux ne répond simultanément aux quatre caractéristiques auxquelles l'approche recherchée doit répondre (générique, inductive, dynamique et intégrée). La proposition d'une approche centrée sur l'identification systématique des phénomènes dangereux tout au long du processus de conception, représente donc un apport supplémentaire par rapport à la littérature existante.

L'analyse de la littérature a également montré qu'afin que l'ensemble des concepteurs puissent utiliser l'approche proposée dans ce mémoire, y compris ceux appartenant à des TPE-PME et qui disposent rarement d'une démarche de conception formalisée, il est nécessaire de baser cette identification des phénomènes dangereux sur l'utilisation de méthodes et d'outils exploitant des données de conception et des éléments intermédiaires les capitalisant.

L'approche doit donc exploiter les paramètres générés tout au long du processus de conception qui caractérisent les sources et flux énergétiques. Ce lien entre phénomènes dangereux et présence d'énergies est en effet un constat commun à de nombreux travaux de la littérature. Après comparaison de différents modèles permettant une représentation énergétique d'un produit, le Modèle Fonctionno-Structurel (MFS) a été retenu pour ce rôle car il respecte l'ensemble des différents critères désirés. Il est cependant nécessaire de compléter ce modèle par :

- différents traitements afin de pouvoir identifier l'ensemble des phénomènes dangereux, leurs conséquences et informer en retour le concepteur ;
- les règles de modélisation pour couvrir les différents cas d'utilisation et phases de conception (conceptuelle, architecturale et détaillée).

Le chapitre suivant présente en détail les différents aspects de cette approche ainsi que son intégration dans le processus de conception.

Chapitre 3 : EZID

C'est pour répondre aux problématiques soulevées dans les chapitres précédents qu'est proposée la méthode EZID (pour Energy analysis for systematic haZard Identification during Design). Elle a pour but de permettre aux concepteurs de machines d'identifier de manière systématique les phénomènes dangereux tout au long du processus de conception. Initiée lors de différents travaux préliminaires du LC2S (Amara, 2013), elle repose sur le constat présentée dans le chapitre 2 partie 3.4 selon lequel les phénomènes dangereux sont liés à la présence d'énergies. Cette méthode exploite donc les objets intermédiaires et les données de conception générés par les concepteurs pour analyser les sources et flux d'énergies. EZID est constituée d'une étape de modélisation basée sur le modèle fonctionno-structurel (MFS) permettant de capitaliser et d'identifier tous les flux et sources d'énergies d'une machine en cours de conception, et de trois niveaux de traitement permettant de faire le lien entre les données liées aux énergies et les différentes caractéristiques des phénomènes dangereux.

La première partie de ce chapitre présente les objectifs d'EZID et la modélisation au travers du MFS. Des précisions sont apportées à cette modélisation afin de permettre la création d'un MFS pertinent dès les premières phases de conception. Elle est également détaillée par rapport aux différentes phases de vie que traversera la machine. A la fin de cette étape de modélisation, l'ensemble des sources et flux d'énergies sont identifiés. Leurs caractéristiques peuvent ensuite être analysées par les traitements d'EZID.

La seconde partie détaille le premier traitement qui consiste à identifier les types de phénomènes dangereux par association avec les paramètres qui caractérisent les sources et flux d'énergies. Ce traitement exploite pour cela les variables généralisées des Bond Graph qui ont été complétées afin de couvrir tous les types de phénomènes dangereux.

La troisième partie développe le traitement permettant d'identifier les conséquences (ou dommages) liées aux phénomènes dangereux. Dans cette partie, les paramètres clefs ainsi que le principe de combinaison à la base de cette identification sont explicités.

La quatrième partie présente le dernier traitement d'EZID permettant d'identifier le caractère significatif des phénomènes dangereux (soit leur capacité à générer un risque). Cette identification repose sur la comparaison des niveaux d'énergies de la machine avec des valeurs seuils réglementaires ou normalisées. Deux moyens d'organiser les phénomènes dangereux sont également proposés afin de structurer le retour d'informations fait au concepteur.

Enfin, la dernière partie présente l'exploitation d'EZID lors du processus de réduction des risques avec l'impact sur la modélisation de la mise en place de mesures de prévention, et pour l'administration des données de référence. Les spécifications pour son automatisation informatique sont exposées en fin de partie.

1. La méthode EZID

1.1. Objectifs

EZID permet d'assister le concepteur lors de l'étape d'identification de l'ensemble des caractéristiques liées aux phénomènes dangereux au travers d'une étape de modélisation et de trois étapes de traitement (identification du type, identification des conséquences et identification de l'aspect significatif) représentées sur la figure 21.

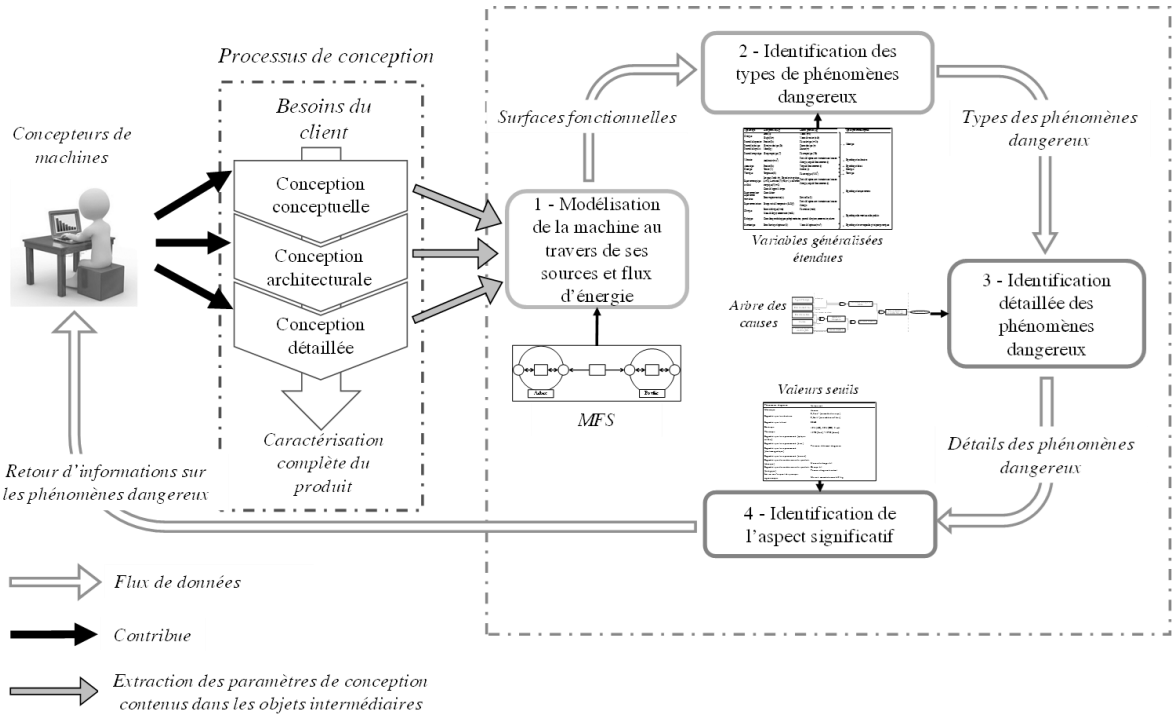


Figure 21. Processus d'EZID lors de son exploitation

A la fin de l'application d'EZID, le concepteur obtient un retour d'information sur les phénomènes dangereux présents dans la machine en conception à un instant donné. A partir de celui-ci, lui ou le spécialiste de la prévention des risques peut continuer le processus d'appréciation des risques et commencer si nécessaire celui de la réduction des risques en ajoutant des mesures de prévention, modifiant en conséquence la modélisation. Ainsi le processus peut être repris afin de permettre au concepteur de vérifier la réduction des risques du système en cours d'étude.

EZID s'applique donc tout au long du processus de conception jusqu'à ce que l'ensemble des caractéristiques des phénomènes dangereux soient identifiées sur la base des objets intermédiaires générés et utilisés. Ces derniers garantissent la maturité des paramètres de conception traités par EZID. Ils permettent également de calquer l'utilisation de la méthode sur celui des jalons du processus de conception.

La partie suivante présente la première étape d'EZID qui consiste à présenter les données de conception dans le formalisme du MFS. Cette étape conditionne les traitements suivants sur lesquels repose l'identification des phénomènes dangereux.

1.2. Identification, description et formalisation des constituants de la méthode

1.2.1. Modélisation de la machine dans le formalisme du MFS

1.2.1.1. Principe de l'utilisation du MFS

L'étape de modélisation est basée sur le formalisme du MFS présenté dans le chapitre précédent. Cette modélisation est une retranscription du point de vue énergétique des limites de la machine telles que le concepteur les définies. Les surfaces fonctionnelles qui font partie intégrante de cette modélisation sont au centre du fonctionnement d'EZID.

Ces surfaces fonctionnelles sont en effet les interfaces par lesquelles sont échangées les énergies dans le système. Chaque surface fonctionnelle expose ainsi l'opérateur de la machine à un phénomène dangereux. En l'absence de moyens de protection, toutes les surfaces fonctionnelles sont à considérer comme potentiellement accessibles. En conséquence de cela, le concepteur doit être capable de montrer en fin de projet qu'il a mis en place des solutions de prévention pour éviter ou réduire les échanges d'énergies entre ces surfaces fonctionnelles et l'opérateur. La figure 22 illustre cette situation.

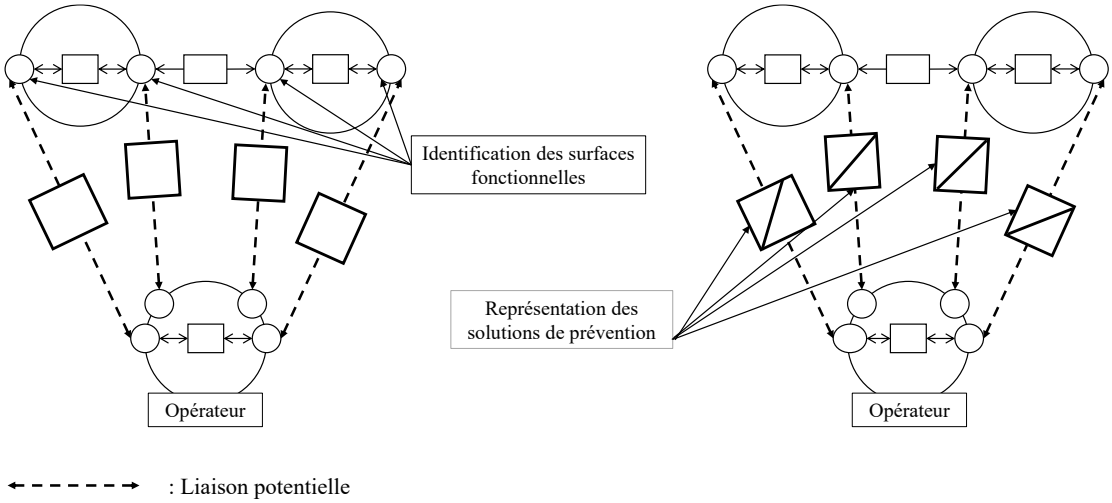


Figure 22. Utilisation du MFS par EZID

Il est à noter que les liaisons potentielles représentées sur la figure 22 le sont à titre indicatif pour permettre une meilleure compréhension de l'utilisation du MFS. Les seules liaisons entre la machine et l'opérateur qui seront représentées dans les modèles présents dans ce mémoire sont celles représentant les interactions homme-machine qui contribuent au fonctionnement de la machine.

Comme présenté dans le chapitre précédent, le MFS possède des opérateurs et des règles de modélisation. La partie suivante détaille ces règles et analyse leur utilisation pour couvrir les différentes phases du processus de conception et du cycle de vie d'une machine.

a) Rappel sur les opérateurs et règles de modélisation

Le MFS a été développé pour analyser des systèmes complexes (Constant, 1996) puis pour suivre et assister les technologues/concepteurs durant le processus de conception d'un produit (Roucoules, 1999; Roucoules et al., 2006). Pour permettre son évolution au cours du processus de conception, et ainsi prendre en compte les décisions prises par le concepteur, le MFS dispose de trois opérateurs de modélisation :

- *Décomposition en parallèle d'une liaison ou d'une association interne ;*
- *Décomposition en série d'une liaison ou d'une association interne ;*
- *Découpage d'une surface fonctionnelle.*

Ces opérateurs peuvent être utilisés au travers de quatre règles. Ces dernières permettent de gérer les transitions durant le processus de conception entre les fonctions définies à un instant donné et les technologies qui les réaliseront (une fonction représentant un type d'échange d'énergies entre deux surfaces fonctionnelles). Elles sont exprimées de la manière suivante :

- Changer le nom de la fonction ;
- Créer une liaison ou une association interne pour chaque nouvelle fonction ;
- Remplacer le nom de la fonction par le nom de la technologie. Si la technologie choisie ne peut pas réaliser les autres associations internes de l'élément, il faut créer de nouveaux éléments ;
- Remplacer la liaison par un nouvel élément représentant la technologie choisie. Cet élément a sa propre association interne. Il faut alors mettre en place les liaisons entre le nouvel élément et le système.

Les opérateurs et règles de modélisation définis dans les travaux de Constant et de Roucoules ayant été appliqués sur des cas d'étude, ils ont donc montré leur capacité à modéliser des systèmes complexes et sont en conséquence suffisant pour couvrir les besoins essentiels de la modélisation (décomposition de la machine au cours du processus de conception, modélisation de l'opérateur et des parties prenantes dans le formalisme du MFS). Des précisions doivent cependant être apportées vis-à-vis de l'utilisation du MFS durant la phase de conception conceptuelle lorsque la machine est uniquement définie par ses contraintes et ses fonctions. Son utilisation pour l'identification des phénomènes dangereux durant les phases de vie autre que l'exploitation nécessite également d'être approfondie.

Enfin, les traitements d'EZID reposant sur une exploitation des surfaces fonctionnelles et des données qu'elles contiennent, il est nécessaire de préciser la manière de systématiser leur modélisation afin d'assister le concepteur. Ces différents aspects sont détaillés dans la partie suivante.

b) Utilisation du MFS

Chaque MFS est basé sur les mêmes éléments (frontière, surface fonctionnelle, liaison et association interne). Il existe un ordre selon lequel ces éléments peuvent être représentés du fait de leurs dépendances mutuelles (une surface fonctionnelle appartient à une frontière, une liaison ou association interne est connectée à deux surfaces fonctionnelles). Il constitue la base de l'utilisation du MFS. Ainsi, la modélisation commence par la définition d'une frontière. Ensuite, ce sont les surfaces fonctionnelles qui sont définies. Lorsqu'au moins deux surfaces fonctionnelles ont été associées à une frontière, il est possible de modéliser une association interne. Lorsqu'au moins deux frontières ayant chacune au moins une surface fonctionnelle sont présentes dans le MFS, il est possible de modéliser une liaison.

- Utilisation durant les phases de conception

Comme cela a été présenté dans la partie du chapitre 2 consacré au processus de conception, la phase de conception conceptuelle débute dès que le client a exprimé son besoin et se termine par la sélection d'un concept de solution. Durant cette phase, le concepteur doit notamment définir les parties prenantes qui interagiront avec la machine (opérateurs, autres machines, environnement, sources d'énergies, etc.) afin de définir les exigences auxquelles la machine est soumise. Ces parties prenantes sont les effets externes à la machine présentés par (Labrousse, 2004). Leur identification correspond à celle des milieux environnant de la méthode APTE avec le point de vue sources potentielles d'énergie généralisée. Après cela, le concepteur définit les fonctions, l'architecture fonctionnelle puis les principaux constituants du concept retenu. Si à ce stade, les solutions technologiques ne sont a priori pas encore définies, les échanges d'énergies entre les parties prenantes et la machine sont eux connus car intrinsèquement liés aux besoins du client (sources d'énergies disponibles, poids, formes, matériaux des matières premières, produits finis, consommables, etc.). En conséquence, dans le cadre de l'utilisation de la méthode EZID, la modélisation dans le formalisme du MFS va exploiter les données générées par le concepteur lors des premières activités de conception et doit au minimum représenter la machine sous la forme d'une frontière unique représentant le système complet, les différentes parties prenantes dans des frontières distinctes ainsi que leurs échanges d'énergies comme cela est illustré sur la figure 23.

Une fois le concept de solution choisi, le concepteur entre dans la phase de conception architecturale où il devra détailler ce concept en termes de structure (ex. schéma cinématique), d'échanges de matières, d'énergies (ex. : graphe de puissance) et de données utiles au fonctionnement de la machine (ex. : GRAPHCET) (Godot, 2013). Les constituants de la solution choisie en conception conceptuelle sont donc définis, liés et organisés les uns par

rapport aux autres, passant de la vision d'un tout pour la machine à une structuration en sous-systèmes organisés.

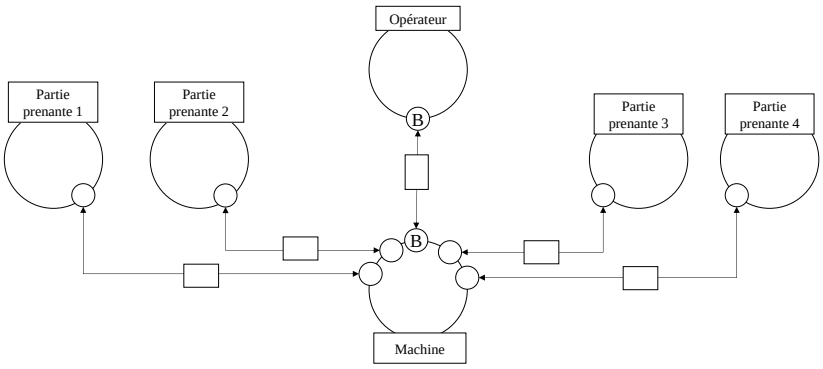


Figure 23. Illustration d'un MFS au cours de la conception conceptuelle

La frontière unique de la machine se décompose en différentes frontières représentant les sous-systèmes, accompagnés de leurs échanges d'énergies. De la même manière, les flux d'énergies liant les parties prenantes à la machine, y compris celles apportées par les opérateurs, se décomposent au niveau des différents sous-systèmes (ex. les sources d'énergies externes peuvent alimenter plusieurs éléments de la machine). En plus des informations sur les échanges d'énergies, il est aussi possible de renseigner les données liées à l'organisation spatiale et topologique des sous-systèmes engendrées par la définition de la structure. Les transformations permettant cette évolution du modèle sont possibles avec les opérateurs et règles de modélisation rappelés au début de ce chapitre comme cela est illustré sur la figure 24.

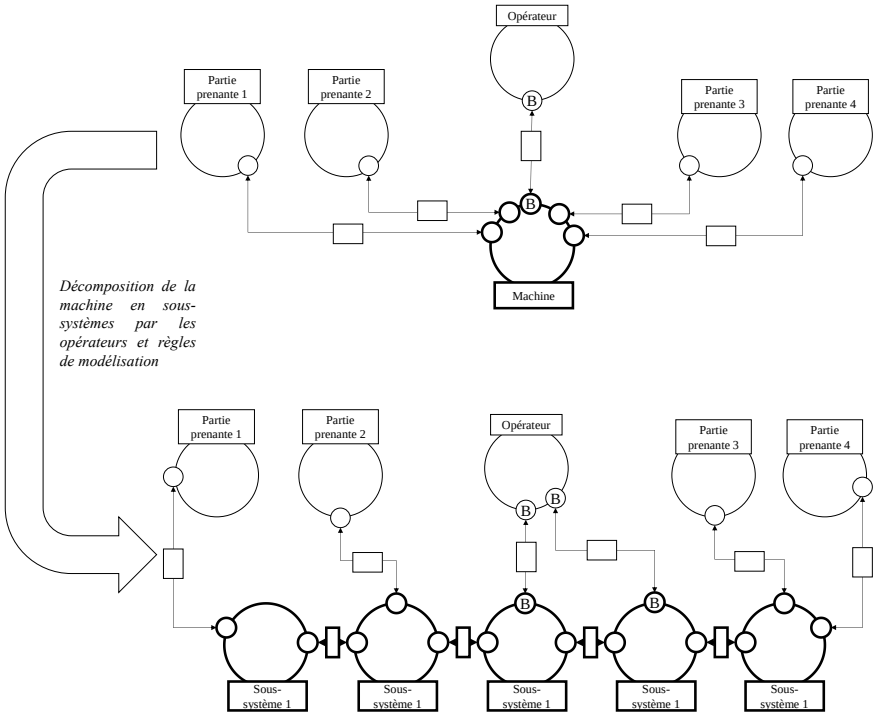


Figure 24. Illustration de l'évolution du MFS entre les phases de conception conceptuelle et architecturale

Il faut toutefois noter que dans le cas de liaisons ou d'associations internes de type semi-conductrice, il y a nécessairement une perte d'énergie sous différentes formes. Afin de permettre une identification complète des phénomènes dangereux présents dans un MFS, il sera donc nécessaire de compléter les opérateurs et règles de modélisation pour permettre la représentation de ces pertes sous la forme de surfaces fonctionnelles.

La phase de conception détaillée est la dernière du processus de conception. Cette phase fait passer la solution établie en conception architecturale dans le réel en définissant des données sur les dissipations d'énergies, sur les états de surface et autres paramètres décrivant la faisabilité et les niveaux de qualité des éléments de la machine. Les sous-systèmes sont également détaillés afin de définir les composants et les pièces élémentaires qui les composent. C'est également durant cette phase que des éléments tels que les gammes d'assemblage et notices d'utilisation ou de maintenance sont définies afin de couvrir l'ensemble des phases de vie de la machine.

L'évolution du MFS dans cette phase est le prolongement de la décomposition amorcée en conception architecturale. Ainsi, les sous-systèmes se décomposent jusqu'aux composants et pièces élémentaires et tous les flux d'énergies (dont les dissipations) sont représentés. Si le MFS peut aller jusqu'à la représentation de toutes les pièces définies dans la nomenclature, ce n'est pas nécessairement utile (Roucoules et al., 2006). En effet, au-delà d'un certain niveau de détail, la modélisation se complexifie rapidement sans réel apport vis à vis de l'objectif d'identification des phénomènes dangereux.

La partie suivante présente la manière dont le MFS est utilisé dans le cadre d'EZID pour identifier les phénomènes dangereux dans les différentes phases de vie de la machine.

- Utilisation pour l'étude des phases de vie de la machine

Comme le rappelle la norme NF EN ISO 12100, l'identification des phénomènes dangereux doit non seulement concerner l'utilisation mais l'ensemble des autres phases de vie d'une machine : montage, transport, installation, exploitation, démontage, mise au rebut, etc.).

En plus des différences liées aux échanges d'énergies, les parties prenantes et leurs caractéristiques varient d'une phase de vie à une autre. Par exemple, un opérateur peut être assisté d'un outil pour déplacer un constituant de la machine en phase de transport, outil qui n'intervient pas dans les autres phases de vie. De même, les profils des opérateurs qui interagiront avec la machine varient entre ces phases. Pour permettre une modélisation claire et exploitable, il est donc nécessaire dans le cadre de l'utilisation d'EZID, de réaliser un MFS par phase de vie de la machine. La suite de cette partie présente la manière proposée par la méthode pour réaliser cela.

- Phase de montage, de démontage et de transport

Ces trois phases sont abordées dans un seul paragraphe car elles présentent des similitudes et dans les deux cas, la machine et généralement déconnectée de ses sources d'énergies et vidées de ses matières premières et déchets. Au début de la phase de vie de montage, les différents constituants de la machine sont assemblés les uns après les autres suivant la gamme d'assemblage définie par le concepteur. Au cours de cette phase, des blocs se construisent et englobent de plus en plus d'éléments pour aboutir à la machine complète. Inversement, dans le cas du démontage, la machine est décomposée au travers des différentes séquences de la gamme prescrite par le concepteur. Les MFS correspondants doivent en conséquence représenter ces évolutions étape par étape.

La figure 25 illustre l'évolution de la modélisation suite à l'assemblage manuel de deux composants (A et B). A l'étape 1, les frontières de ces 2 composants sont représentées ainsi que l'action de l'opérateur pour les assembler (échange d'énergie biomécanique). Cet ensemble « A+B » se retrouve à l'étape suivante sous la forme d'un seul composant prêt à être assemblé avec le composant « C » mais cette fois ci avec l'utilisation d'un outil pour intervenir sur l'ensemble « A+B ». Ce processus doit être réitéré jusqu'à couvrir l'intégralité de la gamme d'assemblage. Dans le cas du démontage, c'est la procédure inverse qui s'opère.

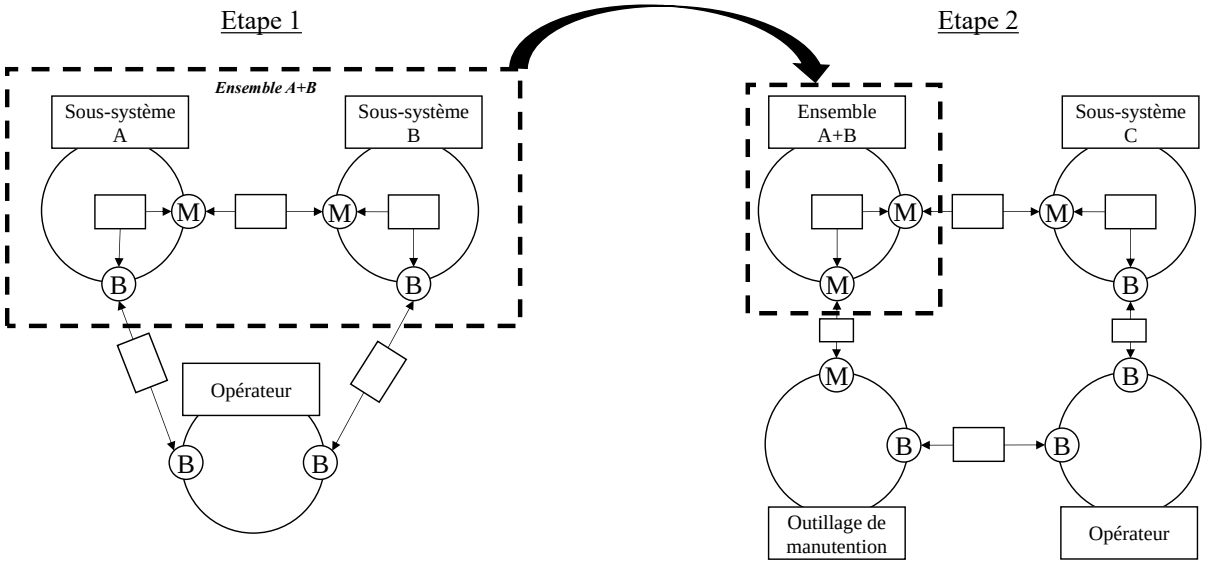


Figure 25. Illustration de l'évolution du MFS lors d'une opération de montage

Cette modélisation en séquence permet de faire apparaître les flux d'énergies mis en jeu à chaque étape de montage, du démontage et du transport. Il s'agit essentiellement des énergies potentielles de pesanteur des éléments à assembler, celles fournies par les parties prenantes (opérateurs, outillage ou matériel de manutention). Si des énergies résiduelles (ex. : énergies potentielles, électricité statique) existent durant ces phases, elles doivent être modélisées car elles peuvent générer des phénomènes dangereux en cas de libération (Chinniah, 2015).

De cette manière, EZID permet de modéliser les échanges d'énergies durant ces phases de vie, permettant ainsi d'identifier les phénomènes dangereux auxquels est exposé l'opérateur au moment précis où ils apparaissent, intégrant un peu plus l'aspect générique recherché (par rapport aux phases de vie) pour l'identification des phénomènes dangereux.

- Phase d'installation et de mise hors service

L'installation de la machine consiste à la connecter à ses sources d'énergies et à approvisionner les consommables avant de la mettre en service. Les flux d'énergies à modéliser sont donc ceux qui alimentent la machine et ceux des consommables et des équipements nécessaires à leur approvisionnement. Comme la machine n'est pas en fonctionnement, il n'y a pas lieu de représenter les échanges d'énergies interne. La mise hors service d'une machine consiste à déconnecter la machine de ses sources d'énergies et à la vider de ses consommables, matières premières et déchets. C'est l'inverse de la phase d'installation mais le MFS est identique. Les énergies résiduelles doivent de nouveau être modélisées si elles existent durant ces phases.

- Phase d'exploitation

La phase d'exploitation regroupe différents modes de fonctionnement (démarrage, production, maintenance, réglage, etc.). De façon globale, la modélisation de cette phase a été abordée dans la section précédente. C'est en effet la phase qui est analysée en détail par les concepteurs car c'est durant son déroulement que le besoin du client est réalisé. Certains modes de fonctionnement (démarrage) ou certaines opérations (maintenance) peuvent cependant présenter des particularités. Par exemple, les flux d'énergies peuvent être limités en importance, ou alors des constituants peuvent être retirés tout en laissant tout ou partie de la machine en fonctionnement. Ces particularités ont un impact sur la modélisation, c'est ce qui est détaillé ici.

Dans le cas où les niveaux d'énergies échangées sont affectés, seul les paramètres énergétiques contenus dans les surfaces fonctionnelles sont impactés. Le modèle en lui-même reste inchangé.

Dans le cas de l'enlèvement d'un constituant, la frontière le représentant dans le MFS ainsi que les surfaces fonctionnelles et les associations internes qu'elle comporte doivent être supprimées. Comme les seuls opérateurs de modélisation proposés avec le MFS sont des opérateurs de décomposition, il est nécessaire de préciser un opérateur de modélisation implicite du MFS :

- *Suppression d'un élément :* permet de supprimer un élément sélectionné du modèle

Dans le cas d'un retrait de constituant, la frontière, les surfaces fonctionnelles et les liaisons/associations internes associées qui sont supprimées. Ainsi, les flux d'énergies qui arrivaient à la frontière de l'élément retiré sont désormais émis vers l'extérieur du système

tandis que ceux qui en étaient sortants n'existent plus. Pour ces derniers, il est nécessaire de vérifier l'impact de la perte d'apport d'énergie sur les autres flux du système en aval.

La libération de flux d'énergies vers l'extérieur lors du retrait d'un constituant a également différentes répercussions en fonction des types d'énergies. Pour l'énergie mécanique, l'élément qui fournissait l'énergie dissipée peut engendrer du bruit, des vibrations, un échauffement par frottement et de ce fait créer de nouvelles surfaces fonctionnelles. Pour l'énergie électrique, si l'énergie dissipée entre en contact avec une structure conductrice de courant, alors celle-ci peut également se transmettre à d'autres éléments de la machine et créer ainsi de nouvelles surfaces fonctionnelles. Il en est de même avec les énergies thermiques, vibratoire, acoustique, lumineuse, laser, électromagnétique et ionisante. La libération de ces énergies peut également affecter les propriétés d'autres surfaces fonctionnelles existantes. Par exemple, si un liquide est libéré, il peut modifier le coefficient d'adhérence d'une surface fonctionnelle.

Si les opérateurs initialement proposés avec le modèle MFS permettent de couvrir les différentes phases de vie et étapes de conception. Comme nous venons de la voir, il est cependant nécessaire de préciser l'opérateur implicite *suppression d'un élément* afin de pouvoir analyser certains modes de fonctionnement dégradés.

Par ailleurs, certains automatismes doivent être définis afin de systématiser la modélisation comme par exemple la création systématique de surfaces fonctionnelles dès la modélisation d'une frontière, la prise en compte des énergies dissipées par les liaisons semi-conductrices ou encore l'intégration de sous-systèmes déjà modélisés. C'est ce qui est présenté dans la partie suivante.

1.2.1.2. Compléments au MFS

Avant de présenter les automatismes de modélisation, il est nécessaire de présenter la règle et les opérateurs de modélisation implicites mais nécessaires à l'utilisation du MFS.

a) Opérateurs complémentaire de modélisation

En plus de l'opérateur de *suppression d'un élément* définit dans la partie précédente, deux autres opérateurs ont été identifiés comme essentiels à l'utilisation du MFS. Il s'agit :

- De l'opérateur de *sélection d'éléments dans le MFS* permettant de choisir des éléments d'intérêt de la modélisation ;
- De l'opérateur d'*association de surfaces fonctionnelles à une frontière* permettant d'associer des surfaces fonctionnelles « libres » à une frontière existante.

Ces trois opérateurs permettent de compléter les trois autres initialement définis dans le MFS et rappelés en 1.2.1.1a.

b) Règle complémentaire de modélisation

Afin de permettre à un concepteur utilisant le MFS de recombiner des éléments déjà présents dans le modèle, il est nécessaire de proposer une règle de modélisation pour *agréger des systèmes* (où système désigne un ensemble frontière – surfaces fonctionnelles – associations internes). Cette règle permet de remplacer plusieurs systèmes par une frontière avec ses surfaces fonctionnelles, liaisons et association internes associées. Comme représentée sur la figure 26, la règle fonctionne de la manière suivante : le concepteur choisit les systèmes devant être composés. Les surfaces fonctionnelles de ces systèmes ayant un échange d'énergie avec d'autres systèmes que ceux précédemment sélectionnés sont conservées, les autres sont supprimées. Les frontières sont également supprimées ainsi que leurs associations internes. Une nouvelle frontière est modélisée pour représenter la nouvelle technologie, et les surfaces fonctionnelles précédemment conservées lui sont automatiquement attachées. Enfin, les associations internes de la nouvelle technologie sont modélisées. Sur la figure 26, la solution 1 remplace les sous-systèmes 1,2 et 4.

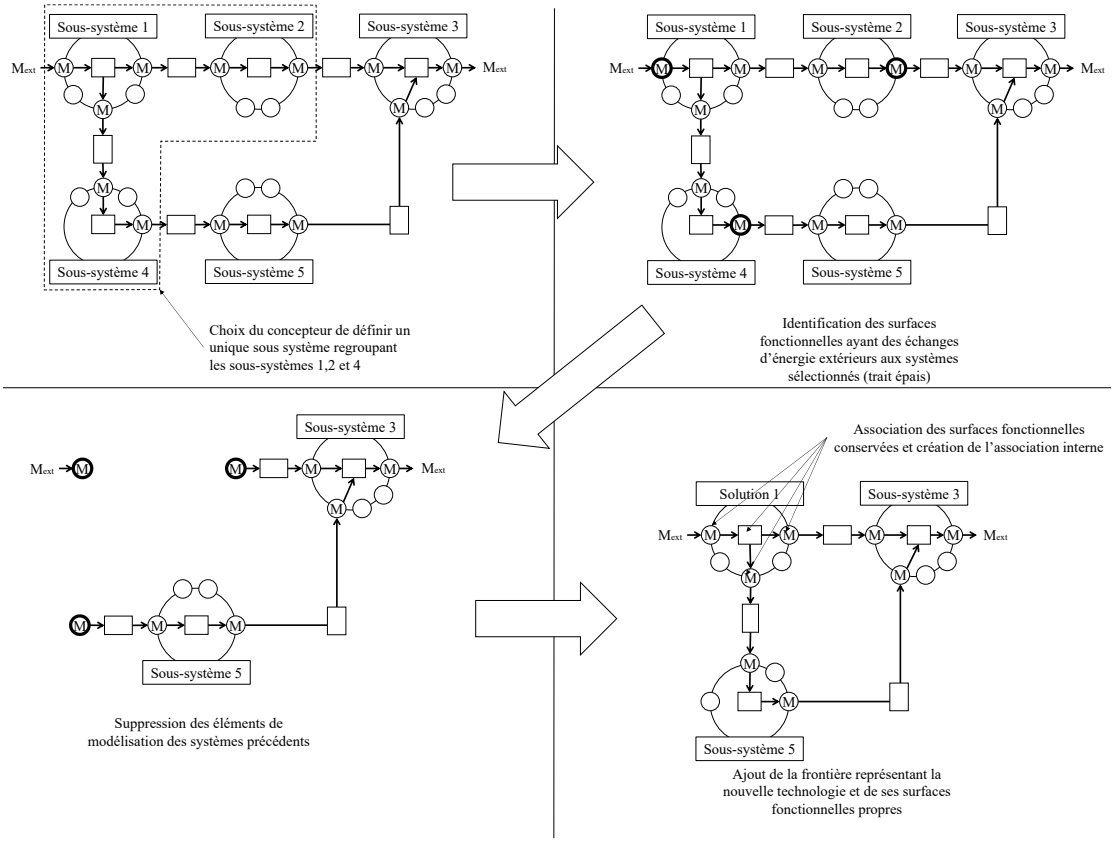


Figure 26. Illustration de la règle « agréger des systèmes »

c) Automatisme de modélisation

Les automatismes sont basés sur le fonctionnement suivant : SI *élément modélisé* ALORS *évènement obligatoire nécessitant la participation du concepteur*. Trois automatismes de ce type ont été formalisés durant le développement d'EZID. Ils sont détaillés dans la suite de cette partie.

- Energies dissipées

Un premier automatisme illustré en figure 27 est la transformation des liaisons/associations internes de type « semi conductrice » en « conductrice avec surfaces fonctionnelles » afin de prendre en compte les énergies dissipées et ainsi obtenir une identification exhaustive des phénomènes dangereux associés à un MFS. Comme les surfaces fonctionnelles sont au centre de cette identification, il est de plus nécessaire de faire apparaître celles relatives aux dissipations d'énergies.

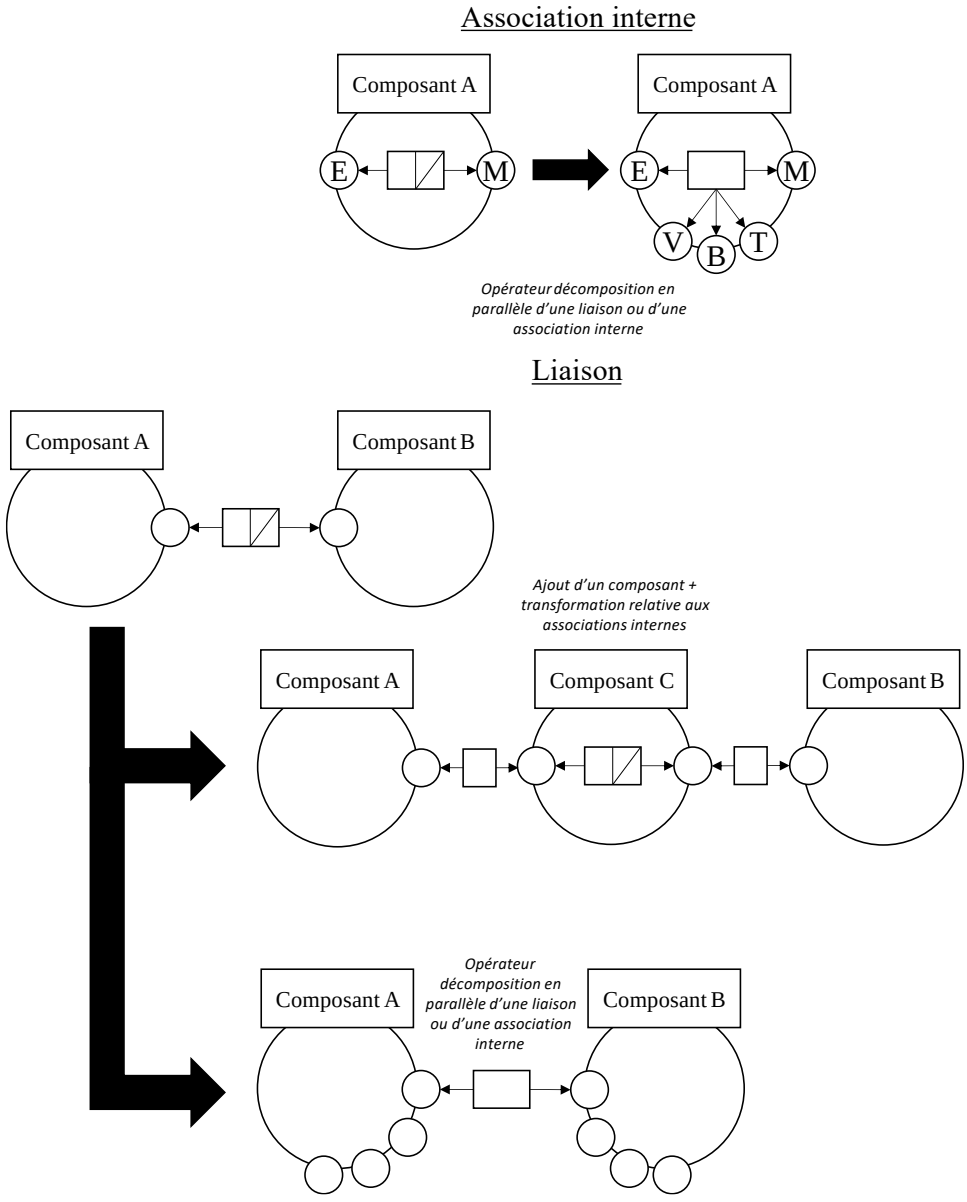


Figure 27. Illustration de la transformation des associations internes et des liaisons semi-conductrices

En utilisant l'opérateur existant de modélisation *décomposition en parallèle d'une liaison ou d'une association interne*, il est possible de transformer une liaison ou une association interne « semi-conductrice » en « conductrice » à condition d'ajouter les surfaces fonctionnelles représentant les nouveaux échanges d'énergies comme l'illustre la figure 27.

Dans le cas d'une association interne cet ajout se fait sur la frontière concernée. Dans le cas d'une liaison, cet ajout se fait sur les deux frontières.

Il faut aussi prendre en compte le cas où l'origine de la dissipation est liée au support utilisé pour la transmission d'énergie sans que celui-ci ne soit représenté (ex. : fil électrique). Le concepteur doit alors modéliser ce nouveau composant avec une association interne semi-conductrice. Il peut alors appliquer l'automatisme précédent.

Le choix des énergies dissipées est laissé au concepteur qui doit ensuite renseigner leurs caractéristiques.

- Masse et forme des constituants de la machine

Tous les éléments appartenant à la machine représentés dans le MFS ont une masse qui, sous l'effet de la pesanteur, génère une énergie mécanique potentielle avec des risques de chutes, basculement, etc.

De même, tous ces éléments ont une forme qui selon ses propriétés peut présenter un risque en cas de contact, choc avec l'opérateur de la machine. Dans ce cas, l'énergie mécanique pouvant être échangée est celle apportée par l'opérateur. Cette énergie peut être apportée volontairement dans le cas d'opération à réaliser lors des différentes phases de vie de la machine, notamment durant les phases de vie de montage, démontage et de maintenance où les opérateurs ont accès à l'ensemble des géométries des pièces (arêtes vives, bavures d'usinage, etc.). Un contact involontaire entre l'opérateur et la machine (ex. faux mouvement) peut également engendrer cet échange d'énergie. Le dommage reçu peut varier en fonction de la géométrie de la surface de contact et donc provoquer un choc dans le cas d'une surface contondante ou une coupure en cas d'angle vifs.

Le deuxième automatisme proposé consiste donc à associer systématiquement aux frontières modélisées (à l'exception de celle de l'opérateur) deux surfaces fonctionnelles :

- Une représentant l'énergie potentielle liée à la masse des éléments noté « Mm » dans le MFS)
- Une pour l'énergie mécanique échangée lors d'un contact entre l'opérateur et tout ou partie de la machine. Cet échange d'énergie étant influencé par la forme du composant heurté, cette surface fonctionnelle a été notée « Mf » dans le MFS.

Le concepteur doit ensuite renseigner les différentes données constituant ces surfaces fonctionnelles.

- Support

Comme cela a été évoqué précédemment, le MFS représente les échanges d'énergies de la machine selon les limites définies par le concepteur. Cette modélisation représente également les interactions avec les parties prenantes externes à la machine. Il existe

nécessairement une liaison de type « support » avec une de ces parties prenantes qui peut être le sol, une table ou tout autre équipement.

Le troisième automatisme de modélisation est donc la modélisation systématique par le concepteur de l'échange d'énergie entre ce support et la machine.

d) Eléments génériques

Une assistance à la modélisation proposée dans le cadre d'EZID est la définition de MFS d'éléments génériques (ex. : moteur, vérin) utilisés couramment en conception. Leurs modélisations contiennent ainsi l'ensemble des énergies que ces éléments peuvent échanger. Ces derniers se déclinent en trois catégories : les solutions technologiques (ex. : moteur, vérin), les techniques de liaison (ex. : chute de pièces, écoulement) ou bien les réactions avec dissipations (ex. : verres ou métaux chauffés).

Pour les solutions technologiques, les modèles fonctionnels proposés intègrent par défaut les surfaces fonctionnelles correspondant aux énergies émises. Par exemple pour un moteur électrique, les énergies principales mécaniques et électriques ainsi que les énergies dissipées potentielles, thermique, bruit, vibrations et électromagnétique. Le tableau 6 référence plusieurs exemples de ces éléments.

Tableau 6. Exemples d'éléments sources d'énergies (Arcane, 2016)

Exemples d'éléments sources d'énergies	**Exemples d'énergies associées**
Moteur électrique	Mécanique (arbre)
	Electrique (source d'énergie)
	Vibrations (fixation sur une structure)
	Acoustique (frottements entre les pièces)
	Thermique (dissipation)
	Electromagnétique (stator)
Résistance électrique	Electrique (source d'énergie)
	Thermique (dissipation)
Vérin pneumatique	Mécanique
	Acoustique (échappement de l'air comprimé)
	Mécanique (énergie potentielle liée à la pression)
Ventilation	Acoustique (bruit aérien)
Engrenages	Mécanique
	Acoustique (bruit solidien)
Pot vibrant	Vibrations
	Acoustique (bruit solidien)
Système hydraulique	Acoustique (bruit liquidien, cavitation)
	Mécanique (énergie potentielle liée à la pression)
Laser	Radiative (optique)
	Thermique
Presse haute fréquences	Radiative (électromagnétiques)
Générateur de rayon X	Radiative (ionisant)
Tâche manuelle	Biomécanique

Les techniques de liaisons génériques considérées sont celles qui peuvent dissiper de l'énergie bien qu'elles ne mettent pas en jeu un troisième élément. Par exemple, dans le cas d'une alimentation par gravité lors de la chute d'un élément (pièce) sur un autre (gouttière), l'énergie est directement transmise sans support physique intermédiaire avec toutefois une dissipation d'énergie (bruit). En revanche, un fil électrique reliant deux sous-systèmes électriques n'entre pas dans cette catégorie car le fil électrique peut être considéré si besoin comme un sous-système. Comme représenté dans l'exemple de la figure 28, ces techniques de liaison génériques peuvent dans un premier temps être modélisées dans le MFS comme une liaison semi-conductrice puis transformées en conductrice en faisant apparaître les surfaces fonctionnelles liées aux énergies dissipées (comme décrit dans le premier automatisme de modélisation).

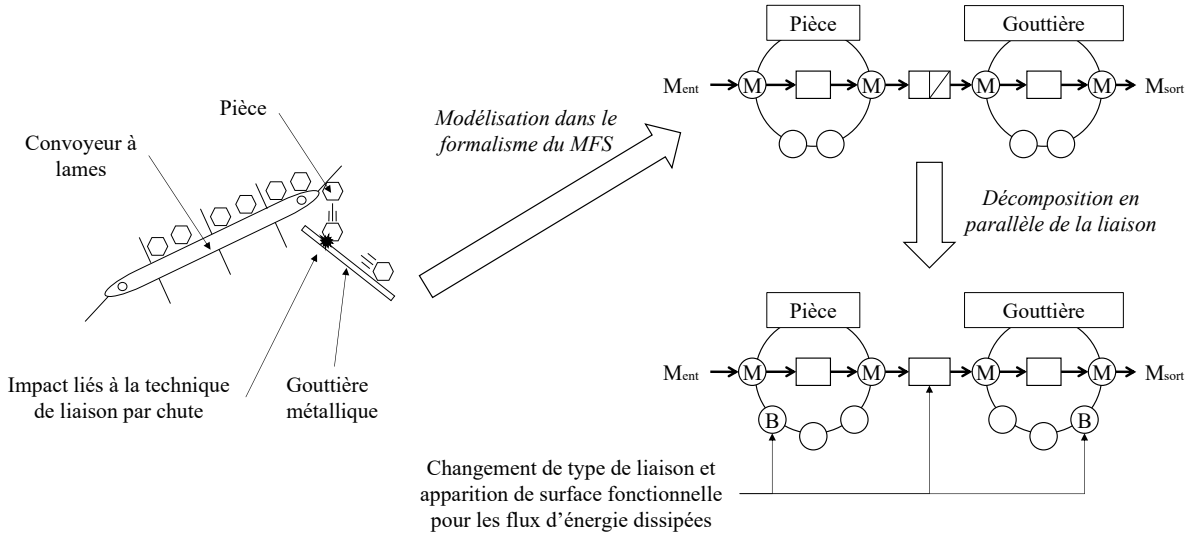


Figure 28. Exemple de modélisation et transformation d'une technique de liaison

Les réactions génériques prises en compte sont celles qui présentent une dépendance entre le flux d'énergies utile transmis à un élément, les propriétés de la surface fonctionnelle réceptrice et la dissipation qui apparaît. En fournissant des MFS pour ces éléments, la modélisation intégrera de manière systématique les dissipations de ces réactions.

Grâce à ces différents opérateurs, règles et automatismes, il est possible de modéliser une machine en cours de conception dans le formalisme MFS en prenant en compte :

- les sources et flux d'énergies utiles ainsi ceux liés aux dissipations et aux supports ;
- Les différents modes de fonctionnement, y compris des modes dégradés où certains éléments ont été retirés.

Par ailleurs, en privilégiant la modélisation avec des éléments génériques (solutions techniques, liaisons, réactions), le risque d'oubli de certains échanges d'énergies, donc de

phénomènes dangereux, est minimisé. Quelques exemples de modélisation de sous-systèmes courants sont présentés en annexe 3.

La partie suivante présente un exemple d'application du MFS sur un mécanisme simple afin d'illustrer son application

1.2.1.3. Exemple d'application : le cric mécanique de voiture

Afin de faciliter la compréhension des différentes étapes d'EZID, le cric mécanique de voiture représenté en figure 29 a été choisi comme exemple. C'est une machine au sens de la directive 2006/42/CE et il met en jeu deux types d'énergies. Cet exemple se limite à l'application d'EZID sur la phase de vie d'utilisation à partir des données techniques d'un cric existant. De même, toutes les transmissions d'énergies seront considérées comme conductrices (les dissipations sont négligées).

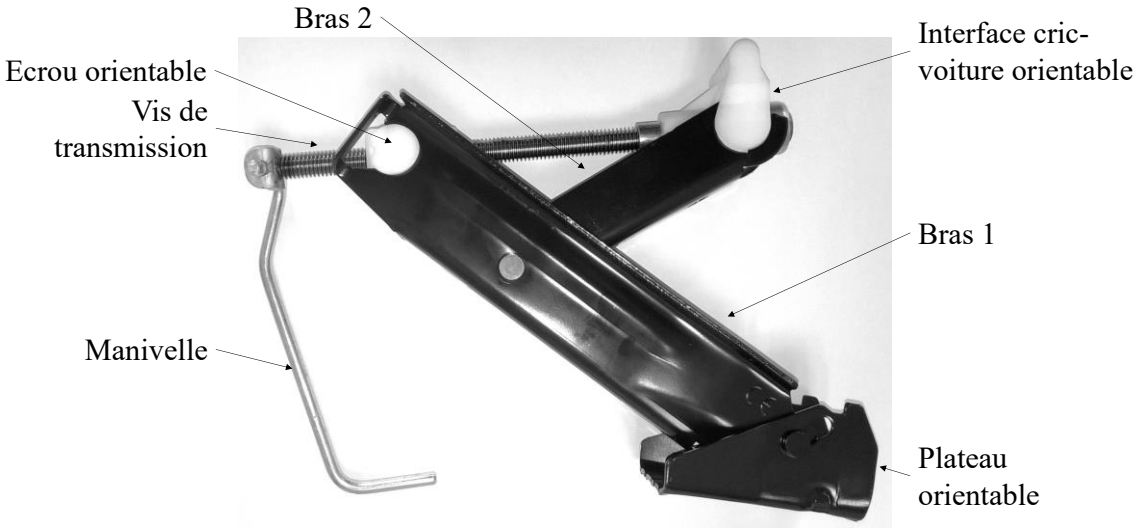


Figure 29. Photo du cric mécanique de voiture

En appliquant les instructions décrites précédemment, la modélisation du cric doit non seulement représenter ses différents composants (plateau orientable, deux bras, écrou orientable, vis de transmission, manivelle et interface cric-voiture) par une frontière mais également l'utilisateur puisqu'il y a nécessairement une action manuelle.

On peut voir sur la figure 30 que le flux d'énergie apporté par l'utilisateur (énergie biomécanique) au niveau de la manivelle se transforme en énergie mécanique au niveau de la vis de transmission. Cette dernière entraine le bras 1 par un écrou orientable, et au niveau du bras 2 par obstacle au niveau de l'interface cric-voiture. Cette énergie mécanique est ensuite transmise à la voiture par une interface cric-voiture orientable et au sol par la base mobile orientable et entre les deux bras. Inversement, il existe un flux d'énergie lié à la masse du véhicule qui se transmet vers le sol au travers de la structure du cric. C'est la surface Mm du plateau orientable qui accumule l'ensemble des énergies potentielles de pesanteur des composants du cric et de la voiture et qui l'échange avec le sol.

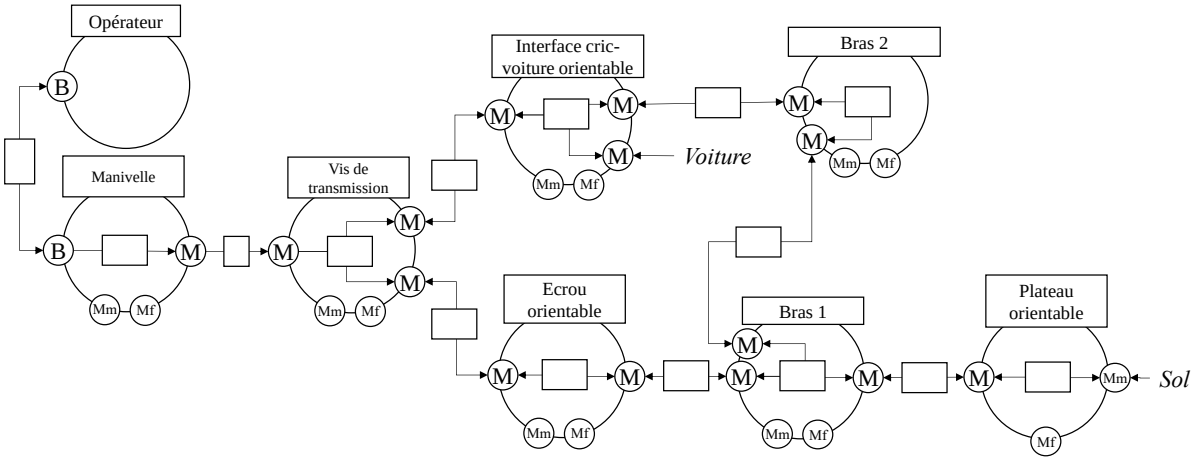


Figure 30. MFS du cric mécanique de voiture

Le MFS représenté sur la figure 30 a été simplifié afin de faciliter la lecture. Ainsi :

- La nature des flux d'énergies est identifiée par une lettre dans les surfaces fonctionnelles : M pour énergie mécanique et B pour énergie biomécanique. Cette manière de représenter les MFS est également employée dans le reste du mémoire ;
- Pour plus de clarté, les paramètres de conception caractérisant les surfaces fonctionnelles ne sont pas directement indiqués sur le modèle.

Comme décrit dans la partie sur les automatismes de modélisation, les surfaces fonctionnelles liées à la masse (Mm) et à la forme (Mf) sont représentées systématiquement sur chaque frontière. Cet automatisme permet dans le cas présent de ne pas oublier l'énergie liée à la masse du véhicule une fois celui-ci levé ou encore la nécessité de supprimer les angles vif sur le cric.

A partir de cette modélisation et en se basant sur le processus décrit dans la partie 1.2.1.1, il est possible de connaitre le nombre de phénomènes dangereux présents dans cet exemple en comptant tout simplement le nombre de surfaces fonctionnelles, soit 30 phénomènes dangereux.

1.2.1.4. Conclusion sur la modélisation

L'étape de modélisation dans le formalisme du MFS est la première étape d'EZID. En permettant la représentation de l'ensemble des échanges d'énergies, l'identification des phénomènes dangereux devient systématique en repérant les surfaces fonctionnelles avec bien entendu un niveau de précision ou de maturité différent selon l'avancement du processus de conception comme illustré sur la figure 31. Il s'agit d'un élément essentiel de l'apport de ce travail de recherche.

Par ailleurs les opérateurs et règles de modélisation initiaux du MFS ont été complétés pour permettre une identification des phénomènes dangereux durant les différentes phases de

vie. De même, des automatismes ont été développés afin de ne pas oublier certaines sources d'énergies, d'intégrer des éléments génériques ayant déjà fait l'objet d'une modélisation, etc. Il s'agit également là d'un apport vis-à-vis de l'utilisation du MFS pour l'identification des phénomènes dangereux. Les opérateurs et règles de modélisation proposés sont récapitulés en annexe 4.

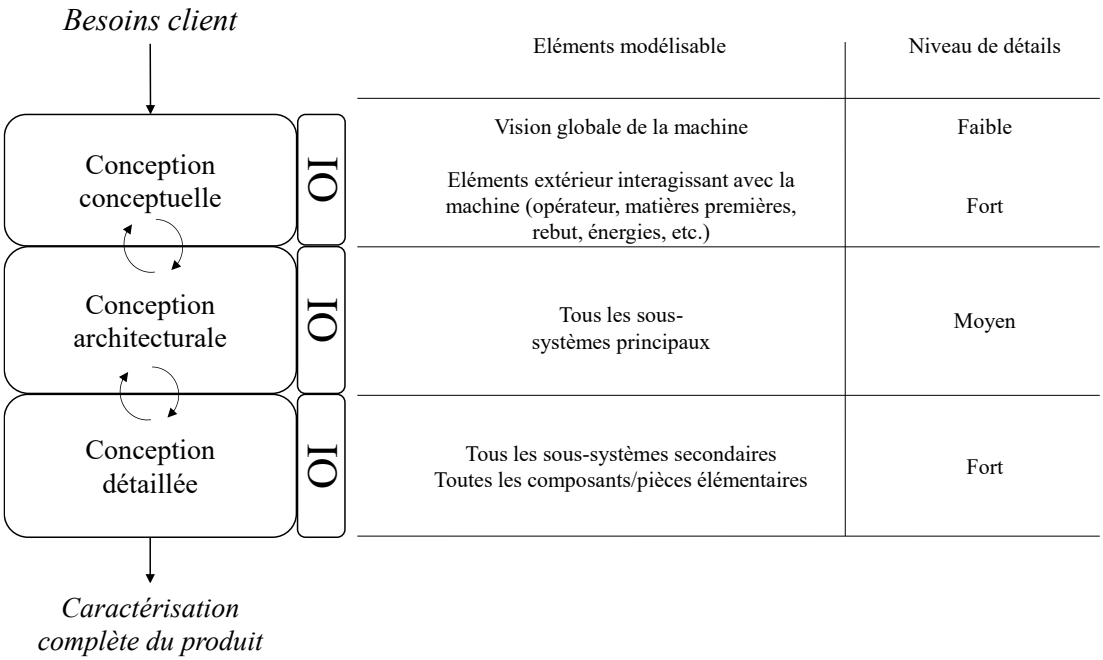


Figure 31. Eléments modélisables selon les phases de conception (Godot, 2013)

Afin de suivre les décisions du concepteur tout au long de cette phase de modélisation, il est également nécessaire au niveau du MFS de :

- Référencer chaque élément chronologiquement ;
- capitaliser chronologiquement l'utilisation des opérateurs de modélisation ;
- lier les éléments générés par l'utilisation d'un opérateur de modélisation à ses éléments parents ;
- définir les degrés de maturité des choix réalisés.

Une fois cette étape de modélisation réalisée et après avoir recensé toutes les surfaces fonctionnelles du MFS, il est possible de passer à la deuxième étape d'EZID permettant l'identification des types des phénomènes dangereux associés aux surfaces fonctionnelles.

1.2.2. Identification des types de phénomènes dangereux

Cette partie détaille le premier traitement de la méthode EZID. Il permet d'identifier le type des phénomènes dangereux engendrés par les surfaces fonctionnelles identifiées à la fin de l'étape de modélisation. Cette identification repose sur l'association des types de phénomènes dangereux avec les paramètres énergétiques contenus dans ces surfaces.

1.2.2.1. Construction et exploitation des indicateurs et relations avec les types

Comme rappelé au chapitre I, § 4.3, le MFS exploite le concept des variables généralisées des Bond Graph (Borutzky, 2009) pour caractériser les surfaces fonctionnelles. Ces variables se déclinent en deux catégories : les efforts généralisés (Eg) et les courants généralisés (Cg). Ils définissent respectivement les sources et les flux d'énergies. La puissance généralisée (Pg) peut également s'exprimer au travers de la relation : Pg = Eg x Cg.

Comme cela est représenté dans le tableau 7, il est possible d'associer aux variables généralisées des Bond Graph des types de phénomènes dangereux : une tension (volts) ou un courant (ampères) seront associés à un phénomène dangereux électrique par exemple. On remarque toutefois sur la base de ce tableau que ces paramètres ne permettent pas de couvrir l'ensemble des phénomènes dangereux cités dans la norme NF EN ISO 12100. Les types de phénomènes dangereux non-couverts sont ceux engendrés par les vibrations et ceux liés au non-respect des principes ergonomiques. De plus, certains types de phénomènes dangereux ne sont pas couverts entièrement. C'est le cas pour les phénomènes dangereux engendrés par les rayonnements (qui comprennent en plus les rayonnements optiques artificiels, les lasers et les rayonnements ionisants) et les phénomènes dangereux engendrés par des matériaux ou des produits (qui comprennent les éléments chimiques mais aussi biologiques). A ces types de phénomènes dangereux sont associés de nouveaux types ou sous-types d'énergies et des paramètres énergétiques propres.

Tableau 7. Variables généralisées pour plusieurs types d'énergies (Borutzky, 2009) et leurs associations avec les types de phénomènes dangereux

Domaine	Effort (e)	Flux (f)	Type de phénomène dangereux
Electrique	Tension (V)	Courant (A)	Electrique
Mécanique en translation	Effort (N)	Vitesse (m/s)	Mécanique
Mécanique en rotation	Couple (N·m)	Vitesse (rad/s)	
Hydraulique	Pression (Pa)	Débit volumique (m^3/s)	
Magnétique	Force magnéto-motrice (A)	Dérivée flux (V)	Engendrés par les rayonnements
Chimique	Potentiel Chimique (J/mol)	Flux molaire (mol/s)	Engendrés par des matériaux ou des produits
Thermodynamique	Température (K)	Flux entropique (W/K)	Thermique
Acoustique	Pression (Pa)	Débit acoustique (m^3/s)	Engendrés par le bruit

En conséquence, cette liste de variables généralisées a été complétée à partir des paramètres utilisés pour évaluer la gravité des types de phénomènes dangereux correspondant, et en identifiant les paramètres de conception associés :

- Les variables généralisées ainsi étendues permettent de prendre en compte les phénomènes dangereux générés par les vibrations. Les paramètres utilisés pour estimer la gravité des dommages sont l'accélération, la fréquence et le temps d'exposition d'un opérateur (Norme, 2002, 2014b). Les paramètres retenus dans la table sont donc l'accélération et la fréquence car sans donnée, il est nécessaire

de se placer dans le cas le plus défavorable avec un temps d'exposition continu sur une journée de travail.

- Les phénomènes dangereux liés au non-respect des principes ergonomiques : ils sont restreints ici à la présence d'échange d'énergie biomécanique entre l'opérateur et la machine. La force et la fréquence ou durée des efforts sont les paramètres utilisés pour estimer la gravité des dommages liés à la charge physique des opérateurs (Norme, 2008a). La posture est partiellement prise en compte sur l'aspect ergonomie du poste de travail (paramètres complémentaires géométriques). Par contre EZID ne portant pas sur le volet organisation du poste de travail qui influe sur la charge mentale.
- Les rayonnements optiques artificiels, le laser et ionisant sont caractérisés par des variables propres (ex. : famille de lampe, classe du laser, dose par unité d'incorporation,).
- L'énergie biologique permet de prendre en compte les phénomènes dangereux liés aux éléments pathogènes, les toxines ou les agents allergisants qui ont des paramètres propres comme la classe des agents biologiques pathogènes et des toxines ou le potentiel allergisant pour l'évaluation de la gravité.
- Les variables généralisées de l'énergie électrique ont été complétées afin de pouvoir identifier l'accumulation de charges électriques dans un condensateur et l'électricité statique.
- Les variables généralisées de l'énergie mécanique ont été complétées pour pouvoir identifier les énergies potentielles élastique, magnétique, de pesanteur et de pression complètent les variables généralisées de l'énergie mécanique pour permettre l'identification des éléments pouvant générer de l'énergie cinétique en cas de libération.
- Comme cela a été le cas pour MHI de (Hassim & Edwards, 2006) présenté dans le chapitre 2, les variables généralisées de l'énergie chimique ont été complétée avec le niveau de danger, la concentration et le volume pour intégrer les paramètres exploités pour l'évaluation des risques chimiques.

Le tableau 8 contient l'ensemble des variables généralisées étendues ainsi que les associations avec les types de phénomènes dangereux. Dès lors que le concepteur renseigne une surface fonctionnelle avec l'une de ces variables généralisées étendues, le type du phénomène dangereux correspondant est directement associé à la surface fonctionnelle et indiqué au concepteur. Afin de faciliter leur identification, les sources potentielles d'énergies ont également été ajoutées dans ce tableau.

Bien que l'extension de ces variables généralisées ne concerne que le domaine d'application de la méthode EZID. La partie suivante illustre ce premier niveau de traitement en l'appliquant au cric.

Tableau 8. Paramètres généralisés étendus (Directive, 2000, 2001, 2002, 2003, 2006, 2013a, 2013b; Norme, 2008a, 2008b, 2008c, 2009a, 2010, 2014a)

Effort généralisé (Eg)	Courant généralisé (Eg)	Puissance généralisée (Pg)	Type d'énergie échangée	Type de phénomène dangereux
Force (N)	Vitesse (m/s)		Cinétique	Mécanique
Couple (N.m)	Vitesse de rotation (rad/s)		Potentielle de pression	
Pression (Pa)	Flux volumique (m^3/s)		Potentielle élastique	
Contrainte élastique (Pa)	Course élastique (m)		Potentielle de pesanteur	
Masse (kg)	Hauteur (m)			
Champ magnétique (T)	Flux magnétique (Wb)		Potentielle magnétique	
Accélération ($m.s^{-2}$)	Partie de l'opérateur en interaction avec la source d'énergie		Vibratoire	Engendrés par les vibrations
Pression accoustique (Pa)			Accoustique	Engendrés par le bruit
Tension (V)	Intensité (A)		Electrique	Electrique
Capacité électrique (F)				
Electricité statique (V/m)				
Température (K)	Flux entropique ($W.K^{-1}$)		Thermique	Thermique
Induction magnétique (µT)	Courant de contact Ic (mA)	Groupe de la lampe	Rayonnement optique artificiel	Engendrés par les rayonnements
Intensité du champ électrique (V/m)	Courant induit dans les extrémités Il (mA)	Classe du laser	Rayonnement laser	
	Intensité du champ magnétique (A/m)	Densité de puissance équivalente onde plane Seq (W/m^2)	Rayonnement magnétique	
Dose par unité d'incorporation. ($Sv.Bq^{-1}$)	Partie de l'opérateur en interaction avec la source d'énergie	Niveau de danger	Rayonnement ionisant	Engendrés par des matériaux et des produits
			Chimique	
Concentration (mol/L)	Volume (L)	Classe des agents biologiques pathogènes/toxines, potentiel allergisant	Biologique	
Force à fournir par l'opérateur (N)	Vitesse de l'opérateur ($m.s^{-1}$)		Biomécanique	Engendrés par le non-respect des principes ergonomiques

1.2.2.2. Application au cric mécanique de voiture

Le MFS du cric établit dans la partie précédente contient 30 surfaces fonctionnelles soit 30 phénomènes dangereux potentiels. Ce premier traitement sur les paramètres énergétiques qui caractérisent ces surfaces va permettre d'identifier les familles de ces phénomènes dangereux.

Le tableau 9 reprend les éléments précédemment modélisés et les complète avec les paramètres énergétiques associés.

En utilisant le traitement par association basé sur le tableau 8, ces énergies sont immédiatement associées à un type de phénomène dangereux. La correspondance se fait de manière systématique en identifiant la ligne sur laquelle le paramètre est renseigné et en regardant le phénomène dangereux correspondant. Le tableau 9 capitalise les résultats de ce traitement. Sur les 30 phénomènes dangereux, 29 sont de type mécanique et 1 est lié à l'action manuelle de l'utilisateur avec un phénomène dangereux en cas de non-respect des principes ergonomiques.

Tableau 9. Identification des types de phénomènes dangereux du cric mécanique de voiture

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle
Manivelle	1	Biomécanique	Liés au non-respect des principes ergonomiques
	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique
	1	Potentielle de pesanteur	
	1	Mécanique de rotation	

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle
Vis de transmission	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique
	1	Potentielle de pesanteur	
	3	Mécanique de rotation	

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle
Ecrou orientable	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique
	1	Mécanique de translation	
	1	Potentielle de pesanteur	
	1	Mécanique de rotation	

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle
Bras 1	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique
	1	Potentielle de pesanteur	
	3	Mécanique de translation	

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle
Bras 2	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique
	1	Potentielle de pesanteur	
	2	Mécanique de rotation	

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle
Interface cric - voiture orientable	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique
	1	Potentielle de pesanteur	
	2	Mécanique de translation	
	1	Mécanique de rotation	

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle
Plateau orientable	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique
	1	Potentielle de pesanteur	
	1	Mécanique de translation	

1.2.2.3. Conclusion sur l'identification du type

Au cours du processus de conception, le concepteur enrichit son modèle et renseigne les paramètres qui caractérisent les surfaces fonctionnelles. Ces paramètres contiennent nécessairement des paramètres énergétiques. En exprimant ces derniers à partir des variables généralisées telles que définies dans le cadre de ce travail de recherche il est alors possible de les relier aux types des phénomènes dangereux définis par la norme NF EN ISO 12100. Ce processus, représenté figure 32, permet donc une identification systématique des types de phénomènes dangereux pertinents, c'est-à-dire ceux qui sont présents dans la machine étudiée.

L'étape suivante consiste à identifier parmi ces phénomènes dangereux pertinents lesquels sont significatifs, c'est-à-dire ceux qui nécessitent la mise en place d'une mesure de protection. Pour cela, il est nécessaire de préciser auparavant la nature des dommages qu'ils occasionnent. Cette compréhension des effets d'un phénomène dangereux est indispensable pour faire cette classification pertinent/significatifs et pour guider ensuite le concepteur dans le choix des moyens de protection. Le traitement pour cette identification des dommages potentiels est présenté dans la prochaine partie.

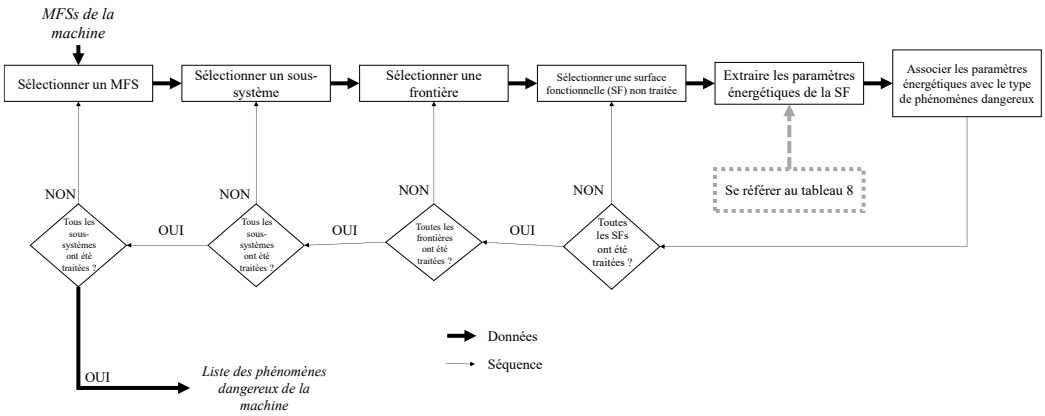


Figure 32. Processus d'identification du type des phénomènes dangereux pertinents

1.2.3. Identification détaillée des conséquences

1.2.3.1. Elaboration et exploitation des règles d'identification

Certains types de phénomènes dangereux peuvent provoquer différents dommages ou conséquences sur un opérateur. Par exemple, un phénomène dangereux mécanique lié à une énergie cinétique peut provoquer un choc ou une coupure selon le type de géométrie animée par cette énergie (contondante ou coupante). L'identification détaillée de ces conséquences est donc essentielle pour que le concepteur puisse prévoir des moyens de prévention adaptés. C'est l'objectif du deuxième niveau de traitement de la méthode EZID.

Inspiré par (Burlet-Vienney et al., 2015), ce traitement est basé sur l'analyse des combinaisons entre des paramètres énergétiques et un certain nombre d'autres paramètres de conception qualifiés de « complémentaires ». En reprenant l'exemple précédent, la

conséquence « coupure » est le résultat de la combinaison des paramètres énergétiques liés à l'énergie cinétique (ex. : force, vitesse) avec le paramètre complémentaire de forme « coupante ».

Ces combinaisons doivent être établies phénomène dangereux par phénomène dangereux. En effet, les « conséquences » à identifier et leur terminologie sont définies dans la norme NF EN ISO 12100 pour chaque famille de phénomène dangereux. La méthode de l'arbre de causes proposée par (Wilson et al., 1993) a permis de définir d'une part les paramètres complémentaires concernés, et d'autre part les règles logiques de combinaison de ces paramètres.

La figure 33 représente une proposition d'arbre des causes d'un « entrainement mécanique » créé pendant cette thèse à partir de l'analyse des réglementations, des normes et des données de l'INRS. Les données d'entrée connues sont donc la conséquence (à droite de la figure) et le type d'énergie mis en jeu (en haut à gauche). A partir de la conséquence, la démarche consiste à définir les suites d'évènements intermédiaires qui la provoquent et ainsi de suite jusqu'à aboutir aux évènements primaires directement liés à l'existence d'un paramètre de conception.

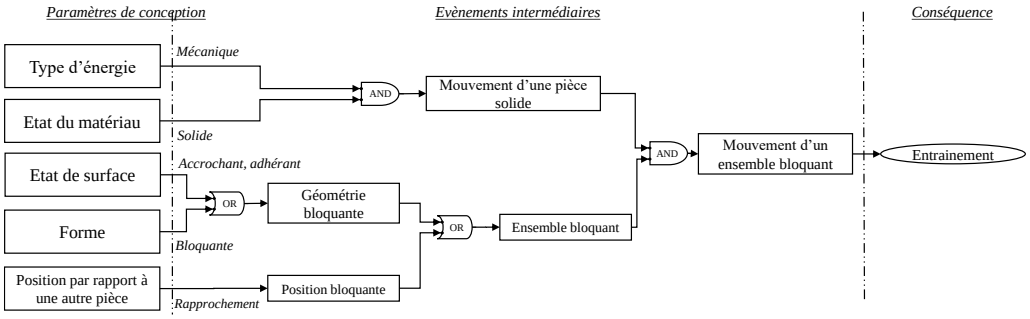


Figure 33. Arbre des causes de la conséquence entrainement du type de phénomène dangereux mécanique

Cette démarche permet de définir des règles pour chaque conséquence avec un nombre limité de paramètres complémentaires et des logiques combinatoires simples (porte ET/OU). Les portes OU ne sont pas exclusives car aucun paramètre n'a été identifié comme annulant un autre. Tous les arbres relatifs à un même phénomène dangereux sont fusionnés. La figure 34 représente l'arbre ainsi construit à partir d'observation pour l'énergie mécanique.

Une fois qu'un arbre est construit, il est possible de l'exploiter au travers de la démarche suivante :

- Proposition au concepteur de la liste des paramètres complémentaires associés au phénomène dangereux identifié ;
- Renseignement de ces paramètres dans les surfaces fonctionnelles en fonction de l'avancée du projet de conception ;
- Identification des conséquences potentielles dès qu'une règle est vérifiée.

L'ensemble des conséquences ainsi identifiées est ensuite capitalisé et associé à la surface fonctionnelle. L'identification des conséquences dépend fortement de l'avancement du processus de conception car le concepteur peut au cours de celui-ci renseigner des paramètres et compléter leurs valeurs plus tard dans le processus (ex. : géométrie, position).

Une fois toutes les surfaces fonctionnelles liées à des phénomènes dangereux mécaniques traités et les conséquences identifiées, cette étape d'EZID est terminée.

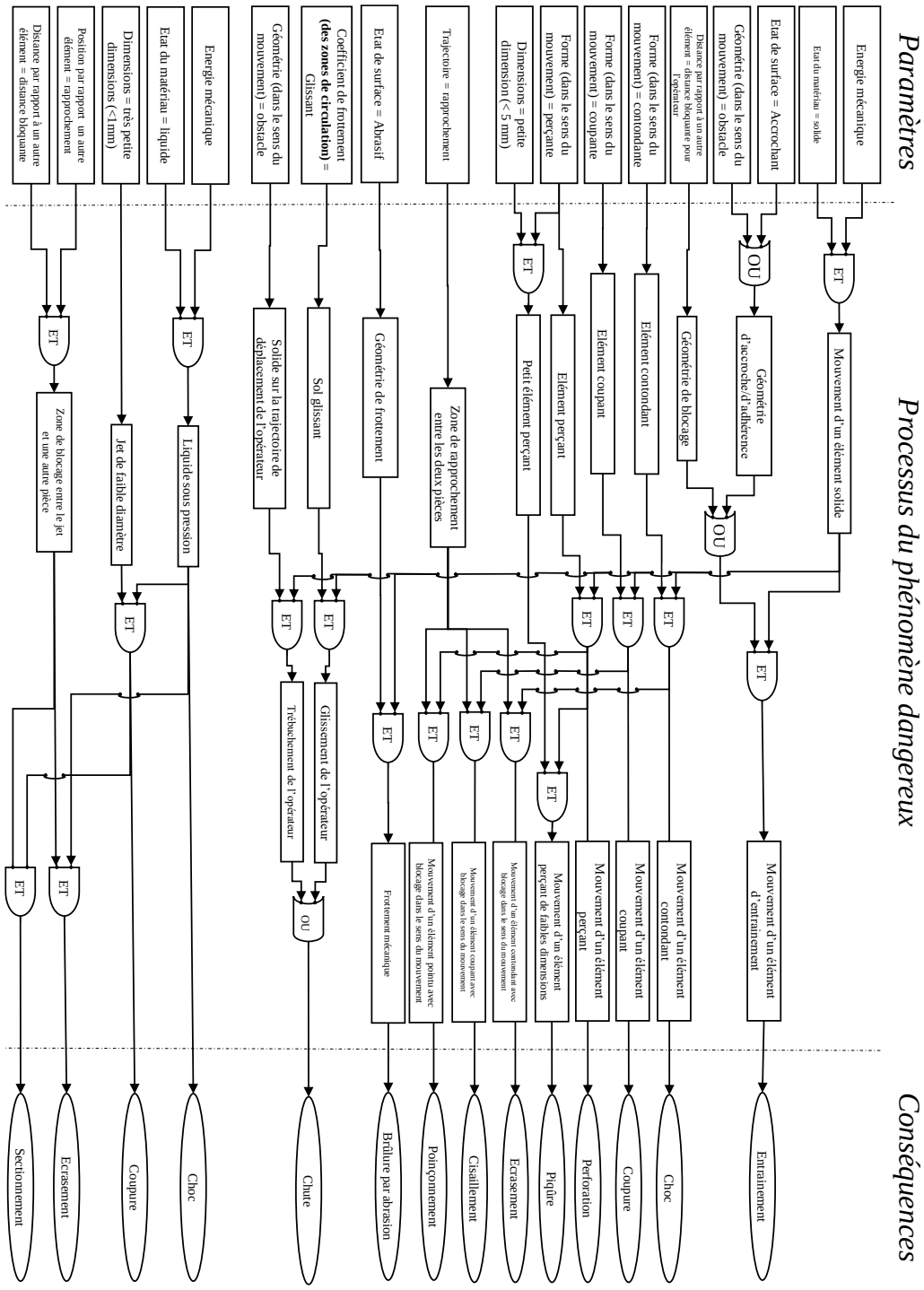


Figure 34. Exemples de règles de construction des conséquences des phénomènes dangereux mécaniques (pour une meilleure lisibilité, l'arbre a été scindé en deux suivant l'état de la matière)

1.2.3.2. Application au le cric mécanique de voiture

Dans la partie précédente, 29 phénomènes dangereux mécaniques avaient été identifiés. Les paramètres complémentaires associés à ce type d'énergie ont ensuite été renseignés pour chaque surface fonctionnelle. Pour illustrer l'exploitation des combinaisons de paramètres pour l'identification des conséquences, seuls les phénomènes dangereux des composants « Vis de transmission » et « Bras 1 » représentés sur la figure 35 sont détaillés.

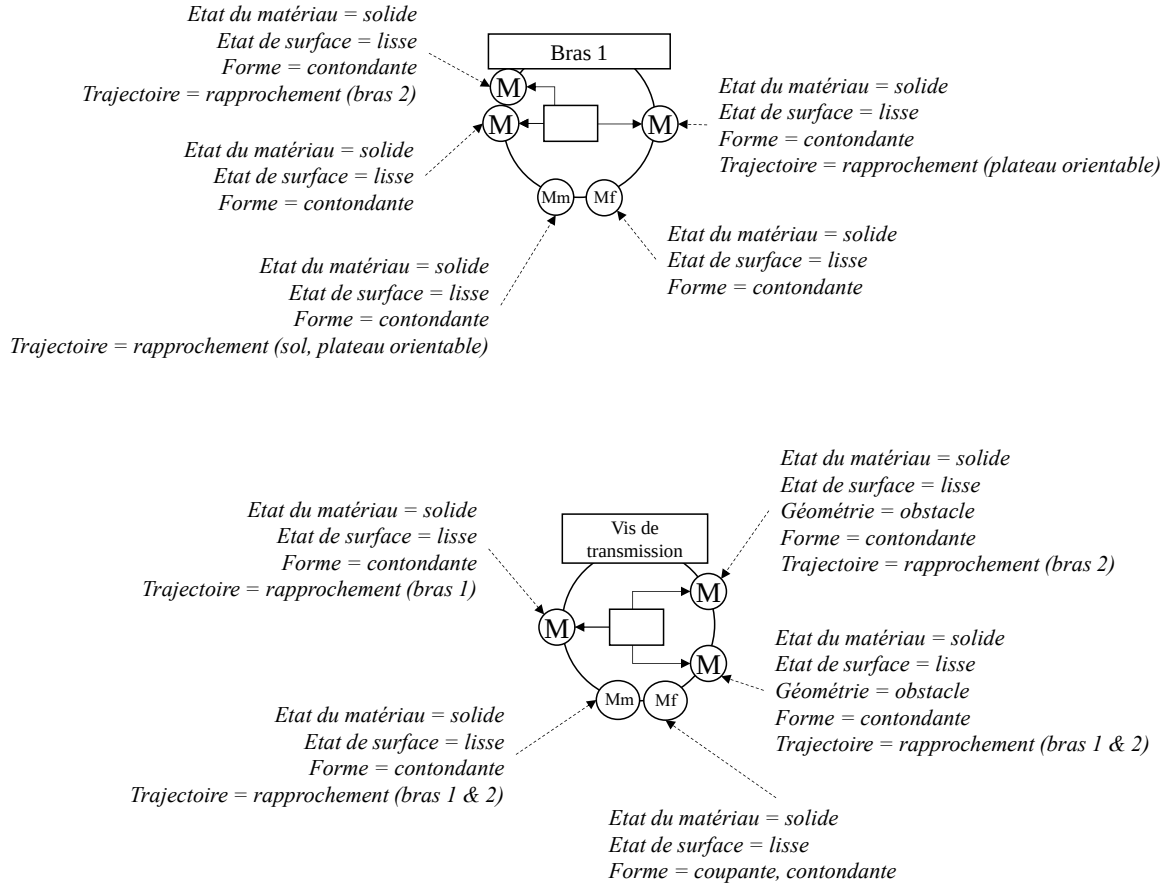


Figure 35. Paramètres complémentaires des éléments « Vis de transmission » et « Bras 1 » du cric mécanique

L'application des règles logiques contenues dans la figure 34 sur ces paramètres complémentaires permet de préciser les conséquences de chaque surface fonctionnelle :

- Toutes les surfaces animées par de l'énergie mécanique ont des formes contondantes, ce qui génère potentiellement une conséquence de choc (énergie = mécanique ET état = solide ET forme = contondante) ;
- En ce qui concerne la surface fonctionnelle reliant le « Bras 1 » au « Bras 2 », la conséquence « Choc » initiale peut se transformer en « écrasement » selon la valeur du paramètre trajectoire = rapprochement ;

- Une conséquence potentielle d'entrainement apparait enfin pour la vis d'entrainement du fait de sa géométrie (énergie = mécanique ET état = solide ET géométrie (dans le sens du mouvement) = obstacle).

Les résultats de cette étape d'identification complètent ceux de l'identification des types de phénomènes dangereux et sont capitalisés dans le tableau 10. Les phénomènes dangereux mécaniques étant majoritairement présents dans le cric, le concepteur dispose donc d'une information sur les conséquences pour la plupart des phénomènes dangereux identifiés. En fonction de l'état d'avancement du projet de conception et de la connaissance des types de phénomènes dangereux le concepteur peut proposer des modifications du produit, ou principes ou solutions de prévention adaptées aux dommages identifiés.

Tableau 10. Bilan de l'identification des conséquences

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle	Conséquences
Manivelle	1	Biomécanique	Liés au non-respect des principes ergonomiques	Choc, écrasement, entrainement
	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique	
	1	Potentielle de pesanteur		
	1	Mécanique de rotation		

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle	Conséquences
Vis de transmission	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique	Choc, écrasement, entrainement
	1	Potentielle de pesanteur		
	3	Mécanique de rotation		

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle	Conséquences
Ecrou orientable	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique	Choc, écrasement
	1	Mécanique de translation		
	1	Potentielle de pesanteur		
	1	Mécanique de rotation		

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle	Conséquences
Bras 1	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique	Choc, écrasement
	1	Potentielle de pesanteur		
	3	Mécanique de translation		

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle	Conséquences
Bras 2	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique	Choc, écrasement
	1	Potentielle de pesanteur		
	2	Mécanique de rotation		

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle	Conséquences
Interface cric - voiture orientable	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique	Choc, écrasement, entrainement
	1	Potentielle de pesanteur		
	2	Mécanique de translation		
	1	Mécanique de rotation		

Nom du sous-système	Nombre de surfaces fonctionnelles	Type d'énergie échangée par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle	Conséquences
Plateau orientable	1	Mécanique (énergie opérateur)	Mécanique	Choc, écrasement
	1	Potentielle de pesanteur		
	1	Mécanique de translation		

1.2.3.3. Conclusion sur l'identification des conséquences

La connaissance des conséquences pour un phénomène dangereux permet une meilleure compréhension des évènements qui se produisent dans le système et qui peuvent mettre en danger l'opérateur. Pour cela, un deuxième traitement synthétisé en figure 36 est proposé. Il est basé sur l'analyse des combinaisons entre les paramètres énergétiques et d'autres paramètres de conception (appelés paramètres complémentaires). La démarche permettant d'élaborer ces combinaisons a également été explicitée.

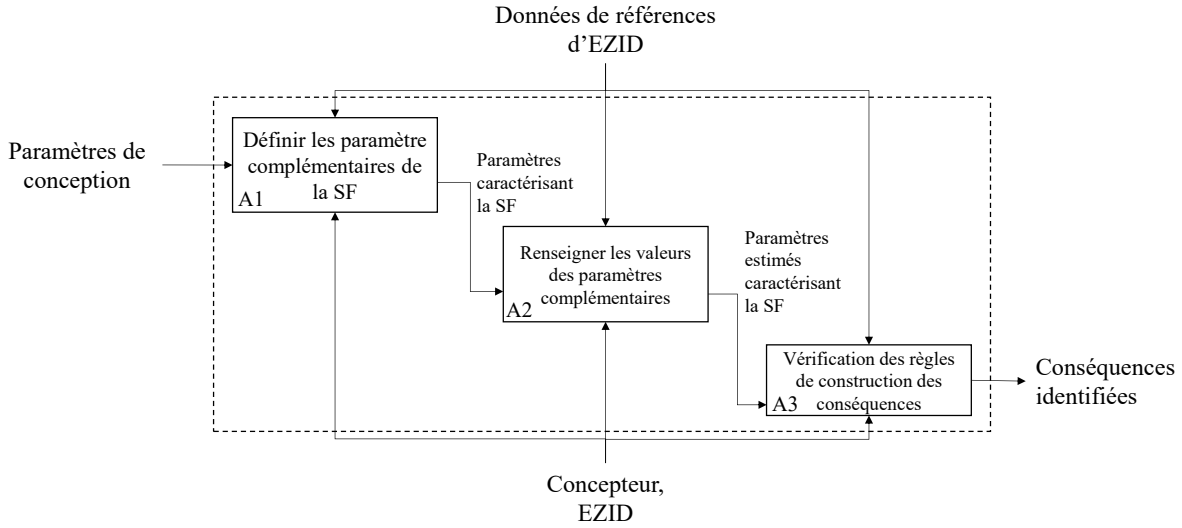


Figure 36. Traitement d'identification des conséquences

A ce stade, les phénomènes dangereux pertinents et leurs conséquences potentielles sont identifiés. La section suivante présente la manière de préciser lesquels sont significatifs.

1.2.4. Identification des phénomènes dangereux significatifs

Le troisième traitement proposé consiste donc à distinguer parmi les phénomènes dangereux pertinents (existant dans la machine) ceux qui sont réellement significatifs (qui nécessitent une action spécifique du concepteur pour éliminer ou réduire les risques associés).

1.2.4.1. Détermination des valeurs seuils

Dans le cadre d'EZID, cette distinction se fait en analysant les valeurs des paramètres énergétiques auxquels sont associés les phénomènes dangereux, et donc leur gravité potentielle. Elle ne prend pas en considération les paramètres d'exposition qui ne sont pas intrinsèques à la machine, ou alors elle les maximise afin de se placer dans le pire des cas possible.

Cette analyse des paramètres énergétiques se fait en comparant leurs valeurs fixées par le concepteur (Vc) à des valeurs seuils (Vs) délimitant l'intervalle dans lequel les flux d'énergie ne génèrent pas de risque. Si Vc est au-delà de Vs (supérieure ou inférieure selon les cas), le phénomène dangereux étudié est considéré comme significatif, et si un type de phénomène

dangereux ne dispose pas de valeurs seuils, cela signifie qu'il génère nécessairement des risques et doit donc être automatiquement considéré comme significatif. C'est par exemple le cas de phénomènes dangereux mécaniques.

Tant que Vc n'est pas définie par le concepteur, le phénomène dangereux est considéré comme « pertinent-inconnu » du fait que l'identification de son aspect significatif n'est pas encore possible.

Ces valeurs seuils sont définies dans les directives ou normes et font parties des données de référence d'EZID. Ces valeurs peuvent être liées soit à un paramètre (ex. : niveau sonore pour les risques liés au bruit par exemple (Norme, 2009b), soit à une combinaison de paramètres de conception comme pour les phénomènes dangereux électriques (le type de courant pour le type électrique et niveaux) (Norme, 2009a) ou ceux liés aux vibrations (zone de contact et niveau). Le tableau 11 contient les valeurs seuils identifiées pour les différents types de phénomènes dangereux.

Tableau 11. Valeurs seuils pour plusieurs types de phénomènes dangereux (Norme, 2002, 2008a, 2008c, 2009a, 2009b, 2010, 2014a, 2014b)

Phénomènes dangereux	Valeur seuil
Mécanique	Aucune
Engendrés par les vibrations	0,5 m/s² (ensemble du corps) 2,5m/s² (ensemble main-bras)
Engendrés par le bruit	80dB
Electrique	12V (AC), 30V (DC), 5 mA
Thermique	15°C (froid) - 43°C (chaud)
Engendrés par les rayonnements (optique artificiel)	Groupe de risque > 0
Engendrés par les rayonnements (laser)	Classe > 1
Engendrés par les rayonnements (électromagnétique)	Intensité du champ électrique > 61 V/m Intensité du champ magnétique > 0,16 A/m Induction magnétique > 0,2 µT Densité de puissance équivalente onde plane > 10W/m² Courant de contact > 1 mA Courant induit > 100mA
Engendrés par les rayonnements (ionisant)	Elément ionisant existant
Engendrés par des matériaux ou des produits (chimique)	Niveau de danger > 1
Engendrés par des matériaux ou des produits (biologique)	Groupe > 1 Pouvoir allergisant existant
Liés au non -respect des principes ergonomiques	Charge à manutentionner >15 kg

1.2.4.2. Application au cric mécanique de voiture

Il est possible d'identifier le caractère significatif des 30 phénomènes dangereux identifiés dans le cric de voiture.

Les 29 phénomènes dangereux mécaniques sont par définition significatifs puisqu'il n'existe pas de valeur seuil les concernant. En ce qui concerne le phénomène dangereux

potentiel lié au non-respect des principes ergonomiques pour l'actionnement de la manivelle, la norme NF EN 1005-3 fixe pour ce type d'utilisation une valeur seuil de 20 N (sans contrainte de temps) (détails : 50N x 0,8 (multiplicateur pour la vitesse) x 0,5 (multiplicateur pour la durée) = 20N (Norme, 2008a)).

Une fois cette étape terminée, tous les traitements liés à l'identification des phénomènes dangereux sont terminés comme cela est représenté sur la vue globale d'EZID de la figure 21. Du fait du caractère systématique et multi types d'EZID, un grand nombre de phénomènes dangereux sont identifiés. Il est donc indispensable de structurer le retour d'informations au concepteur afin de l'aider dans ses prises de décision.

1.2.4.3. Structuration du retour d'information

Un premier critère d'organisation du retour d'information est lié à la classification des phénomènes dangereux. Les phénomènes dangereux significatifs doivent être traités en priorité, viennent ensuite les phénomènes dangereux « pertinents-inconnus », toutes les données permettant de les classer n'étant pas encore définies, puis les phénomènes dangereux pertinents qui, sauf modifications des paramètres les concernant, ne créeront pas de risques.

Le deuxième critère d'organisation proposé concerne la position de la surface fonctionnelle dans le flux d'énergie. Il est en effet préférable d'agir en priorité sur la surface fonctionnelle le plus en amont puis sur les surfaces fonctionnelles suivantes dans le sens du flux d'énergie. Dans le cas contraire, les modifications apportées à une surface fonctionnelle pour réduire un risque pourraient être remises en cause en cas de modification d'une des surfaces fonctionnelles en amont. Il faut toutefois noter que ce deuxième critère n'est pas applicable lorsque le flux d'énergie est réversible. C'est par exemple le cas du cric où le flux va dans un sens lorsque l'utilisateur actionne la manivelle, sens qui s'inverse lorsque l'utilisateur s'arrête comme illustré en figure 37.

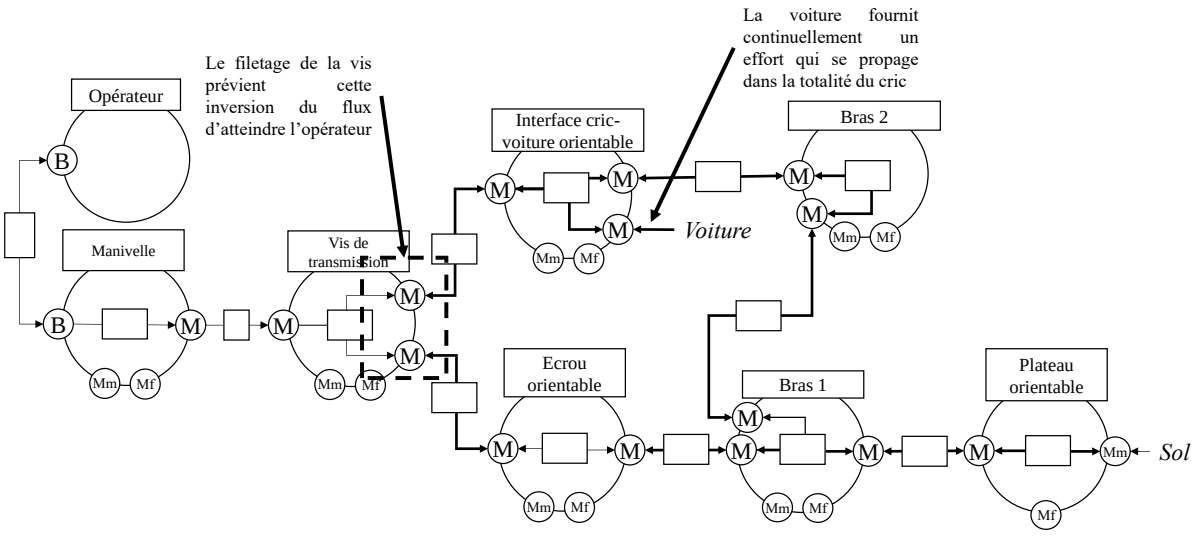


Figure 37. Mise en évidence de l'inversion du flux du cric

Le retour d'informations fait au concepteur doit donc contenir le nombre de phénomènes dangereux (qui est égal au nombre de surfaces fonctionnelles), le type de ces phénomènes dangereux et les conséquences qu'ils peuvent provoquer. Il est préconisé d'organiser ce retour d'informations de la manière suivante (classifier par sous-systèmes) :

- les significatifs par appartenance à un flux d'énergie, de celui placé le plus en amont du flux d'énergie jusqu'à celui le plus en aval ;
- les pertinents-inconnus par appartenance à un flux d'énergie, de celui placé le plus en amont du flux d'énergie jusqu'à celui le plus en aval ;
- les pertinents.

1.2.4.4. Conclusion sur l'identification de l'aspect significatif

Cette troisième et dernière étape d'EZID permet d'informer le concepteur de l'ensemble des phénomènes dangereux significatifs. Ces derniers générant nécessairement des risques, il doit nécessairement faire une évaluation conformément aux méthodes proposées dans la littérature (voir chapitre 2 partie 1.1) afin de définir des moyens de protection.

Comme EZID s'appuie sur les paramètres de conception, cette information est synchrone par rapport à l'évolution du projet. Le concepteur dispose ainsi d'un retour d'informations conséquent pour améliorer son projet avec l'objectif de protéger la santé et la sécurité des futurs opérateurs.

Une fois les mesures de prévention choisies, le concepteur doit actualiser le MFS afin de s'assurer que les phénomènes dangereux précédemment identifiés sont bien protégés et que ces moyens de prévention ne génèrent pas de nouveaux phénomènes dangereux.

2. Exploitation d'EZID

L'exploitation d'EZID par un concepteur a déjà été grandement décrite au travers du chapitre précédent : réalisation et modification du MFS, utilisation d'éléments génériques, renseignement des paramètres énergétiques et des paramètres complémentaires, etc… Pour compléter cette description, il est également nécessaire de détailler la manière dont va se traduire le processus de réduction des risques au travers d'EZID ainsi que l'administration des données de référence.

2.1. Intégration des mesures de prévention dans la modélisation

Comme rappelé au chapitre 2 partie 1.2, sur le processus de réduction du risque, le concepteur doit en premier rechercher à éliminer ou réduire les risques de façon intrinsèque, puis seulement mettre en place des moyens de protection (protecteurs, dispositifs de protection, protections complémentaires).

Dans le cas de la prévention intrinsèque, le concepteur peut soit supprimer le phénomène dangereux, soit le réduire en diminuant le niveau des paramètres énergétiques et ainsi passer d'un phénomène dangereux significatif à pertinent. Dans le premier cas, le MFS est nécessairement modifié car cela implique des choix de conception différents afin de supprimer la surface fonctionnelle en question. Pour réaliser ces modifications, le concepteur peut s'appuyer sur les opérateurs et règles de modélisation qui ont été apportés au MFS dans la partie 1.2.1. Dans le second cas, les éléments du MFS ne sont pas modifiés, seules les données contenues dans les surfaces fonctionnelles sont affectées.

Le deuxième niveau de prévention concerne la mise en place de moyens de protection afin d'empêcher le passage des flux d'énergies par l'opérateur, ce qui revient à protéger l'accès à une ou plusieurs zones dangereuses. Cela peut également se traduire de deux façons différentes.

Le concepteur peut choisir d'ajouter un élément externe au système n'ayant aucune action sur les échanges d'énergies utiles existants (ex. : barrière, protecteur mobile). Comme représenté en figure 38, l'élément est rapporté et mis en lien avec le reste du MFS sans modification des autres éléments déjà présents (en dehors de son lien avec la structure) (Hasan et al., 2001). Dans cet exemple, le flux d'énergie utile est celui passant du sous-système 1 au sous-système 2. Dans un fonctionnement nominal, le protecteur joue le rôle d'une liaison isolante qui protège l'opérateur des flux d'énergies potentiels indésirables venant des surfaces fonctionnelles. L'opérateur n'aura donc accès qu'au protecteur. Si ce moyen de protection est énergisé (barrage immatériel, protecteur mobile motorisé, etc.), le concepteur devra alors également représenter ces flux d'énergies sur le MFS.

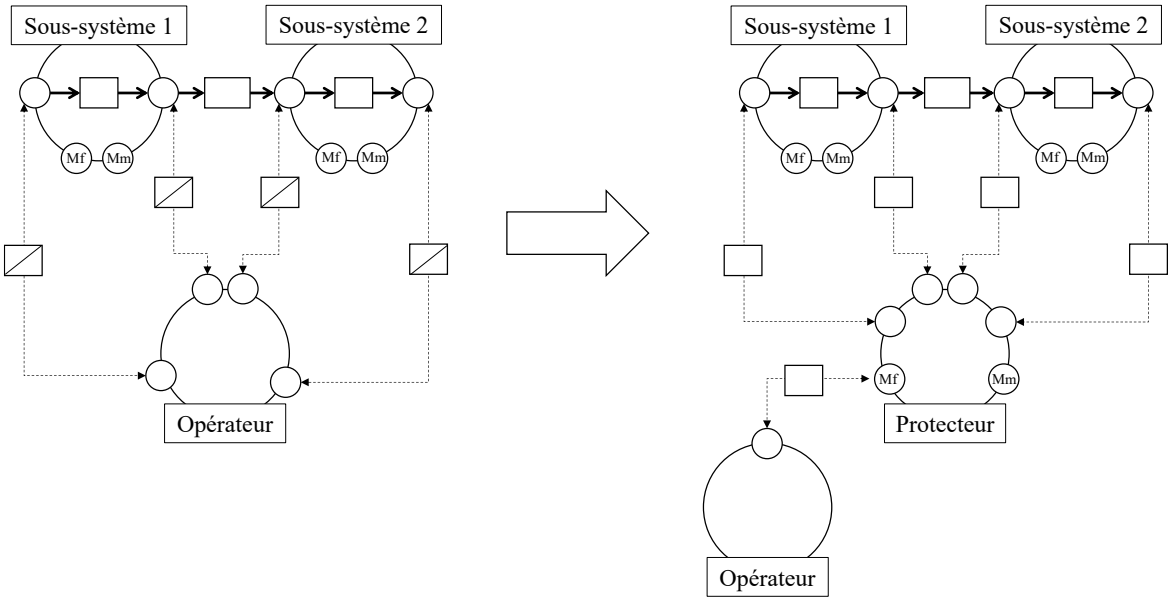


Figure 38. Ajout d'un élément au MFS sans modification des échanges d'énergies utiles

La mise en place d'une mesure de prévention peut également agir sur les énergies échangées entre deux sous-systèmes (ex. : limiteur de pression). Pour cela, le concepteur peut

intégrer un élément de protection dans un sous-système existant et l'association interne gérant la transmission d'énergie devra modéliser la perte d'énergie engendrée par ce système de contrôle sous la forme d'une liaison semi-conductrice. Il peut sinon décider de modéliser le système de contrôle sur le flux d'énergie et dans ce cas il doit créer une frontière pour représenter l'élément (Sous-système * dans la figure 39). L'utilisation de l'opérateur de modélisation de *décomposition en série d'une liaison ou d'une association interne* sera utilisé afin que la liaison (représentant le flux d'énergie cible) puisse être décomposée et liée au nouveau système.

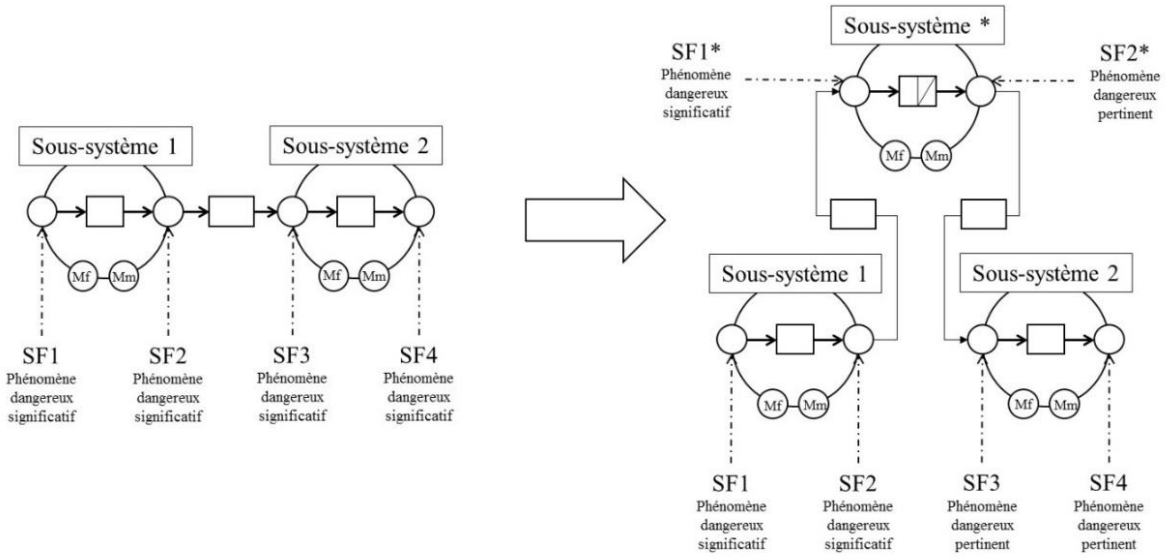


Figure 39. Illustration de l'intégration d'une solution de prévention ayant une action sur un flux d'énergie

Dans le cas des phénomènes dangereux liés au non-respect des principes ergonomiques, les règles précédentes de suppression de l'interaction entre l'opérateur et la machine ne s'appliquent pas. Elles sont au contraire souhaitées tout en s'assurant que la charge physique demandée ne dépasse une valeur de référence. Pour qu'une telle représentation soit identifiable sur le MFS, un nouveau type de liaison est proposé : la liaison conductrice adaptée. Cette liaison illustrée sur la figure 40, accompagnée de la modification des paramètres concernés dans les surfaces fonctionnelles qu'elle relie, permet de modéliser l'implantation de mesures de prévention intrinsèques vis à vis des phénomènes dangereux liés au non-respect de principes ergonomiques. Le concepteur doit donc suivre la règle de changement de fonction pour pouvoir réaliser ce type de modification dans le MFS.

Une fois la modélisation des solutions de prévention terminée, le concepteur doit utiliser de nouveau EZID afin de vérifier si ces solutions n'apportent pas de nouveaux phénomènes dangereux pouvant engendrer des risques pour la santé et la sécurité des opérateurs. Cette boucle doit être répétée jusqu'à ce que tous les risques de la machine pouvant être identifiés par EZID soient traités.

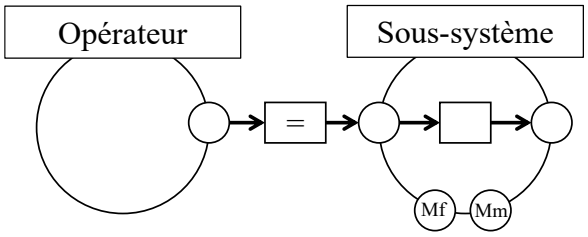


Figure 40. Exemple de liaison conductrice adaptée

2.2. Administration des données de références

Dans les parties précédentes qui détaillent les différentes étapes de la méthode EZID, il est fait état de nombreuses données de référence paramètres généralisés étendus, paramètres complémentaires, combinaisons de paramètres, valeurs seuils et composants génériques. Il doit être possible de les modifier afin de tenir compte des évolutions normatives (valeurs seuils), ou technologiques (composants génériques) ou plus simplement de les compléter car celles listées dans ce mémoire ne sont pas nécessairement exhaustives. Pour administrer ces données, il est nécessaire de respecter les règles suivies pour leur construction, à savoir :

- Pour les composants génériques, ils doivent être représentés sous la forme de frontière unique, en identifiant les échanges d'énergies utiles et dissipés par le composant et les automatismes de conception doivent être respectés ;
- Dans le cas des techniques de liaisons génériques, il faut définir les énergies dissipées aux niveaux des deux frontières ;
- Pour les réactions avec dissipations, il faut définir les énergies dissipées et les conditions de leur génération ;
- Pour les types d'énergies il faut préciser les variables généralisées étendues et le type de phénomènes dangereux associés ;
- Pour les variables généralisées, il faut préciser leurs natures (effort, courant, puissance) et le type d'énergie concernée ;
- Pour les combinaisons de paramètres et les paramètres complémentaires, il faut définir le type d'énergie auquel appartient la conséquence, la conséquence à modifier (à défaut la créer), le type d'énergie concerné et appliquer la méthode de l'arbre des causes pour trouver les paramètres complémentaires et leur combinaisons ;
- Pour les valeurs seuils, il est nécessaire de se référer aux normes ou directives pour obtenir les nouvelles données et les modifier ou ajouter au tableau 11.

2.3. Eléments pour le développement d'un logiciel basé sur EZID

Compte tenu du nombre d'éléments manipulés et de l'aspect systématique de la méthodologie, l'utilisation d'EZID de façon manuelle n'est pas envisageable dans le cadre de projet industriel. Afin de montrer qu'EZID peut être supportée par un outil informatique, un démonstrateur a été développé. Un exemple de l'interface est présenté en figure 41 et son fonctionnement est détaillé en annexe 5.

Les éléments permettant de le réaliser sont décrits sur deux BPMN et dans un diagramme de classe (Business Process Model Notation), décrivant le processus et les éléments intervenant dans son utilisation et son administration. Ces modèles ont été construits et validés expérimentalement au cours du développement.

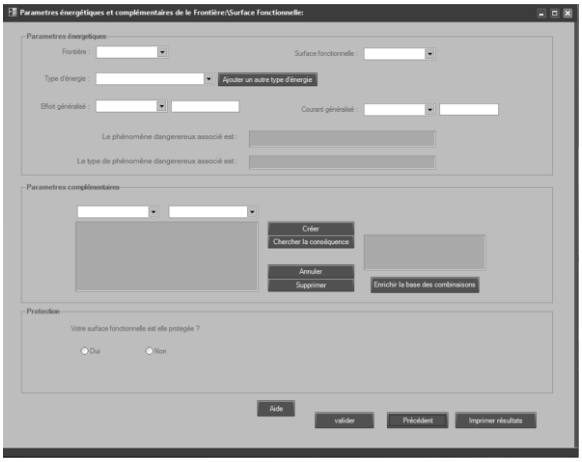
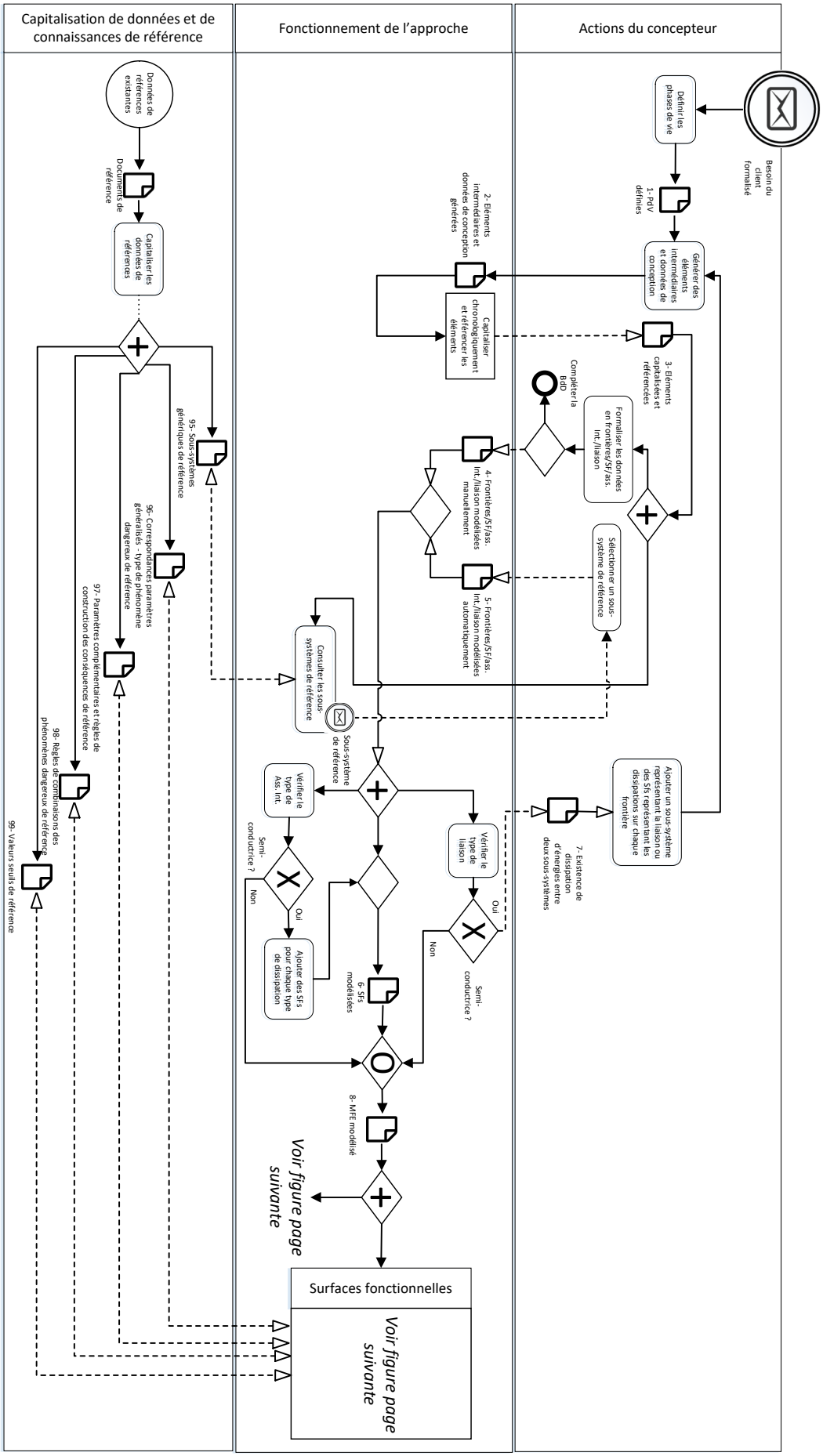


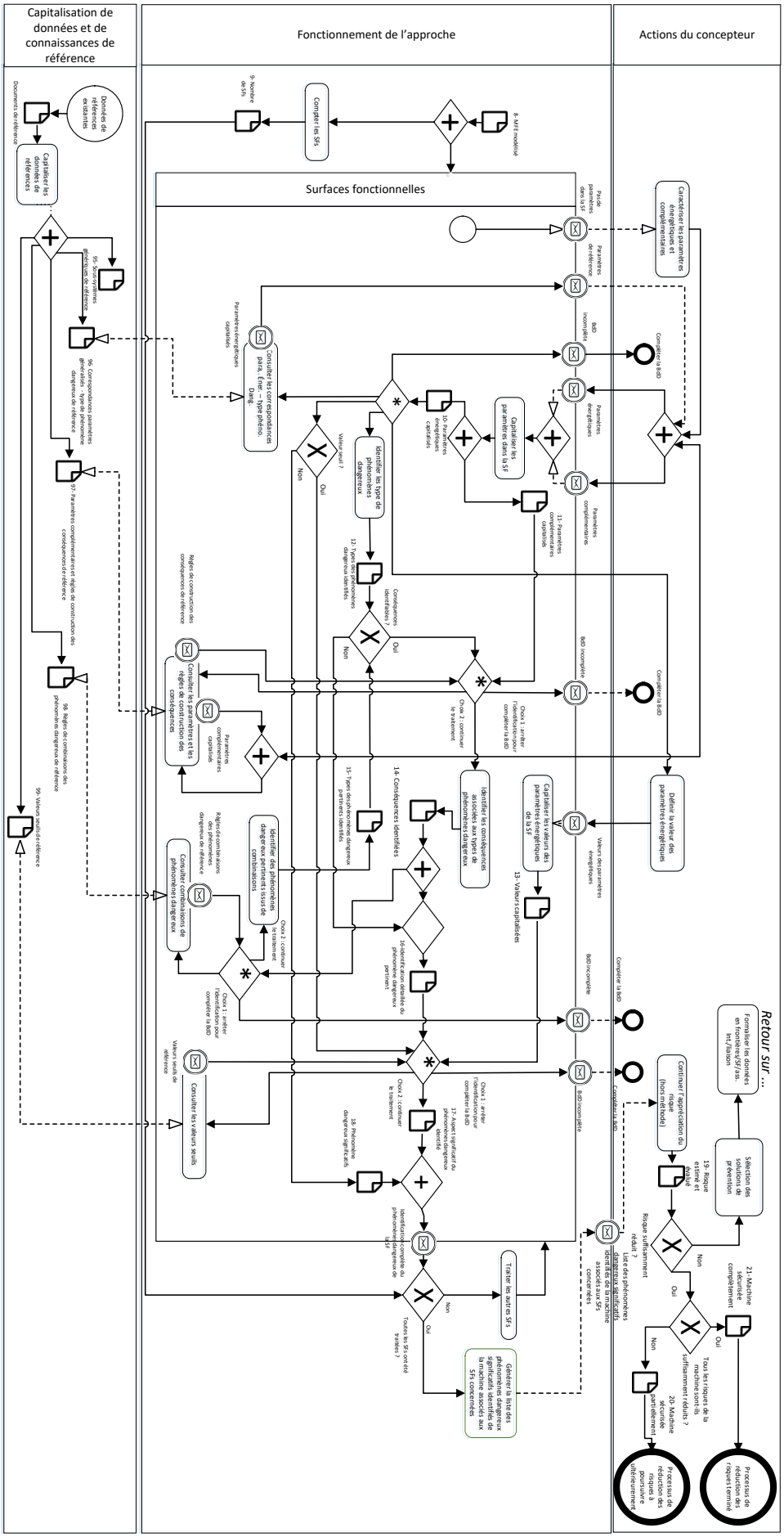
Figure 41. Exemple d'une fenêtre de la maquette informatique développée

Le BPMN de la phase d'utilisation représenté en figure 42 met en jeu le concepteur (utilisateur d'EZID), la partie traitement du logiciel et les données de références enregistrées, Le concepteur a comme unique rôle de renseigner les différentes données constituant le MFS au travers de l'interface du logiciel. Ces données capitalisées sont ensuite automatiquement traitées par le logiciel qui met en œuvre les différents traitements détaillés dans ce chapitre avec comme support les données de référence. Le logiciel renvoie de façon synchrone le résultat intermédiaire obtenu à partir des paramètres de conception renseignés. Il est également possible d'éditer un rapport structuré conformément à la partie 1.2.4.3.

Après avoir réalisé une évaluation des risques significatifs identifiés (hors périmètre d'EZID), le concepteur peut définir les mesures de prévention appropriées et modifier le MFS en conséquence.

Le BPMN de la phase « Administration » illustré en figure 42 met en jeu un utilisateur (qui n'est pas nécessairement un concepteur) afin de compléter ou modifier les données de référence et le système de stockage des données. Pour chaque type de données à modifier, l'utilisateur doit renseigner l'ensemble des éléments constituant ces données selon les règles définies à la partie 2.2.


Capitalisation de données et de connaissances de référence
Fonctionnement de l'approche
Actions du concepteur
Besoin du client formalisé
Définir les phases de vie
1- PdV définies
Générer des éléments intermédiaires et données de conception
2- Eléments intermédiaires et données de conception générées
Capitaliser chronologiquement et référencer les éléments
3- Eléments capitalisées et référencées
Compléter la BdD
Formaliser les données en frontières/SF/ass. Int./liaison
4- Frontières/SF/ass. Int./liaison modélisées manuellement
5- Frontières/SF/ass. Int./liaison modélisées automatiquement
Sélectionner un sous-système de référence
Consulter les sous-systèmes de référence
Sous-système de référence
Vérifier le type de Ass. Int.
Semi-conductrice ?
Non
Oui
Ajouter des SFs pour chaque type de dissipation
Vérifier le type de liaison
Semi-conductrice ?
Oui
Non
6- SFs modélisées
7- Existence de dissipation d'énergies entre deux sous-systèmes
Ajouter un sous-système représentant la liaison ou des SFs représentant les dissipations sur chaque frontière
8- MFE modélisé
Voir figure page suivante
Surfaces fonctionnelles
Voir figure page suivante
Données de références existantes
Documents de référence
Capitaliser les données de références
95- Sous-systèmes génériques de référence
96- Correspondances paramètres généralisés - type de phénomène dangereux de référence
97- Paramètres complémentaires et règles de construction des conséquences de référence
98- Règles de combinaisons des phénomènes dangereux de référence
99- Valeurs seuils de référence


Capitalisation de données et de connaissances de référence
Fonctionnement de l'approche
Actions du concepteur
Surfaces fonctionnelles
Compter les SFs
Caractériser les paramètres énergétiques et complémentaires
Identifier les type de phénomènes dangereux
Capitaliser les paramètres dans la SF
Consulter les correspondances param. Ener – type phéno. Dang.
Consulter les paramètres et les règles de construction des conséquences
Identifier les conséquences associées aux types de phénomènes dangereux
Capitaliser les valeurs des paramètres énergétiques de la SF
Définir la valeur des paramètres énergétiques
Identifier des phénomènes dangereux par interaction/association de combinaisons
Consulter les valeurs seuils
Traiter les autres SFs
Générer la liste des phénomènes dangereux significatifs de la machine associés aux SFs concernées
Retour sur ...
Formaliser les données en frontière/SF/ass.
Sélection des solutions de prévention
Continuer l'appréciation du risque (hors méthode)
Processus de réduction des risques terminé
Processus de réduction des risques à poursuivre ultérieurement
Données de références en instantes
Capitaliser les données de références
Documents de référence
Compteur
Oui
Non
Choix 1 : arrêter l'identification pour compléter la BdD
Choix 2 : continuer le traitement
BdD incomplète
Compléter la BdD
Paramètres énergétiques
Paramètres complémentaires
Valeurs des paramètres énergétiques
Valeurs seuils de référence
Règles de construction des conséquences de référence
Règles de combinaisons des phénomènes dangereux de référence
Conséquences identifiées
Types des phénomènes dangereux identifiés
Phénomènes dangereux identifiés
Valeurs captabilisées
Liste des phénomènes dangereux identifiés de la machine associés aux SFs concernées
Tous les risques de la machine sont-ils suffisamment réduits ?
Risque suffisamment réduit ?
Toutes les SFs ont été traitées ?
Identification complète du phénomène dangereux de la SF ?
Identification complète du phénomène dangereux pertinent ?

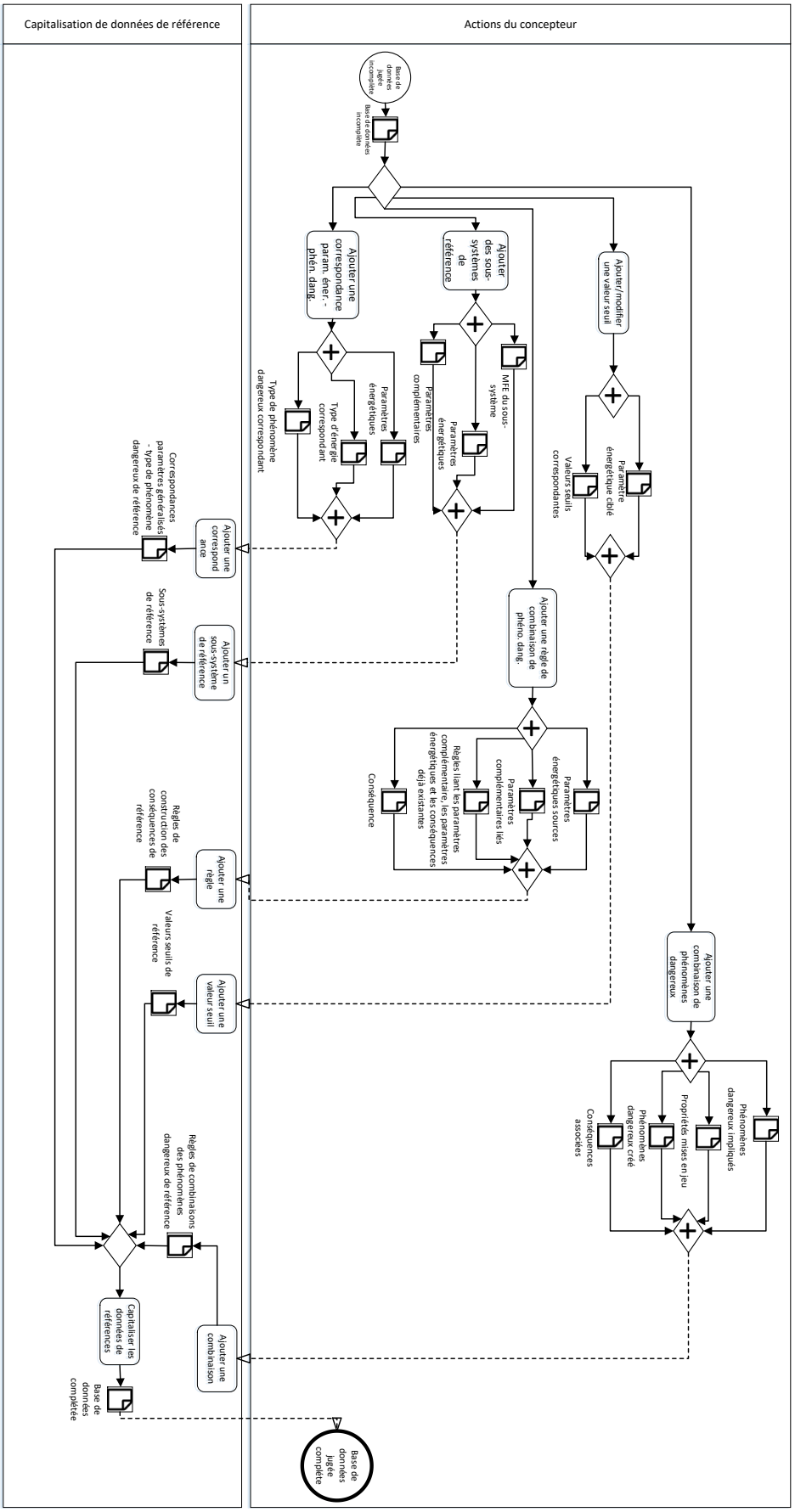


Figure 42. BPMN du démonstrateur en phase d'utilisation (p84-85) et modification (p86)

Le diagramme de classe illustré sur la figure 43 fait apparaitre les différents éléments du MFS, les éléments propres à EZID (ex. : système générique, combinaison de paramètres) et les différents niveaux de l'identification des phénomènes dangereux (type, conséquence et aspect significatif).

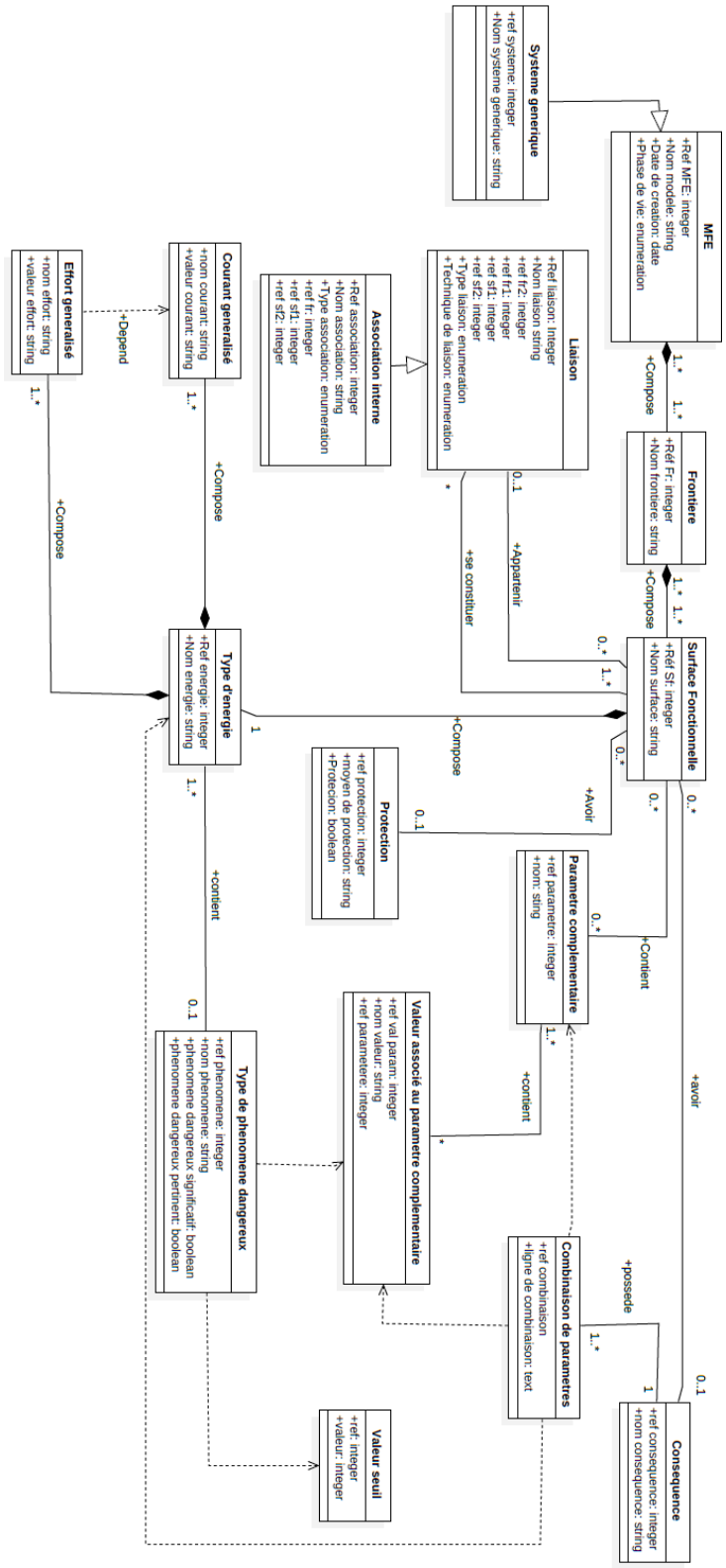


Figure 43. Diagramme de classe du logiciel (Nadi, 2016b)

3. Conclusion sur EZID

Au travers d'une étape de modélisation et de trois étapes de traitement basées sur l'analyse des échanges d'énergies, la méthode EZID identifie de manière systématique l'ensemble des phénomènes dangereux présents dans la machine à un instant donné du processus de conception. Une fois cette identification réalisée, elle renvoie au concepteur des informations complètes et organisées sur ces phénomènes dangereux afin de lui permettre de poursuivre le processus d'appréciation des risques et définir des moyens de protection adaptés.

L'étape de modélisation avec le formalisme du MFS est l'étape cruciale de la méthode. Elle consiste à représenter la machine au travers de ses flux d'énergies afin d'identifier l'ensemble des surfaces fonctionnelles du modèle. Ces dernières sont les interfaces d'échange des énergies et par conséquent les éléments générant les phénomènes dangereux. Si un échange d'énergie est oublié, les surfaces fonctionnelles associées ne seront pas représentées et les phénomènes dangereux correspondants ne pourront pas être identifiés. Pour éviter au maximum ces oublis, des modèles de composants ou éléments génériques sont proposés ainsi que des automatismes de modélisation. Ils permettent de faire apparaitre les surfaces fonctionnelles correspondantes à des énergies dissipées ou encore des énergies systématiquement présentes dans tous les composants d'une machine. C'est par exemple le cas de la surface Mm pour l'énergie potentielle liée à la gravité terrestre ou encore la surface Mf pour l'énergie pouvant être apportée par l'utilisateur en cas de contact (volontaire ou non) et être une source de risque du fait de la forme du composant.

Cette modélisation a été explicitée afin d'être théoriquement réalisable dès la phase de conception conceptuelle et afin de permettre son évolution jusqu'à la fin du processus de conception comme cela est illustré sur la figure 21. Elle permet également d'analyser les différentes phases de vie de la machine en établissant autant de MFS que d'architectures énergétiques présentes.

Les trois traitements qui suivent cette modélisation permettent d'identifier les différentes caractéristiques des phénomènes dangereux à partir des données caractérisant les échanges d'énergies et les propriétés des surfaces fonctionnelles.

Le premier traitement permet l'identification du type de phénomène dangereux par association avec le type d'énergie, lui-même défini par des variables généralisées. Il a été nécessaire pour cela d'étendre cette notion de variables généralisées afin de couvrir l'ensemble des phénomènes dangereux. Le deuxième traitement identifie les conséquences ou dommages potentiels de ces phénomènes dangereux, en exploitant les paramètres énergétiques en association avec les paramètres complémentaires afin d'identifier les combinaisons générant des conséquences. La méthode de l'arbre des causes a été utilisée pour définir les paramètres complémentaires et les combinaisons à prendre en compte. Enfin, l'aspect significatif est identifié par un troisième traitement qui compare les valeurs des paramètres énergétiques avec des valeurs seuils. Une fois EZID appliquée, le concepteur peut poursuivre le processus

d'appréciation des risques en utilisant d'autres outils afin de caractériser les données non couvertes par la méthode (ex. : AMDEC situation de travail).

Comme ces trois traitements s'appuient sur des paramètres de conception issus des objets intermédiaires, ils se font donc de manière systématique et synchrone par rapport à l'avancement du processus de conception. EZID répond de ce fait aux besoins d'une identification dynamique (conception conceptuelle → conception détaillée), inductive (paramètres de conception → phénomènes dangereux), générique vis à vis des phénomènes dangereux et indépendante du processus de conception suivi et des machines pouvant être modélisées.

Il faut toutefois noter que l'aspect « intégrée et/ou interconnectable » avec les outils et méthodes de conception actuels qui était également recherché n'est à ce stade pas atteint. Même si un démonstrateur informatique a été développé, l'application d'EZID nécessite une analyse des objets intermédiaires générés par ces outils et méthodes afin d'extraire les paramètres qui nous intéressent pour construire le MFS et alimenter les différents traitements proposés.

Les différentes étapes d'EZID ont été illustrées sur un cas d'application très simple au cours de ce chapitre. Afin de vérifier sa validité, la méthode EZID a été appliquée « manuellement » sur les données d'un projet industriel de l'entreprise LORMAC Automation. Il s'agit de la conception d'une ligne d'approvisionnement d'une chaine de montage. Le chapitre 4 de ce mémoire présente les données relatives à cette expérience.

Chapitre 4 : Application industrielle de la méthode

Afin de valider la description théorique de son fonctionnement EZID a été testée sur un projet industriel. Il s'agit d'une ligne d'approvisionnement conçue par l'entreprise LORMAC Automation (www.lormac.fr). Ce projet a été suivi de Janvier 2015 à Août 2015.

Le protocole expérimental suivi pour le classement et l'exploitation des données de conception fournie par LORMAC Automation est dans un premier temps présenté. Les différentes étapes de l'application de la méthode EZID sur ces données ainsi que les résultats obtenus sont ensuite détaillés.

1. Présentation du cas industriel et du protocole expérimental

1.1. Présentation du cas industriel

La ligne d'approvisionnement du cas d'étude est représentée en figure 44. Il s'agit d'un sous-ensemble modulaire qui doit recevoir différents type des pièces pour ensuite les transférer vers un moyen de préhension. Pour des raisons de confidentialité, le fonctionnement de ce sous ensemble n'est volontairement pas détaillé. Le projet final est constitué de plusieurs convoyeurs, d'un vérin, d'un système de reconnaissance de forme (caméra + lumière contrôlée) et d'une structure supportant l'ensemble.

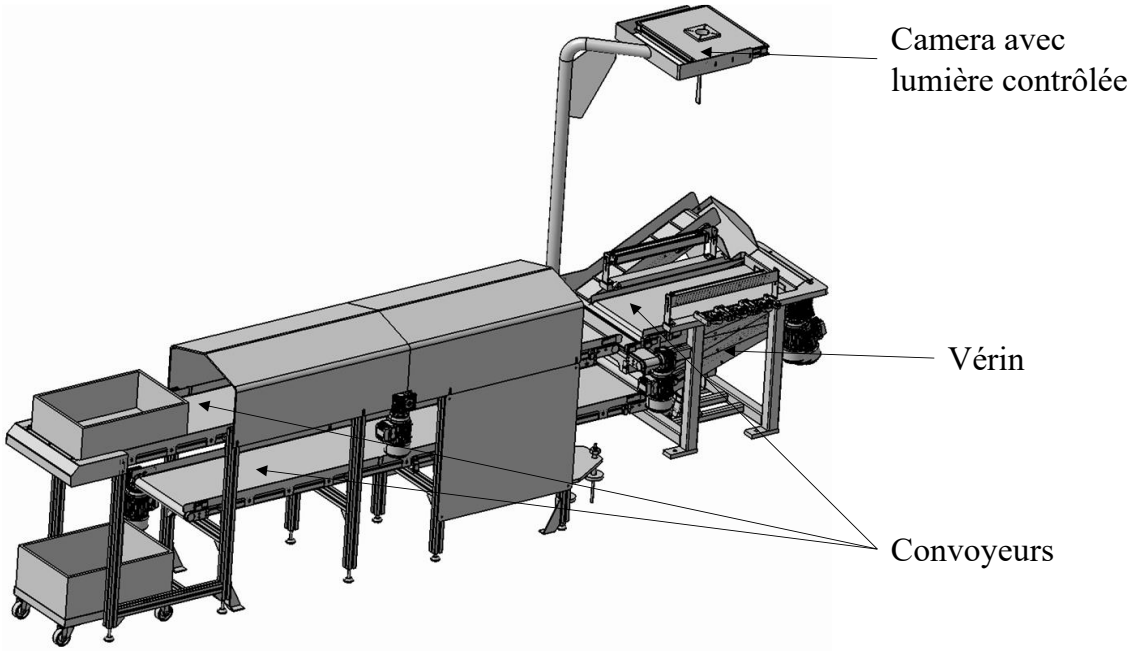


Figure 44. Ligne d'approvisionnement de LORMAC Automation

1.2. Protocole expérimental

L'utilisation d'EZID ayant été réalisée en fin de cycle de de conception, l'ensemble des objets intermédiaires était disponibles au début de l'expérimentation (cahier des charges client, modèles 3D, rapports d'observations, données des sous-systèmes).

La première étape a été d'ordonner chaque élément intermédiaire afin de les attribuer aux phases théoriques du processus de conception présenté dans le chapitre 2 (conceptuelle, architecturale, détaillée). Cette affectation a été réalisée en fonction du contenu de l'objet intermédiaire. Par exemple, les données capitalisées dans le cahier des charges fourni par le client contenaient non seulement des besoins fonctionnels mais également des propositions d'architecture, voire des solutions techniques comme l'utilisation de convoyeurs pour le déplacement des pièces. Ainsi, les spécifications des pièces à approvisionner ont été rattachées à la phase de conception conceptuelle, les propositions d'architecture à la conception

architecturale, les informations techniques sur certains composants à la phase de conception détaillée. Le tableau 12 récapitule cette répartition.

Tableau 12. Récapitulatif de la répartition des objets intermédiaires selon les phases de conception

Cahier des charges fonctionnel	Interactions souhaitées entre la machine et ses parties prenantes	Conception conceptuelle
	Types d'énergies disponibles	
	Capacité minimum requises pour la source d'énergie	
	Description et spécification de technologies à utiliser	
Spécifications des pièces	Toutes les caractéristiques liées aux pièces	
Visuels de solutions	Cinématiques des solutions proposées	Conception architecturale
	Sous-systèmes principaux	
	Positions globales des sous-systèmes	
	Energies contribuant au fonctionnement de la machine	
Modèle 3D	Toutes les caractéristiques de toutes les pièces de la machine	Conception détaillée

Une fois cette répartition réalisée, les données de conception sont prêtes à être exploitées par EZID. Cette application a été réalisée avec comme supports des logiciels de représentation graphique et des tableurs, sans automatisation des différents traitements (Dulché, 2015).

2. Application d'EZID

Comme cela est décrit dans le chapitre 3, l'utilisateur d'EZID doit choisir la phase de vie du produit qu'il souhaite analyser. Les documents fournis par LORMAC Automation étant principalement focalisés sur la phase de vie d'utilisation, c'est cette dernière qui a été étudiée en détail.

Le processus de conception n'étant pas complétement finalisé lors de la réalisation de cette analyse, les résultats présentés sont donc susceptibles de différer par rapport à la version finale de la machine du fait de modifications apportées lors de la mise au point.

2.1. Phase de vie : utilisation de la ligne d'approvisionnement

2.1.1. Conception conceptuelle

Le cahier des charges du client détaille le système dans lequel s'intègre la ligne d'approvisionnement, les différentes parties prenantes qui interagiront avec la machine et les exigences relatives aux besoins énergétiques.

Dans les spécifications des pièces à approvisionner, il apparait qu'il y a 14 types de pièces et que celles-ci sont conditionnées de deux manières différentes, soit en vrac, soit rangées dans des boites. Dans le premier cas, les pièces sont versées manuellement par l'opérateur en entrée de la ligne. Dans le second cas, la boite doit être ouverte puis approvisionnée à la machine. En sortie, les pièces bonnes sont saisies par un bras robotisé pour ensuite être transférées vers la ligne d'assemblage. Les pièces identifiées comme non-

conformes ainsi que les boites doivent être automatiquement dirigées vers l'opérateur pour être évacuées manuellement. Toutes ces pièces ainsi que leurs emballages doivent en conséquence être modélisés dans le MFS.

2.1.1.1. Etape 1 : Modélisation

Comme aucune description modulaire de la ligne d'approvisionnement n'est décrite dans le CdC, celle-ci est modélisée avec une seule frontière dans le MFS. Les autres éléments de l'environnement de la ligne décris dans le cahier des charges, dont l'opérateur, sont également modélisés avec des frontières propres, comme représenté sur la figure 45. Les échanges d'énergies représentés concernent la source d'énergie principale de la ligne et l'énergie mécanique (via un robot) apportée par la machine aux pièces pour leur transfert vers la ligne d'assemblage. L'opérateur échange également de l'énergie pour l'alimentation de la machine (en pièces en vrac ou boites de pièces) ainsi que pour l'évacuation (boites vides et pièces non conformes).

Conformément à l'automatisme de modélisation présenté dans la partie 1.2.1.2c du chapitre 3, les deux surfaces fonctionnelles Mm et Mf sont associées systématiquement aux frontières. Elles représentent respectivement les échanges potentiels d'énergies du fait de la pesanteur (risque de chute ou basculement du composant) et du fait d'un contact volontaire ou non entre l'opérateur et la machine avec un risque de blessure du fait de la forme du composant. La lettre présente dans chaque surface fonctionnelle défini le type d'énergie qu'elle échange (M : mécanique, E : électrique, T : thermique, V : vibration, Br : bruit, R : rayonnement, C : chimique/biologique, B : biomécanique/opérateur).

A ce stade, les liaisons sont toutes considérées comme conductrice du fait de l'absence d'informations disponibles à ce sujet dans le cahier des charges. Le MFS obtenus correspond ainsi aux limites de la machine telles que définies par le client.

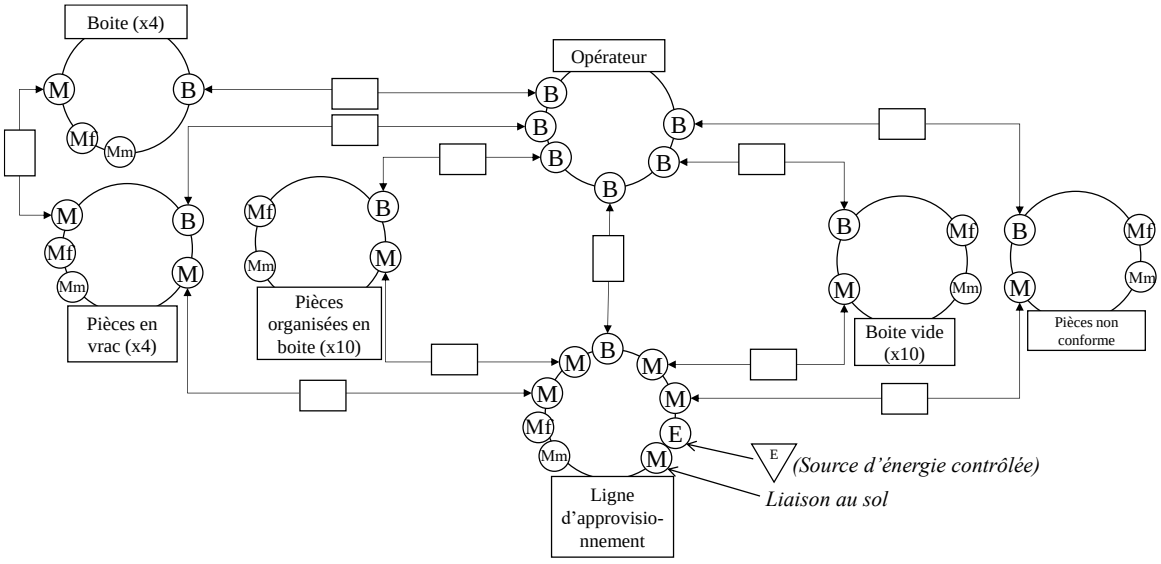


Figure 45. MFS de la ligne d'approvisionnement basé sur le cahier des charges et les spécifications des pièces (pour la phase de vie d'utilisation de la machine)

Dans ce MFS, 150 surfaces fonctionnelles sont représentées. Il y a donc a priori 150 phénomènes dangereux pertinents. Une fois cette modélisation réalisée, il est possible de commencer les étapes de traitement d'EZID.

2.1.1.2. Etape 2 : Identification des types de phénomènes dangereux par association

En se rapportant au tableau 8 du chapitre 3, il est possible d'identifier les phénomènes dangereux associés aux 150 surfaces fonctionnelles présentes dans le MFS.

a) Phénomènes dangereux liés aux énergies spécifiées par le client

Ces énergies sont celle relatives aux parties prenantes à savoir la source d'énergie principale électrique, l'énergie mécanique pour le déplacement des pièces/boites par la ligne, et l'énergie biomécanique pour l'alimentation/évacuation des pièces et l'interaction avec la ligne.

Comme représenté sur le tableau 13, les phénomènes dangereux correspondant à ces énergies sont :

- 1 phénomène dangereux électrique ;
- 59 phénomènes dangereux mécaniques ;
- 30 phénomènes dangereux liés au potentiel non-respect des principes ergonomiques lors de la manipulation des différentes pièces et/ou conditionnement.

Tableau 13. Identification des types de phénomènes dangereux

Effort généralisé (Eg)	Courant généralisé (Eg)	Puissance généralisée (Pg)	Type d'énergie échangée	Type de phénomène dangereux
Force (N) Couple (N.m) Pression (Pa) Contrainte élastique (Pa) Masse (kg) Champ magnétique (T)	Vitesse (m/s) Vitesse de rotation (rad/s) Flux volumique (m^3/s) Course élastique (m) Hauteur (m) Flux magnétique (Wb)		Cinétique Potentielle de pression Potentielle élastique Potentielle de pesanteur Potentielle magnétique	→ Mécanique
Accélération ($m.s^{-2}$)	Partie de l'opérateur en interaction avec la source d'énergie		Vibratoire	→ Engendrés par les vibrations
Pression accoustique (Pa)			Accoustique	→ Engendrés par le bruit
Tension (V) Capacité électrique (F) Electricité statique (V/m)	Intensité (A)		Electrique	→ Electrique
Température (K)	Flux entropique ($W.K^{-1}$)		Thermique	→ Thermique
		Groupe de la lampe	Rayonnement optique artificiel	
		Classe du laser	Rayonnement laser	
Induction magnétique (µT) Intensité du champ électrique (V/m)	Courant de contact Ic (mA) Courant induit dans les extrémités Il (mA) Intensité du champ magnétique (A/m)	Densité de puissance équivalente onde plane Seq (W/m^2)	Rayonnement magnétique	→ Engendrés par les rayonnements
Dose par unité d'incorporation. ($Sv.Bq^{-1}$)	Partie de l'opérateur en interaction avec la source d'énergie		Rayonnement ionisant	
		Niveau de danger	Chimique	
Concentration (mol/L)	Volume (L)	Classe des agents biologiques pathogènes/toxines, potentiel allergisant	Biologique	→ Engendrés par des matériaux et des produits
Force à fournir par l'opérateur (N)	Vitesse de l'opérateur ($m.s^{-1}$)		Biomécanique	→ Engendrés par le non-respect des principes ergonomiques

b) Phénomènes dangereux liés aux énergies implicites

Les énergies implicites sont celles associées aux surfaces fonctionnelles Mm et Mf qui sont par définition de type mécaniques. Elles créent en conséquence des phénomènes dangereux mécaniques au nombre de 60.

Cette identification des types de phénomènes dangereux étant réalisée, l'étape suivante d'EZID consiste à définir de façon plus précise les conséquences ou dommages potentiels qu'ils engendrent.

2.1.1.3. Etape 3 : Identification détaillée des conséquences

A ce stade de la conception, seules les pièces et leurs emballages sont complètement définis. Les surfaces fonctionnelles de ces éléments possèdent donc des paramètres complémentaires qui peuvent être exploités lors de ce traitement.

Ce sont essentiellement des paramètres liés aux matériaux et à la forme des pièces. Ces pièces ont toutes des géométries contondantes sans obstacle avec des surfaces lisses. Les matériaux utilisés sont des métaux ou des polymères solides, non friables et ne présentant pas de risques chimique ou biologique. En se basant sur les consignes de la partie 1.2.3 du chapitre 3 et sur les arbres des causes dont un extrait est présenté dans la figure 46, les conséquences associées aux phénomènes dangereux mécaniques de ces pièces sont :

- le choc pouvant être généré par l'énergie involontaire fournie par l'opérateur (surfaces fonctionnelles Mf) ou l'énergie potentielle de pesanteur (surfaces fonctionnelles Mm) pouvant entraîner la chute d'une pièce ;
- l'écrasement du fait de la chute d'une pièce au sol (surfaces fonctionnelles Mm).

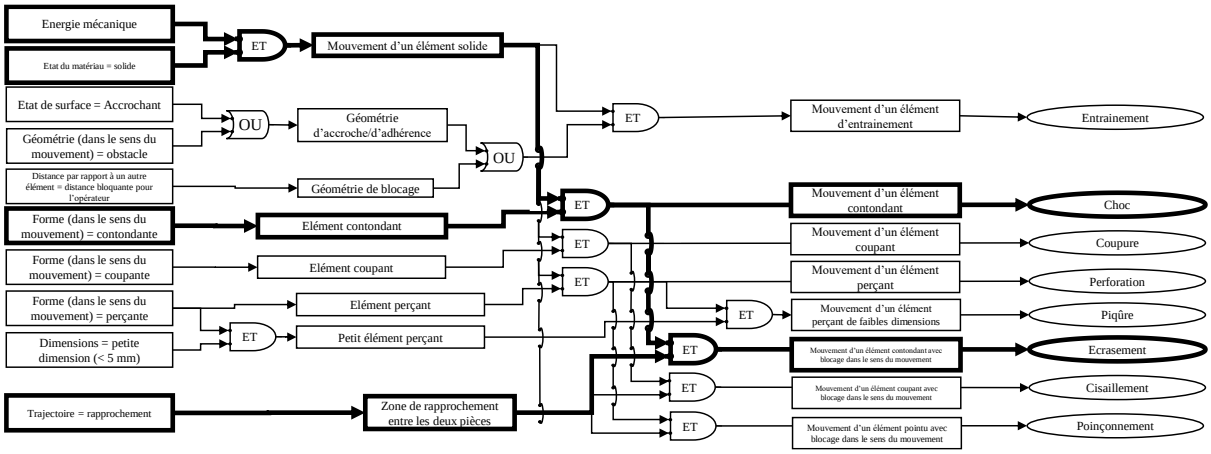


Figure 46. Extrait des arbres des causes

La ligne d'approvisionnement n'étant à ce stade pas encore définie il n'est pas possible de lui appliquer ce traitement du fait du manque de paramètres complémentaires. En conséquence, il peut déjà être précisé que sur les 150 phénomènes dangereux identifiés, 59

peuvent engendrer des conséquences de choc pouvant se transformer en écrasement pour 29 d'entre eux (liés aux boites et pièces).

Une fois ces informations obtenues, il possible de passer au troisième traitement d'EZID.

2.1.1.4. Etape 4 : Identification de l'aspect significatif et organisation

L'identification des phénomènes dangereux significatifs est réalisée en comparant les quantités d'énergie caractérisant les surfaces fonctionnelles avec les valeurs seuils présentées dans le tableau 11 du chapitre 3. Dans le MFS présenté en figure 45, seules l'alimentation électrique de la ligne et les masses des pièces et de leurs emballages ont une valeur caractérisant la quantité d'énergie échangée.

Les caractéristiques de l'alimentation électrique sont de 230-400 V avec une fréquence de 50-60 Hz. Comme rappelé par le tableau 14, la valeur seuil pour un courant alternatif étant de 12V, ce phénomène dangereux électrique doit être considéré comme significatif.

En ce qui concerne les potentiels risques liés au non respects des principes ergonomiques pour l'alimentation et l'évacuation des pièces et des boites, la masse des éléments à manipuler est inférieure à la valeur seuil de 15 kg ce qui pourrait permettre de considérer ce phénomène dangereux comme « pertinent ». Cependant, comme les distances de déplacement lors de ces manutentions ne peuvent être définies en l'absence d'architecture de la ligne, et que ces paramètres influent sur la valeur seuil, il n'est pas possible de valider cette classification. Ils sont en conséquence classés comme « pertinent-inconnu ».

Les phénomènes dangereux de type mécanique n'ayant pas de valeur seuil, tous sont classés comme significatifs.

Tableau 14. Utilisation du tableau 11

Phénomènes dangereux	Valeur seuil
Mécanique	Aucune
Engendrés par les vibrations	0,5 m/s² (ensemble du corps) 2,5m/s² (ensemble main-bras)
Engendrés par le bruit	80dB
Electrique	12V (AC), 30V (DC), 5 mA
Thermique	15°C (froid) - 43°C (chaud)
Engendrés par les rayonnements (optique artificiel)	Groupe de risque > 0
Engendrés par les rayonnements (laser)	Classe > 1
Engendrés par les rayonnements (électromagnétique)	Intensité du champ électrique > 61 V/m Intensité du champ magnétique > 0,16 A/m Induction magnétique > 0,2 µT Densité de puissance équivalente onde plane > 10W/m² Courant de contact > 1 mA Courant induit > 100mA
Engendrés par les rayonnements (ionisant)	Elément ionisant existant
Engendrés par des matériaux ou des produits (chimique)	Niveau de danger > 1
Engendrés par des matériaux ou des produits (biologique)	Groupe > 1 Pouvoir allergisant existant
Liés au non -respect des principes ergonomiques	Charge à manutentionner >15 kg

L'ensemble des résultats obtenus par l'application d'EZID aux données relatives à la phase de conception conceptuelle est présenté dans le tableau 15. Aucune hiérarchisation liée à la position des surfaces fonctionnelles n'est possible à ce stade.

Tableau 15. Résultats de l'application d'EZID sur le cahier des charges du client et les spécifications des pièces à approvisionner (pour la phase de vie d'utilisation de la machine)

Phénomènes dangereux	Pertinent	Pertinent-inconnu	Significatif	Conséquences
Mécanique	0	0	119	Choc, écrasement
Electrique	0	0	1	/
Liés au non-respect des principes ergonomique	0	30	0	/
Thermique	0	0	0	/
Engendrés par le bruit	0	0	0	/
Engendrés par les vibrations	0	0	0	/
Engendrés par les rayonnements	0	0	0	/
Engendrés par des matériaux ou des produits	0	0	0	/

2.1.1.5. Discussion sur l'application d'EZID en conception conceptuelle

Comme indiqué en début de ce chapitre, ce travail ayant été réalisé a posteriori. Il n'a donc pas été possible de retourner ces résultats aux concepteurs de la ligne pour les inciter à anticiper les phénomènes dangereux identifiés via l'application d'EZID.

Des spécifications relatives à la prévention des risques apparaissent cependant dans le cahier des charges du client. Elles concernent l'ensemble de la ligne et elles sont écrites de la manière suivante : « Cartérisation immatérielle à envisager » et « Respect Ergonomie ».

Bien que ce ne soit pas explicitement mentionné, la spécification de prévention « Cartérisation immatérielle » doit empêcher l'accès aux zones dangereuses de la ligne d'approvisionnement lorsque celle-ci est en fonctionnement. Comme illustré sur la figure 47, cette cartérisation peut être représentée par le concepteur dans le MFS par un élément agissant sur les flux d'énergies comme cela a été défini à la section 2.2.1 du chapitre 3.

La spécification « Respect Ergonomie » concerne les phénomènes dangereux liés au non-respect des principes ergonomiques qui ont été identifiés par EZID. Cette spécification peut se représenter dans le MFS de la figure 47 par les liaisons de type *conductrice adapté*e définie dans le chapitre 3.

L'application d'EZID a également mis en évidence des risques qui n'ont pas été envisagés à ce stade par le client ou le concepteur. Il s'agit des risques de chocs, voire d'écrasements du fait des phénomènes dangereux mécaniques liés aux pièces à approvisionner et à leurs emballages.

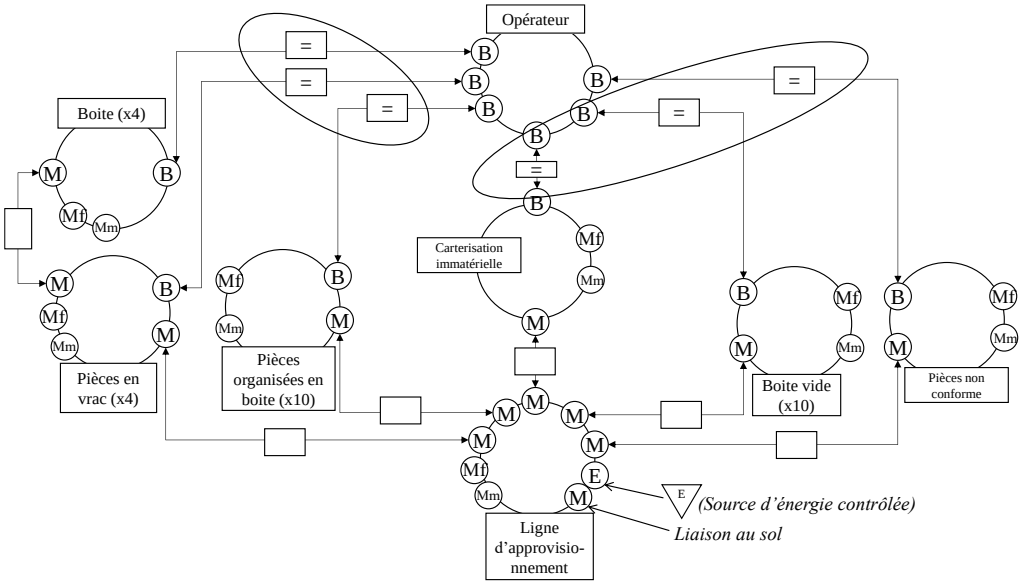


Figure 47. MFS de la ligne d'approvisionnement basé sur le cahier des charges et les spécifications des pièces avec les solutions de prévention (pour la phase de vie d'utilisation de la machine)

Les éléments intermédiaires rattachés à la phase de conception conceptuelle sont à présent tous traités. La partie suivante présente les résultats obtenus pour la phase de conception architecturale.

2.1.2. Conception architecturale

Trois architectures ou principes de solutions techniques ont été proposées par les concepteurs. Ces concepts sont tous constitués de convoyeurs, d'une structure et d'un système de vision avec un éclairage contrôlé. Il faut noter qu'il n'apparait aucune mesure de prévention dans ces trois propositions. Après discussion avec le client, une solution a été retenue moyennant quelques modifications. Il faut noter que nous avons eu peu d'informations formalisées sur cette phase de conception. La plupart des informations utilisées ont été extraites de la modélisation 3D finale qui était proche, d'un point de vue architecture, de l'avant-projet retenu, ce qui a permis de réaliser un MFS correspondant à cette phase.

2.1.2.1. Etape 1 : Modélisation

Le visuel de l'architecture choisie fournie de nombreuses informations sur les éléments constituant la ligne d'approvisionnement. La frontière unique représentant la machine dans la phase de conception précédente, modélisée en figure 47, doit évoluer et se décomposer afin de modéliser tous ces éléments. Pour cela, il a été nécessaire de mettre en œuvre les opérateurs, règles et automatismes de modélisation définis dans le chapitre 3.

La quantité d'éléments à modéliser augmentant fortement durant cette phase de conception, seul le MFS relatif aux pièces conditionnées en vrac est présenté dans cette partie. Ce cas a été choisi car il est le plus complexe à modéliser vis-à-vis des flux d'énergies. Le MFS pour les pièces rangées dans des boites figure en annexe 6. Les résultats donnés dans cette partie concernent l'ensemble des MFS.

Afin de clarifier le MFS, les liaisons reliant structure de la machine à l'ensemble des sous-systèmes ne sont pas représentées. Il s'agit de liaisons rigides qui échangent de l'énergie mécanique afin de garantir la stabilité de l'ensemble. La structure apparait donc comme un élément isolé et les surfaces fonctionnelles concernées des sous-systèmes sont non-renseignées pour faciliter leur repérage. Ces éléments sont modélisés sur la figure 48.

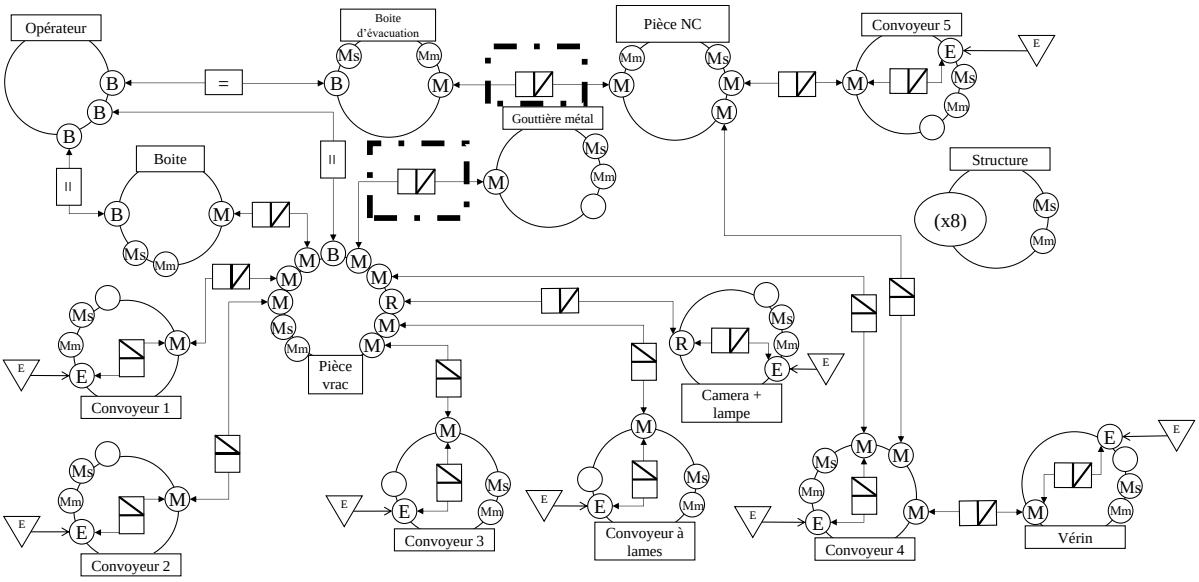


Figure 48. MFS de la ligne d'approvisionnement basé sur le visuel de la solution (pour la phase de vie d'utilisation de la machine)

Le premier opérateur de modélisation utilisé pour faire ce MFS est la décomposition en série d'une liaison ou d'une association interne. Il a été appliqué à la frontière « ligne d'approvisionnement » de la figure 47 afin de faire apparaitre ses sous-systèmes, surfaces fonctionnelles, les liaisons et associations internes. Le MFS de la figure 48 ainsi obtenu fait apparaitre de nouvelles surfaces fonctionnelles avec de nouveaux types d'énergies (ex. : le système d'éclairage du module de reconnaissance des pièces génère du rayonnement lumineux).

Les échanges d'énergies entre les pièces en vrac et les convoyeurs sont nécessairement des liaisons semi-conductrices car aucun système d'accrochage n'est défini entre ces deux éléments. En accord avec l'automatisme proposé pour la transformation de ces liaisons en liaisons conductrices, trois surfaces fonctionnelles doivent être ajoutées à chaque couple de frontière (convoyeur et pièces) afin de représenter les dissipations thermique, acoustique et vibratoire potentielles de ces liaisons.

Un des principes retenus sur cette ligne est de faire circuler les produits par gravité via une gouttière métallique. Si sur la figure 48 cette liaison est semi-conductrice (encadré en mixte), elle correspond en réalité à une technique de liaison définie dans le chapitre 3 et modélisée dans l'annexe 3 (liaison par choc). Il est donc possible d'utiliser le modèle générique de cette liaison pour représenter directement la liaison conductrice et ses dissipations (bruit).

Cette liaison par choc est également utilisée pour amener les pièces non-conformes dans la boite d'évacuation.

Ces évolutions doivent être suivies au cours de la modélisation. Ainsi, la surface fonctionnelle échangeant de l'énergie électrique modélisée sur le MFS de la figure 47 est parent de l'ensemble des surfaces fonctionnelles échangeant de l'énergie électrique dans le MFS de la figure 48. Ce constat est le même pour les surfaces fonctionnelles liées à la masse et au contact involontaire entre l'opérateur et la machine qui sont parents de toutes les surfaces fonctionnelles similaires des sous-systèmes de la machine.

Le MFS correspondant à cette phase de conception architecturale permet d'identifier 374 surfaces fonctionnelles qui génèrent autant de phénomènes dangereux. Une fois cette modélisation terminée, il est possible de réaliser la première étape de traitement d'EZID.

2.1.2.2. Etape 2 : Identification des types de phénomènes dangereux

En suivant la même démarche que celle suivie dans la partie 2.1.1.2, l'identification des types de phénomènes dangereux donne comme résultats :

- 206 phénomènes dangereux mécaniques ;
- 30 phénomènes dangereux liés au potentiel non-respect des principes ergonomiques ;
- 8 phénomènes dangereux électriques ;
- 37 phénomènes dangereux thermiques ;
- 39 phénomènes dangereux liés au bruit ;
- 39 phénomènes dangereux engendrés par les vibrations ;
- 15 par les rayonnements.

Il apparait que les énergies mécaniques sont toujours largement plus présentes que les autres types de phénomènes dangereux. Ceci est lié d'une part à la fonction de la machine qui est essentiellement mécanique et d'autre part au fait que les deux surfaces fonctionnelles Mm et Mf apparaissent systématiquement sur chaque composant. Les flux d'énergies électrique se multiplient également car plusieurs sous-systèmes exploitent cette énergie.

Les phénomènes dangereux liés au potentiel non-respect des principes ergonomiques sont inchangés par rapport à la phase de conception conceptuelle. Ils concernent en effet les interactions entre l'opérateur les autres éléments extérieurs à la ligne. Ils ne sont donc pas affectés par la décomposition interne de cette dernière.

Les dissipations des différents échanges d'énergies (convoyeurs-pièces, pièce-gouttière, pièce NC-boite sur roulette) peuvent générer de l'énergie thermique, acoustique et/ou vibratoire. Enfin, le système d'éclairage du système de vision génère de par sa fonction des rayonnements optiques

Comme cela a été le cas pour les surfaces fonctionnelles, les phénomènes dangereux identifiés dans cette section sont liés à ceux identifiés dans la section 2.1.1.2.

2.1.2.3. Etape 3 : Identification détaillée des conséquences

Au fur et à mesure de la conception, la définition des surfaces fonctionnelles est de plus en plus précise, permettant ainsi d'appliquer de plus en plus les règles d'identification proposées dans le chapitre 3. Dans l'architecture retenue, des informations sur la position des différents sous-systèmes, leur cinématique ainsi que certaines caractéristiques intrinsèques ont été définies par le concepteur. Les conséquences de certains des phénomènes dangereux précédemment identifiés peuvent donc être précisées.

Aucune information n'est disponible à ce stade sur la forme (contondantes, tranchante, etc.) des sous-systèmes de la ligne d'approvisionnement. Il n'est donc pas possible de définir plus précisément une conséquence en cas de contact avec l'opérateur. En ce qui concerne la masse des éléments, même si elle n'est pas encore connue, les conséquences potentielles sont, des chocs, voire des écrasements (idem section 2.1.1.3).

L'architecture retenue est basée sur l'agencement de plusieurs convoyeurs à bande. Leur fonctionnement consiste à entrainer les pièces d'un point à un autre en mettant en jeu deux flux d'énergies: le poids des pièces et la force des convoyeurs transmise par friction. Pour transmettre cette dernière, l'interface de transmission doit avoir un état de surface adhérant/accrochant, ce qui représente un paramètre complémentaire des surfaces fonctionnelles concernées. En utilisant les combinaisons logiques définies à la section 1.2.3 du chapitre 3 dont un extrait est représenté en figure 49, les phénomènes dangereux associés à l'énergie cinétique produite par les convoyeurs pour déplacer les pièces se précisent en phénomènes dangereux mécanique d'entrainement.

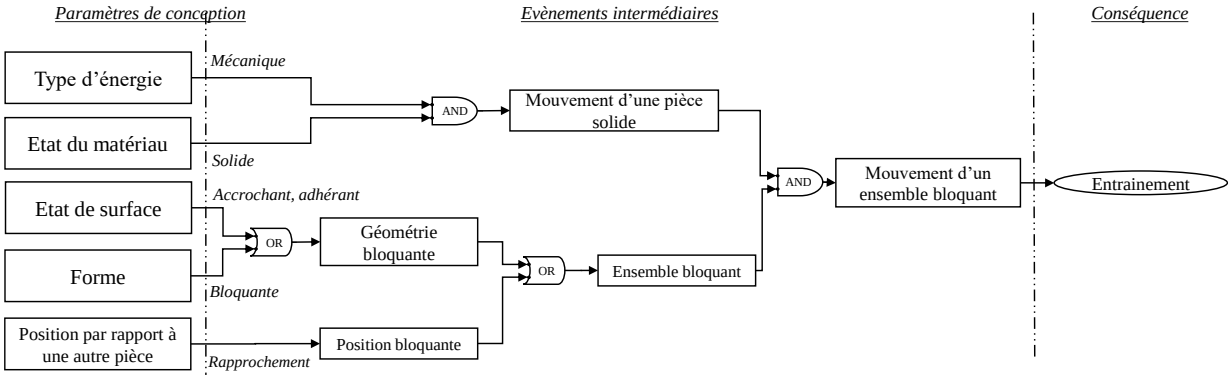


Figure 49. Extrait de l'arbre des causes

Par ailleurs, la solution retenue place des convoyeurs en série qui dans certaines configurations peuvent avoir des sens de rotations opposés. Dans ce cas, en fonction de la distance entre ces convoyeurs, les flux d'énergies mécanique pour le transport des pièces génèrent également un risque d'entrainement. Les structures des convoyeurs pouvant générées

des conséquences de choc (par chute ou lors d'un contact involontaire provoqué par l'opérateur).

La solution proposée intègre également un convoyeur escamotable actionné par un vérin. Le phénomène dangereux mécanique lié au mouvement de ce convoyeur crée une conséquence supplémentaire de choc, voire d'écrasement.

Une fois les détails des phénomènes dangereux obtenus, il est à présent possible de les classer selon qu'ils sont significatifs ou non.

2.1.2.4. Etape 4 : Identification de l'aspect significatif et organisation

Les phénomènes dangereux mécaniques identifiés sont par principe tous considérés comme « significatifs ». Les huit phénomènes dangereux électriques (alimentation des convoyeurs, vérin, caméra avec lumière contrôlée) sont également classés comme « significatifs » tous utilisent la source d'énergie électrique définie en 2.1.1.4.

En ce qui concerne les phénomènes dangereux liés au non respects des principes ergonomiques, bien que l'architecture donne des informations complémentaires sur les distances de déplacement pour l'alimentation et l'évacuation des pièces, elles ne sont pas suffisantes pour modifier le classement initial de « pertinents-inconnus ».

Les phénomènes dangereux thermiques, engendrés par le bruit et les vibrations sont considérés comme « pertinents-inconnus » car aucune information concernant leurs niveaux d'énergies n'est disponible. Les phénomènes dangereux liés au rayonnement lumineux sont classés comme « pertinents » car l'éclairage utilisé dans l'ensemble caméra + éclairage contrôlé car le niveau d'énergie fourni par les DELs est équivalent à celui de la lumière naturel.

Le tableau 16 répertorie les résultats d'EZID pour cette phase de conception. Le système devenant de plus en plus complexe et le nombre de phénomènes dangereux étant de plus en plus importants, ces résultats sont présentés de manière simplifiée.

Tableau 16. Résultats de l'application d'EZID sur le visuel de la solution à concevoir (pour la phase de vie d'utilisation de la machine)

Phénomènes dangereux	Pertinent	Pertinent-inconnu	Significatif	Conséquences
Mécanique	0	0	206	Choc, écrasement, entrainement
Electrique	0	0	8	/
Liés au non-respect des principes ergonomique	0	30	0	/
Thermique	0	37	0	/
Engendrés par le bruit	0	39	0	/
Engendrés par les vibrations	0	39	0	/
Engendrés par les rayonnements	15	0	0	/
Engendrés par des matériaux ou des produits	0	0	0	/

L'identification des phénomènes dangereux pour cet élément intermédiaire est terminée. EZID a ensuite été appliquée à la modélisation finale de la ligne.

2.1.3. Conception détaillée

Le modèle CAO 3D est l'objet intermédiaire rattaché à cette phase de conception du fait de la précision des informations qu'il contient vis-à-vis des composants et de leurs caractéristiques. C'est le dernier élément intermédiaire fourni par LORMAC Automation sur lequel EZID a pu être appliqué.

2.1.3.1. Etape 1 : Modélisation

Durant les deux précédentes phases de conception, le MFS de la machine est passé d'une frontière unique représentant l'ensemble de la machine à un ensemble de plusieurs frontières interconnectées correspondant aux différents sous-systèmes.

Cette décomposition se poursuit dans la phase de conception détaillée afin de représenter chacune des pièces de chaque sous-système. Le MFS a évolué en conséquence en utilisant de nouveau l'opérateur de décomposition en série d'une liaison ou d'une association interne.

Pour illustrer cette décomposition sans alourdir la lecture, la modélisation sera focalisée sur un des convoyeurs de cette ligne schématisé figure 50. Les MFS complets de cette phase de conception détaillée se trouvent dans l'annexe 6.

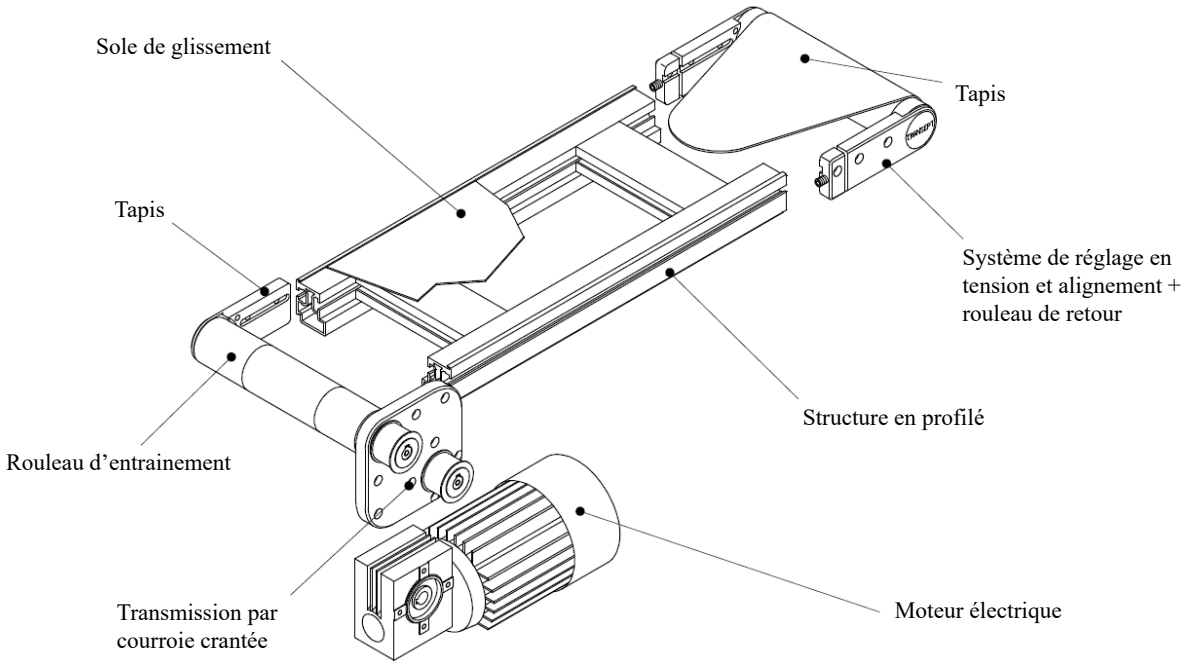


Figure 50. Représentation du convoyeur électrique (Arcane, 2016)

Le convoyeur est composé d'un moteur électrique, d'un système de transmission par courroie, de rouleaux, d'un tapis et d'éléments structurel (sole de glissement, système de

réglage en tension et alignement et structure en profilé) qui seront regroupés dans le sous-système « structure ». Le modèle MFS est représenté figure 51.

Le flux d'énergie principal vient de l'alimentation électrique externe connectée sur le moteur électrique qui se transforme ensuite en énergie mécanique. Celle-ci est ensuite transmise au rouleau 1 par l'intermédiaire de la courroie, mettant en mouvement le tapis et en conséquence le rouleau 2. Tous ces éléments (excepté la courroie) sont supportés par la structure qui unit l'ensemble du convoyeur (liaison rigide qui transmet de l'énergie mécanique afin de garantir la stabilité de l'ensemble). Les liaisons par frottement du système (rouleau-tapis et courroie-élément) sont considérées comme parfaites dans cet exemple.

Afin d'alléger la représentation les mêmes règles de simplifications qu'au chapitre précédent ont été appliquées (non représentation des liaisons entre le structure et les sous-systèmes.

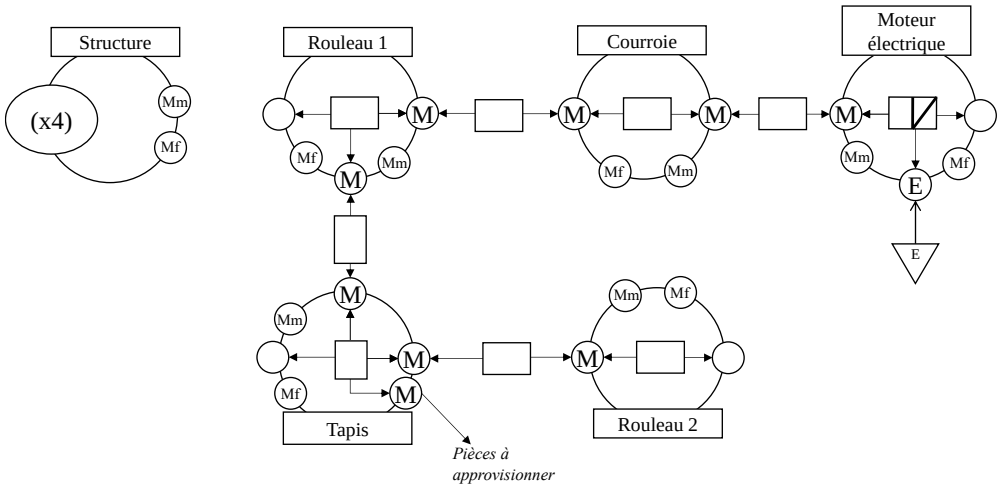


Figure 51. MFS du convoyeur électrique

Dans ce modèle coexistent des pièces élémentaires (ex. : tapis, courroie, rouleau) et des sous-systèmes (ex. : moteur électrique, structure).

Il serait possible de poursuivre la décomposition du moteur comme illustré par la figure 52. Même si elle fait apparaitre l'énergie électromagnétique (EM), un tel niveau de détail sur ce cas précis n'est cependant pas utile car il s'agit d'un système commercial non modifiable. Cela montre également l'intérêt d'utiliser les modèles génériques définit en annexe 3 qui intègre pas défaut toutes les énergies présentes.

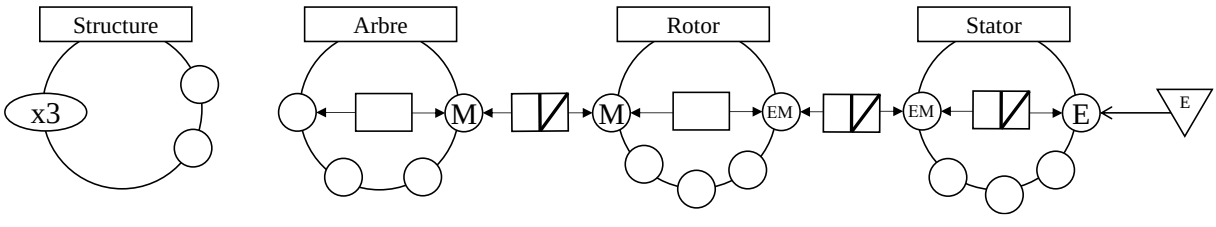


Figure 52. MFS détaillé du moteur électrique

Au final, 583 surfaces fonctionnelles ont été représentées dans les MFS correspondant à la phase de conception détaillée. La grande quantité de surfaces fonctionnelles est encore une fois due à la multiplication des frontières et par conséquent, des surfaces fonctionnelles modélisées automatiquement (masse, forme), mais également à l'ajout de capteurs de position photoélectriques envoyant un rayonnement sur les pièces et les boites. Les types des phénomènes dangereux associés à ces surfaces sont identifiés dans la section suivante à partir des paramètres extraits du modèle CAO 3D et des fiches techniques des sous-systèmes.

2.1.3.2. Etape 2 : Identification des types de phénomènes dangereux

Les types d'énergies, et donc les phénomènes dangereux associés, sont identiques à ceux identifiés lors de la phase de conception architecturale. Il n'y a en effet pas eu de modification au niveau des choix techniques entre ces 2 phases.

Certains des phénomènes dangereux précédemment identifiés se sont multipliés. C'est notamment le cas pour les phénomènes dangereux électriques du fait de l'apparition de nombreux capteurs nécessaires à l'automatisation de la ligne (cellules photoélectriques, fins de courses, etc.). Les cellules photoélectriques apportent également des phénomènes dangereux engendrés par les rayonnements.

Le traitement d'identification des types de phénomènes dangereux appliqué aux 583 surfaces fonctionnelles donne comme résultats :

- 327 phénomènes dangereux mécaniques ;
- 30 phénomènes dangereux liés au non-respect des principes ergonomiques ;
- 14 phénomènes dangereux électriques ;
- 97 phénomènes dangereux engendrés par les rayonnements ;
- 39 phénomènes dangereux engendrés par le bruit ;
- 37 phénomènes dangereux thermiques ;
- 39 phénomènes dangereux engendrés par les vibrations.

2.1.3.3. Etape 3 : Identification détaillée des conséquences

En étudiant les paramètres complémentaires contenus dans les surfaces fonctionnelles et en utilisant les combinaisons logiques, les conséquences de certains des phénomènes dangereux peuvent être précisées. L'application de ce traitement au convoyeur pris comme exemple est illustrée sur le moteur électrique et le rouleau 1 (le reste des MFS des autres composants sont capitalisés en annexe 6). Les résultats concernent cependant toute la ligne.

La figure 53 représente le MFS du moteur électrique complété de ses paramètres complémentaires. Comme illustré sur cette figure, la forme du moteur peut être par endroit contondante, et coupante à d'autres (ailettes de refroidissement). Les surfaces fonctionnelles Mf et Mm contiennent donc ces différents paramètres de forme car elles concernent l'ensemble

du moteur. Dans le cas de la surface fonctionnelle transmettant l'énergie mécanique à la courroie, seule une surface contondante est définie pour la liaison par obstacle (courroie crantée). Les surfaces extérieures du moteur ont toutes reçues une finition supprimant les bavures et autres irrégularités de fabrication. Son état de surface général est donc lisse.

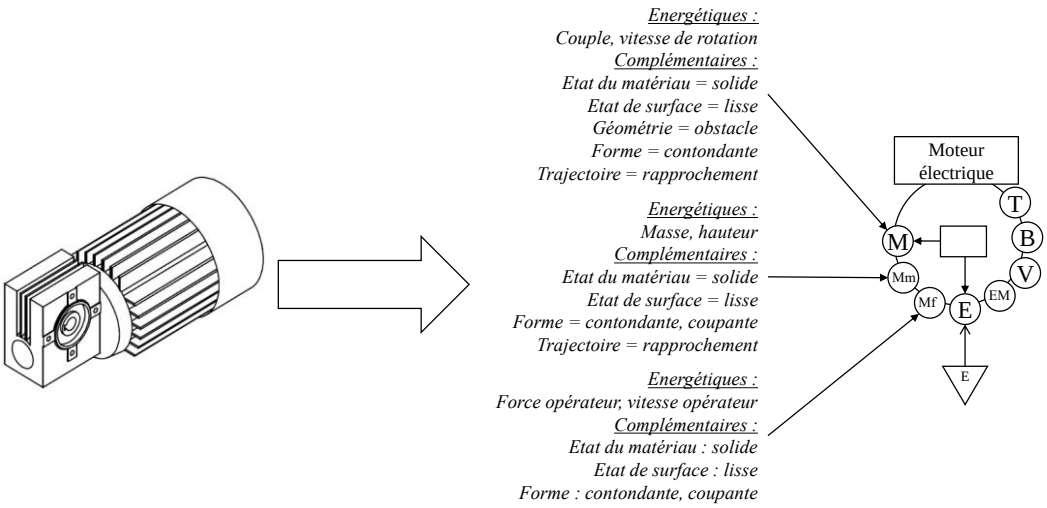


Figure 53. Paramètres complémentaires du moteur électrique

Les conséquences identifiées pour ces trois surfaces fonctionnelles sont :

- La surface fonctionnelle fournissant l'énergie mécanique à la courroie peut créer une conséquence d'entrainement (énergie = mécanique ET état = solide ET trajectoire = zone de rapprochement) pouvant être aggravé en écrasement (position = proximité du sol ET trajectoire = zone de rapprochement) comme représenté sur la figure 54;
- La surface fonctionnelle liée à la masse génère potentiellement des conséquences de choc (énergie = mécanique ET état = solide ET forme = contondante) mais aussi de coupure du fait que la forme peut également être coupante (énergie = mécanique ET état = solide ET forme = coupante). Elle peut également entrainer un risque d'écrasement/cisaillement (trajectoire = rapprochement) ;
- La surface fonctionnelle liée à l'énergie involontaire fournie par l'opérateur apporte également des conséquences de choc et de coupure.

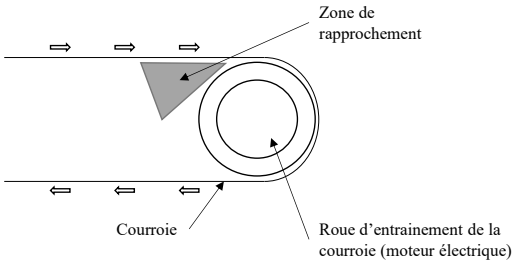


Figure 54. Illustration de la zone de blocage entre la roue d'entrainement et la courroie

Le rouleau 1 représenté en figure 55 est mis en mouvement par la courroie et transmet cette énergie au tapis en étant supporté par la structure. Les paramètres décrivant les deux surfaces fonctionnelles liées aux liaisons rouleau/courroie et rouleau/tapis génèrent des conséquences d'entrainement.

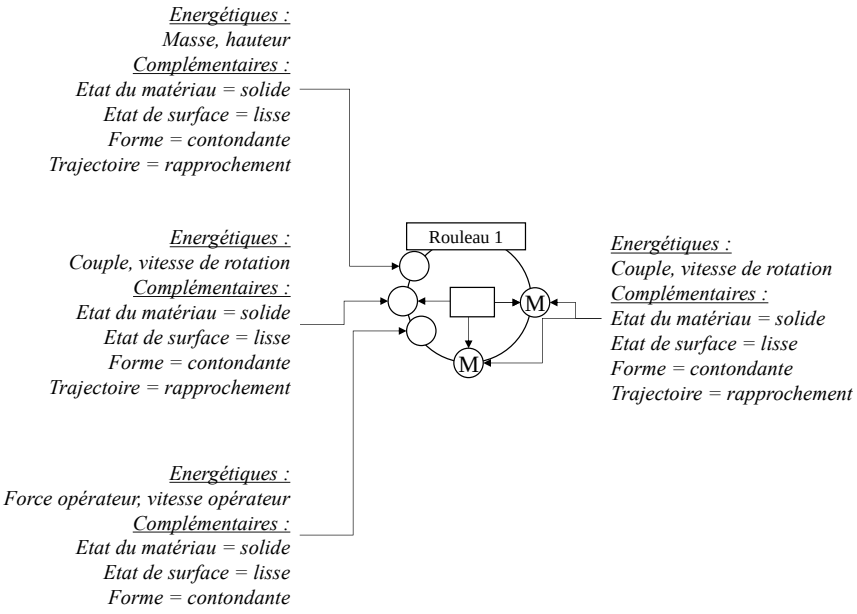


Figure 55. Paramètres complémentaires du rouleau 1

2.1.3.4. Etape 4 : Identification de l'aspect significatif et organisation

De même que lors de la phase de conception architecturale, les phénomènes dangereux mécaniques et les phénomènes dangereux électriques liés aux moteur/vérin/caméra avec lumière contrôlée sont toujours considérés comme « significatifs ».

Les phénomènes dangereux engendrés par le bruit de la chute des pièces métalliques sur la gouttière métallique et dans la boite d'évacuation des rebuts sont considérés comme « pertinents-inconnus » du fait de l'absence de paramètres énergétiques.

Malgré le niveau de détails avancé de la modélisation 3D, celle-ci n'inclue toujours pas d'informations complémentaires sur la manutention des pièces et des boites. Les phénomènes dangereux liés au non-respect des principes ergonomiques restent donc « pertinents-inconnus ».

Enfin, les valeurs caractérisant les échanges d'énergies liés aux phénomènes dangereux thermiques, électriques (pour les cellules photoélectriques), engendrés par les vibrations, les rayonnements et le bruit (autres que la chute d'éléments) sont en dessous des valeurs seuils réglementaires. Ils sont donc considérés comme pertinents. Le tableau 17 contient l'ensemble des résultats (en version abrégée) obtenus par l'application d'EZID lors de la phase de conception détaillée.

Tableau 17. Résultats de l'identification des phénomènes dangereux durant la phase de conception détaillée (pour la phase de vie d'utilisation de la machine)

Phénomènes dangereux	Pertinent	Pertinent-inconnu	Significatif	Conséquences
Mécanique	0	0	327	Choc, écrasement, entrainement, coupure, cisaillement
Electrique	6	0	8	/
Liés au non-respect des principes ergonomique	0	30	0	/
Thermique	37	0	0	/
Engendrés par le bruit	35	4	0	/
Engendrés par les vibrations	35	4	0	/
Engendrés par les rayonnements	97	0	0	/
Engendrés par des matériaux ou des produits	0	0	0	/

2.1.3.5. Actions du concepteur

Les sous-systèmes de cette ligne d'approvisionnement sont majoritairement des composants du commerce a priori conformes aux réglementations. Ils intègrent donc des moyens de prévention vis-à-vis des phénomènes dangereux qu'ils produisent.

Ainsi, une partie des phénomènes dangereux liés aux convoyeurs, aux équipements électriques ainsi qu'au vérin bénéficient de solutions de prévention définies par leurs concepteurs respectifs (casse des angles vifs, ailettes pour le refroidissement du moteur, carter de protection, etc.). Le concepteur de la ligne a dans ce cas plus un rôle d'intégrateur de composants existants considérés individuellement comme sûrs. Il doit cependant veiller à ne pas créer d'autres phénomènes dangereux du fait du positionnement et des interactions entre ces éléments. Dans le cas contraire, il doit prévoir les moyens de protection.

Des mesures de prévention apparaissent sur la modélisation 3D vis-à-vis des phénomènes dangereux mécaniques. Une grande partie de la ligne est cartérisée afin de limiter les accès. Toutes les zones entre deux convoyeurs consécutifs sont couvertes par une tôle métallique permettant le passage des pièces tout en empêchant l'accès à l'utilisateur. Les éléments de fixations des différents composants et sous-systèmes préviennent les risques de chutes ou de basculement (l'énergie potentielle de pesanteur ne peut donc pas se libérer). Enfin, tous les angles vifs ont été supprimés sur les différentes parties de la ligne

Les phénomènes dangereux ergonomiques ne sont toujours pas prévenus dans le prototype. Le concepteur n'a réalisé aucune modification sur la manière dont l'opérateur va interagir avec la machine et n'a ajouté aucun équipement supplémentaire pour l'assister dans sa tâche.

En ce qui concerne les phénomènes dangereux engendrés par le bruit de la chute des pièces, ce n'est qu'à partir des essais sur le prototype que les concepteurs ont constaté que le niveau de bruit était gênant pour les opérateurs. Ils ont donc tenté d'ajouter des éléments d'amortissement (membranes en plastique souple) sur la gouttière métallique pour absorber les impacts créés par la chute.

Trois moteurs électriques appartenant à trois convoyeurs sont toujours situés sur la trajectoire de déplacement des utilisateurs de la machine. En conséquence, un opérateur peut entrer en contact involontairement avec le moteur, recevoir de l'énergie par résultante et se blesser. Ceci est particulièrement vrai durant la phase d'apprentissage et dans certaines conditions de travail pouvant détourner l'attention normale de l'opérateur. Cet aspect a été également remonté par le client.

Le tableau 18 montre les résultats finaux d'EZID sur le prototype.

Tableau 18. Résultats finaux d'EZID

Phénomènes dangereux	Pertinent	Pertinent-inconnu	Significatif	Conséquences
Mécanique	324	0	3	Choc, écrasement, entrainement, coupure, cisaillement
Electrique	6	0	8	/
Liés au non-respect des principes ergonomique	0	30	0	/
Thermique	37	0	0	/
Engendrés par le bruit	35	4	0	/
Engendrés par les vibrations	35	4	0	/
Engendrés par les rayonnements	97	0	0	/
Engendrés par des matériaux ou des produits	0	0	0	/

L'application d'EZID sur la phase de vie d'utilisation de la machine est complète. La section suivante présente de façon synthétique l'analyse d'autres phases de vie (montage, stockage et transport).

2.2. Autres phases de vie étudiée

L'objectif de ces analyses est essentiellement de montrer qu'EZID permet bien de mettre en évidence d'autres phénomènes dangereux que ceux de la phase « utilisation ». Il faut noter que ces phases de vie étaient peu ou pas documentées au moment de notre intervention. Les données exploitées sont donc en partie extrapolées à partir des échanges que nous avons eus avec les concepteurs.

2.2.1. Phase de montage

Pour la phase de montage, il a été considéré que celui-ci était réalisé manuellement. Tout au long cette phase, l'utilisateur interagit sur deux éléments pour en obtenir un nouveau

ayant ses propres surfaces fonctionnelles. Ce processus est répété jusqu'à que l'ensemble des éléments de la machine soient assemblés. La principale source d'énergie dans ce cas est l'énergie biomécanique utile de l'opérateur. On retrouve également les deux sources d'énergies affectées par défaut à tout composant et qui se traduisent par les surfaces fonctionnelles Mf et Mm.

La figure 56 montre deux exemples de MFS pour cette phase de vie. La version complète est présentée en annexe 6. N'ayant aucune précision, sur d'éventuels outils utilisés, que ce soit pour le montage ou la manutention des composants, ils ne sont donc pas représentés sur ces MFS. La présence dans le modèle des surfaces fonctionnelles liés à l'énergie biomécanique et des liaisons « conductrices-adaptées » vont permettre d'interroger le concepteur sur le respect des principes ergonomiques.

De même, les deux surfaces fonctionnelles Mf et Mm vont amener les concepteurs à penser à la stabilité des pièces lors du montage et aux risques potentiels en cas de présence d'arêtes vives sur ces pièces.

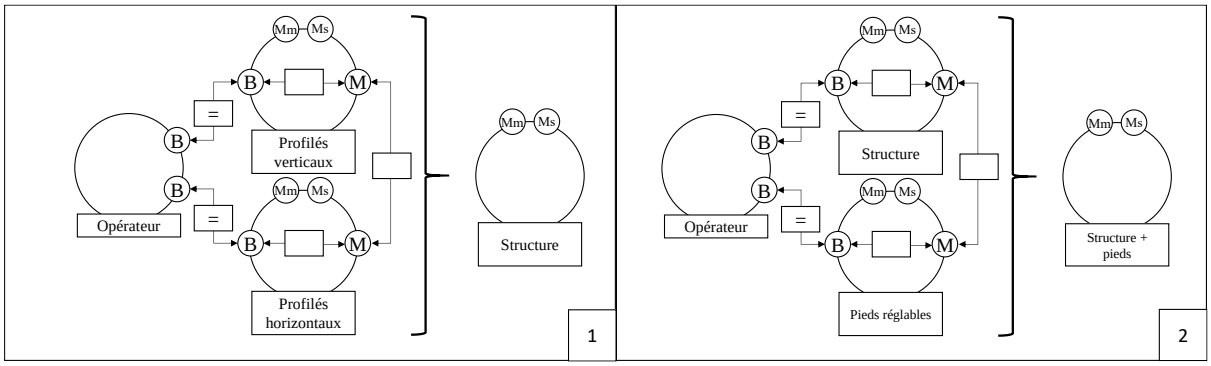


Figure 56. Phase de montage (Dulché, 2015)

2.2.2. Phase de stockage et de transport

Comme pour la phase d'assemblage, les phases de stockage et de transport de la machine sont des phases où la machine est totalement inerte.

La ligne a été conçue de façon à être séparée en trois modules indépendants pour la phase de transport : le système d'approvisionnement, le système de recirculation et le système d'identification. La figure 57 représente le MFS correspondant. Il se limite à trois frontières indépendantes représentant les trois sous-ensembles.

Chaque frontière présente 3 surfaces fonctionnelles, les deux surfaces Mf et Mm affectées par défaut qui génèrent des risques mécaniques avec des conséquences de choc ou d'écrasement et une surface qui représente l'énergie biomécanique nécessaire à la manutention de ces sous-ensembles. Tous sont identifiés comme étant significatifs.

Comme pour la phase de montage, EZID permet d'alerter le concepteur sur la nécessité de prévoir des moyens de manutentions, la stabilité de ces sous-ensembles et leur forme externe.

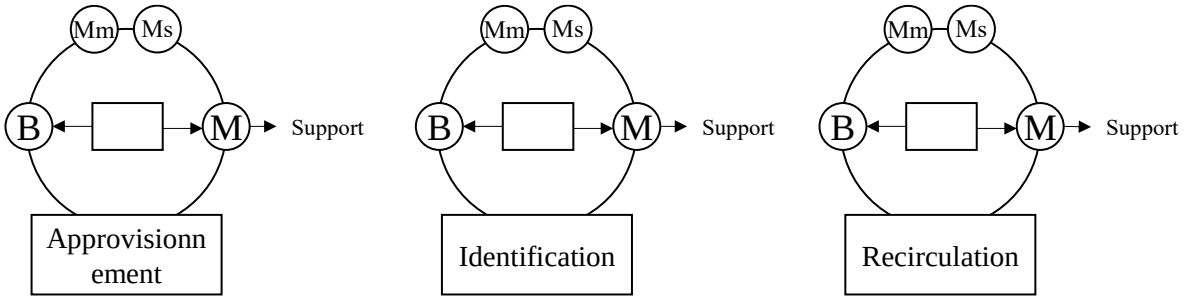


Figure 57. MFS des trois modules de la ligne en phase de stockage (Dulché, 2015)

3. Conclusion sur l'application d'EZID

L'application d'EZID sur des données issues d'un projet industriel a effectivement permis de montrer l'intérêt de l'analyse des flux d'énergies pour identifier des phénomènes dangereux de différentes natures (mécaniques, électriques, ergonomiques, rayonnements, bruit) dans les différentes phases du processus de conception.

Elle a aussi confirmé que cette identification pouvait être réalisée à partir des éléments intermédiaires disponibles au début de la conception. Il a par exemple été possible d'identifier des phénomènes dangereux liés au potentiel non-respect des principes ergonomiques pour l'alimentation et l'évacuation des produits à partir des données du cahier des charges.

L'aspect dynamique d'EZID a également été vérifié avec la persistance tout au long du processus de conception des phénomènes dangereux identifiés et non traités, l'apparition de nouveaux phénomènes dangereux du fait du positionnement de certains composants (risque de chocs du fait du départ des moteurs des tapis par exemple) ou du choix de certaines solutions techniques (chute des pièces en vrac sur une goulotte métallique) ou lors de leur implantation (risque de choix du fait du départ des moteurs des tapis par exemple). Ce principe est en effet reconnu comme une source de bruit (Arcane, 2016) et il est de ce fait intégré dans la base de données des éléments génériques. Il a de plus été montré qu'EZID permet également d'intégrer les solutions de prévention proposées par le concepteur dans la modélisation MFS en les mettant en lien avec les phénomènes dangereux identifiés. Enfin, même si les phases de vie d'assemblage et de transport étaient peu documentées, leur analyse avec EZID a permis d'identifier des phénomènes dangereux spécifiques différents de ceux de la phase d'utilisation.

Comme cette application a été faite a posteriori du processus de conception, il a été impossible de vérifier si les informations retournées auraient permis de modifier les choix techniques des concepteurs. L'application manuelle d'EZID, s'est également révélée assez fastidieuse du fait :

- de la nécessité de reprendre tous les éléments intermédiaires (cahier des charges, documentations techniques, plans CAO, etc.) afin d'en extraire les données pour réaliser le MFS et les traitements proposés.
- de la multiplication des éléments au fur et à mesure de l'avancée du processus de conception et donc de la grande quantité de paramètres à gérer.
- de la difficulté de gérer le cas des pièces qui se déplacent successivement sur différents supports. En effet, comme les surfaces fonctionnelles ne peuvent recevoir qu'un flux d'énergie, il faut créer autant de surfaces fonctionnelles que de support même si au niveau de la pièce c'est physiquement la même surface qui gère ces flux. Par exemple, les pièces à approvisionner sont très simples mais possèdent une grande quantité de surfaces fonctionnelles car elles sont en interactions avec la quasi-totalité des sous-systèmes, même si physiquement la même surface gère ces flux.

La modélisation de machines classiques (perceuse à colonne, cisaille, redresseur de tôle, tronçonneuse) par des élèves ingénieurs de 2ème année des Arts et Métiers de Metz ayant juste eu une présentation de quelques heures au cours de PJM (projet métier) a montré que les principes du MFS sont facilement appropriables (Benizri et al., 2016; De La Fabrègue et al., 2015; Delpanque et al., 2014). Ces expérimentations pédagogiques ont également mis en évidence la nécessite de proposer des « aides » afin d'éviter d'oublier des sources d'énergies autres que celles utiles au fonctionnement de la machine (gravité terrestre, énergie dissipée, etc.). Les résultats de ces PJM sont présentés en annexe 7.

L'obtention et l'analyse des résultats de cette application d'EZID sur la ligne d'approvisionnement conçu par LORMAC Automation conclu ce chapitre et le développement d'EZID dans le cas de ce travail de thèse.

Conclusion

1. Bilan de l’étude

Comme rappelé en introduction de ce mémoire, l'intégration de la prévention des risques professionnels à la conception des machines est une obligation réglementaire. C'est la démarche dite de "prévention intégrée" qui fixe comme objectif d’obtenir le niveau de risque résiduel le plus faible possible compte tenu de l’état de la technique.

Malgré les avancées en termes de connaissances et de méthodologies sur le processus et l’activité de conception et malgré un dispositif normatif de plus en plus complet, la mise en pratique de cette démarche de prévention intégrée est encore très imparfaite. Les aspects santé et sécurité sont généralement abordés de façon secondaire et dissociée par rapport aux objectifs fonctionnels, quand ils ne sont pas simplement considérés en fin de projet. C'est notamment le cas pour concepteurs de machines spéciales qui ne disposent pas de ressources dédiées (normes de type C).

Une des premières étapes de cette démarche de prévention intégrée concerne l'identification des phénomènes dangereux. Alors que cette étape conditionne toute la suite de la démarche, elle est peu abordée dans la littérature scientifique. La proposition d'une méthode permettant d'**identifier de manière systématique l'ensemble des phénomènes dangereux durant le processus de conception d’une machine** constitue donc un apport dans ce domaine.

Cette méthodologie d'identification des phénomènes dangereux doit s'inscrire dans un processus de conception qui peut être différent selon les entreprises ou les projets. Afin d’être la plus générique possible, la méthode proposée doit être exploitable à partir des données générées tout au long de la conception. De ce fait, l’autre problématique à laquelle cette méthodologie doit apporter une réponse est : **comment identifier les phénomènes dangereux à partir des paramètres de conception ?**

Afin de répondre à ces deux problématiques, quatre critères ont été identifiés vis à vis de la méthodologie à développer :

- Inductive en exploitant les données de conception (causes) pour déduire les phénomènes dangereux (effets) ;
- Dynamique et traçable pour suivre l'évolution du système au cours du processus de conception ;
- Générique par rapport aux types de risques à identifier, aux machines à concevoir et aux éléments de conception manipulés par les concepteurs ;
- Intégrée afin de permettre une interopérabilité avec d'autres outils et méthodes de conception.

La méthode dénommée EZID (pour Energy analysis for systematic haZard Identification during Design) est proposée pour répondre à ces deux problématiques. Elle se base sur le constat que les phénomènes dangereux sont nécessairement liés à la présence d'énergie. En conséquence, leur identification peut être indirectement réalisée en analysant les sources et flux d'énergies. Par ailleurs, afin de rendre EZID indépendante des démarches de conception suivies, son exploitation se situe au niveau des objets intermédiaires générés par les concepteurs et sur les données qu'ils contiennent.

Comme représenté sur la figure 58, EZID est donc construite sur quatre étapes pouvant être appliquées dès qu'un élément intermédiaire est généré :

1. Modélisation dans le formalisme du MFS ;
2. Identification des types de phénomènes dangereux par association avec les paramètres énergétiques ;
3. Identification des conséquences par combinaison des paramètres complémentaires ;
4. Identification de l'aspect significatif par comparaison des valeurs des paramètres énergétiques.

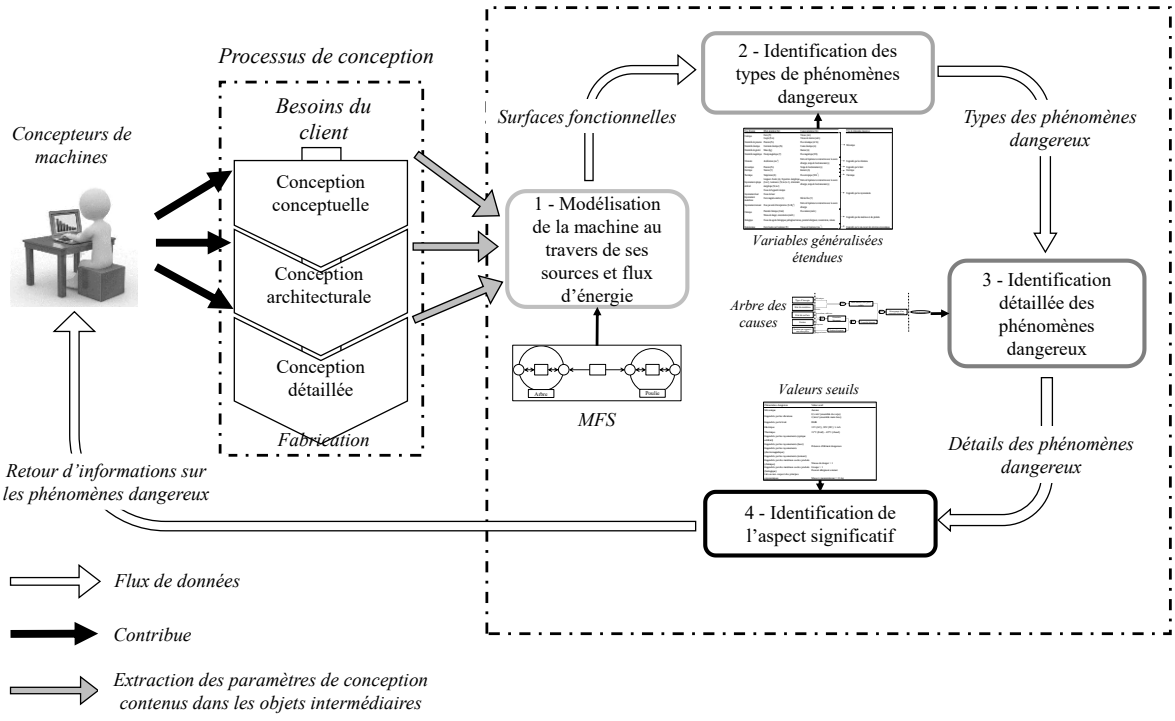


Figure 58. Rappel du processus d'EZID

En sortie de la méthode, un retour d'informations organisé et hiérarchisé est proposé au concepteur afin qu'il puisse continuer le processus d'appréciation des risques et choisir les mesures de prévention nécessaires. Cette structuration par étape d'EZID permet l'identification

progressive des différentes caractéristiques des phénomènes dangereux, ce qui représente le premier apport de ce travail.

Un autre de ces apports a été de compléter le MFS en proposant des modèles de composants ou éléments génériques et des automatismes, opérateurs et règles de modélisation permettant de systématiser la modélisation de certaines énergies telles que l'énergie potentielle de pesanteur, l'énergie mécanique fournie volontairement ou non par l'opérateur ou encore les énergies dissipées. En effet, si les concepteurs ont le réflexe de casser les angles des composants accessibles ou de stabiliser la machine lors de son exploitation, la représentation systématique de ces énergies est un moyen permettant de ne pas les oublier dans ses autres phases de vie (ex. : l'assemblage où tous les composants passent entre les mains des opérateurs). Il a également été montré que cette modélisation est réalisable dès la phase de conception conceptuelle et qu'elle évolue jusqu'à la fin du processus de conception. Elle permet également d'analyser les différentes phases de vie de la machine en établissant autant de MFS que cette dernière aura d'architectures énergétiques.

Les traitements proposés pour identifier et caractériser les phénomènes dangereux à partir des paramètres de conception constituent un autre apport de ce travail. Il a en effet été nécessaire pour cela :

- d'étendre le concept de variables généralisées exploité par le MFS afin de couvrir l'ensemble des phénomènes dangereux ;
- d'établir à l'aide de la méthode de l'arbre des causes les paramètres complémentaires aux paramètres énergiques et leurs combinaisons afin d'identifier de façon plus précise les conséquences de certains phénomènes dangereux.

Ainsi, vis à vis des quatre critères attendus, EZID est :

- <u>générique</u> car d'une part elle exploite les éléments intermédiaires et les paramètres de conception communs à tous les processus de conception, et d'autres part elle permet l'identification de l'ensemble des types de phénomènes dangereux ;
- <u>inductive</u> car elle utilise les paramètres de conception, notamment les paramètres énergétiques, afin identifier les différentes caractéristiques liées aux phénomènes dangereux ;
- <u>dynamique</u> car cette méthode est applicable sur les éléments intermédiaires apparaissant tout au long du processus de conception et fournit explicitement les moyens de transformer la modélisation au travers des opérateurs, règles et automatismes du MFS sans avoir à la recommencer.

Il faut toutefois noter que l'aspect « intégrée et/ou interconnectable » avec les outils et méthodes de conception actuels, qui était également recherché, n'est à ce stade pas atteint. Même si un démonstrateur informatique a été développé, l'application d'EZID nécessite une

analyse des objets intermédiaires générés par ces outils et méthodes afin d'extraire les paramètres nécessaires à l'élaboration du MFS et aux différents traitements proposés.

Les applications d'EZID durant diverses expériences pédagogiques et sur un cas industriel ont finalement permis de valider sa pertinence vis-à-vis de l'identification des différents phénomènes dangereux (mécaniques, électriques, thermique, liés au bruit, aux vibrations, aux rayonnements, aux substances et produits et au non-respect des principes ergonomiques), tout cela à partir de l'analyse des sources et flux d'énergies et ce, de façon synchrone avec le processus de conception suivi.

2. Discussion

Si l'application de la méthode EZID sur un cas industriel a permis de montrer sa capacité à identifier systématiquement les phénomènes dangereux, elle a également mis en évidence certaines limites.

Comme rappelé dans le chapitre précédent une des premières limites porte sur l'étape de modélisation dans le formalise MFS. Elle est en effet cruciale car elle détermine le niveau de détail de l'identification des phénomènes dangereux. Il appartient donc au concepteur, de par son expertise, de définir ce niveau en fonction de son projet afin d'avoir une identification au « juste nécessaire ». Par ailleurs, même si les expérimentations ont montré que les principes de base du formalisme MFS peuvent être rapidement assimilés, l'extraction des données contenues dans les objets intermédiaires, qui sont eux-mêmes de nature très variée, représente une tâche supplémentaire qui peut se révéler coûteuse en temps et sources d'erreurs. Enfin, le MFS a été développé pour étudier les systèmes complexes. Cela limite les possibilités d'études d'autres systèmes à risques ne comportant pas de machines (bâtiment amianté, installation en environnement dur, …).

Une seconde limite concerne l'identification des conséquences. Les combinaisons logiques des paramètres énergétiques avec d'autres paramètres de conception sont en effet pour le moment limitées aux phénomènes dangereux mécaniques car ce sont ceux qui sont le plus détaillés dans la norme NF EN ISO 12100. L'identification du caractère significatif d'un phénomène dangereux par comparaison avec une valeur seuil indépendante de l'exposition est également peu discriminante car pour être indépendante, ces valeurs seuils sont très faibles, voire inexistantes comme dans le cas des phénomènes dangereux mécaniques.

Une troisième limite se situe au niveau des possibilités de modélisation permises par le MFS. Ce dernier ne peut représenter que les échanges d'énergies entre les frontières. Les informations transmises à l'utilisateur par la machine sont donc assimilées à un échange d'énergie. Cela réduit ainsi la possibilité d'analyse de la qualité et de la quantité des données transmises, et donc la possibilité de juger leur efficacité d'un point de vue de la prévention.

La dernière limite porte sur le fait que l'application industrielle a été faite a posteriori du processus de conception. Il n'a donc pas été possible de vérifier si les informations retournées auraient permis de modifier les choix techniques des concepteurs.

3. Perspectives

Comme indiqué précédemment, une des limites concernent l'aspect peu discriminatif de la classification significatifs / pertinents à partir de la seule exploitation des valeurs seuils. Une des perspectives consistent donc à intégrer les paramètres d'évaluation des risques dans ceux des surfaces fonctionnelles. Comme cela a été fait pour les paramètres complémentaires, les paramètres d'évaluation des risques spécifiques à chaque type de phénomène dangereux pourraient servir à caractériser les surfaces fonctionnelles. Dans la même idée des paramètres de durée de vie pourrait être intégrés afin de prendre en compte les risques de défaillances techniques (probabilité d'occurrence de l'événement dangereux) ainsi que ceux servant à la reconception de machines. Le troisième traitement pourrait alors prendre en compte les méthodes d'évaluation existantes. La méthode EZID gérerait ainsi, en plus de l'identification, l'ensemble de la démarche d'appréciation des risques.

Une deuxième perspective porte sur la prise en compte des combinaisons de phénomènes dangereux qui n'ont pas pu être approfondies durant ce travail. Il s'agit par exemple de la combinaison d'un risque électrique (étincelle) avec un risque chimique (poussières) pouvant générer un risque (explosion) d'un type différent des 2 premiers. Des travaux complémentaires sont donc nécessaires afin de permettre ce type d'identification.

Une troisième perspective est de compléter le MFS ou d'utiliser une modélisation de type internal block diagram afin de bénéficier de leurs éléments de modélisation liés aux flux d'informations. L'annexe 8 présente par ailleurs l'équivalence des éléments du MFS avec les éléments de l'internal block diagram.

La dernière perspective consiste à poursuivre le développement de la maquette logicielle afin d'avoir un outil opérationnel permettant d'appliquer EZID en temps réel lors d'un projet industriel. A terme, cet outil devrait être interconnecté avec d'autres outils de conception afin de limiter encore la reprise manuelle de données,

Pour conclure ce mémoire, la méthode EZID proposée permet d'interroger de façon systématique les concepteurs sur les sources et flux d'énergies des solutions techniques qu'ils proposent. La modélisation et les traitements intégrés à EZID permettent ensuite de les informer tout au long du processus de conception sur les phénomènes dangereux et les conséquences associées. Le concepteur dispose alors des données suffisantes pour lui permettre de poursuivre le processus d'appréciation des risques et définir des moyens de protection adaptés sans attendre la fin du processus de conception.

Il est important de signaler que cette méthodologie ne remplace pas les référentiels réglementaires, les normes ou les outils déjà utilisés par les concepteurs en matière d'intégration

de la prévention. EZID vient en complément en facilitant l'identification des phénomènes dangereux au cours du processus de conception. Dans le cadre de ses missions, les résultats obtenus au cours de cette thèse constituent un support complémentaire pour l'INRS pour la diffusion de la prévention intégrée auprès des acteurs concernés.

Annexes

1. Annexe 1 : Processus de conception systématique (Pahl et Beitz, 1977)

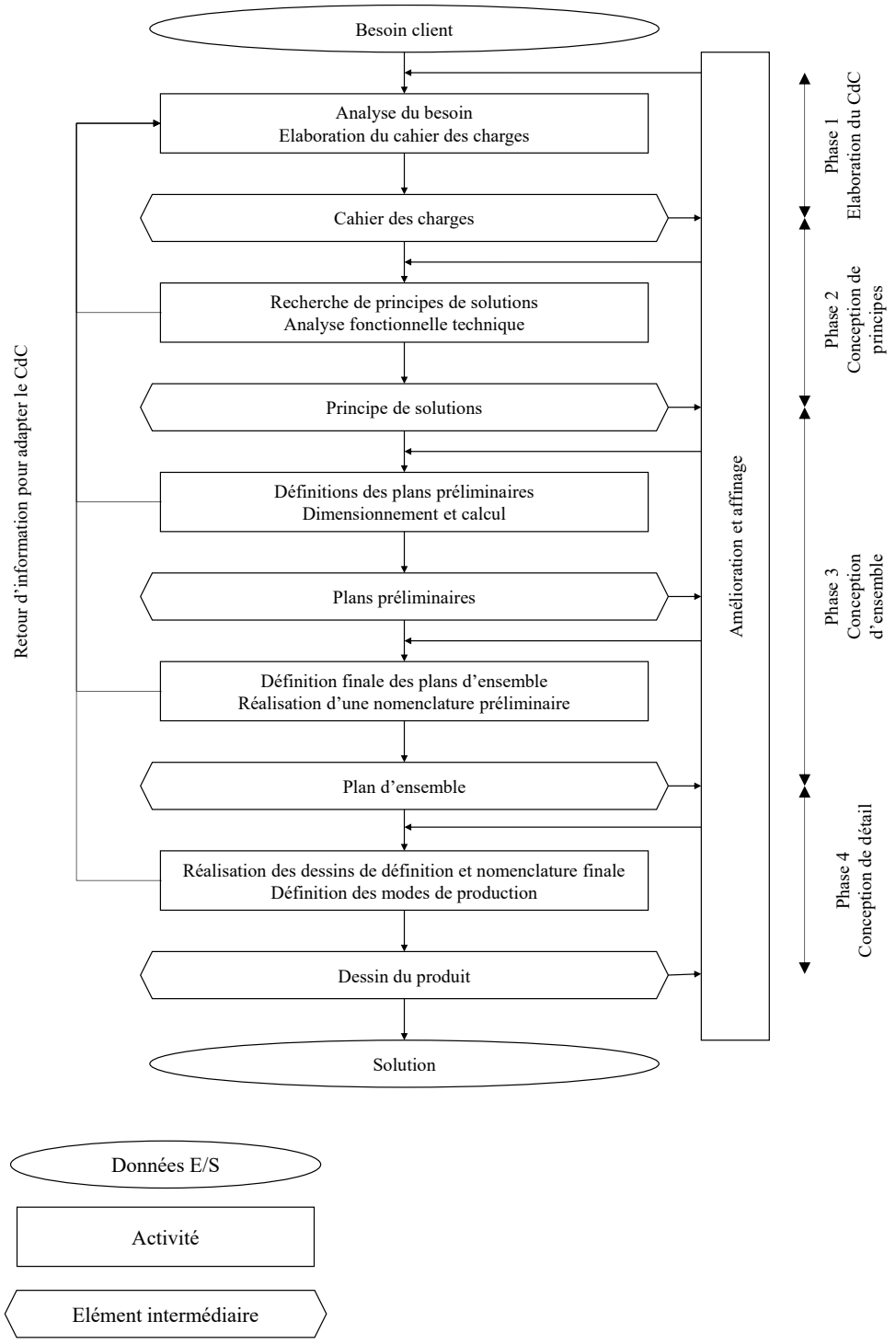


Figure 59. Démarche de conception systématique (Pahl & Beitz, 1977)

2. Annexe 2 : Comparatif des modèles de représentation des flux d'énergies

Tableau 19. Opérateurs, règles et automatismes de modélisation

Critères	Modèle substance-champ	Bond Graph	Représentation énergétique macroscopique (REM)	Diagramme Sankey	Internal block diagram (IBD)	Modèle fonctionno-structurel (MFS)
Modèle						
Capacité à modéliser tous les types d'énergie	Le modèle substance-champ permet de représenter tous les types d'énergie qui définis comme des champs, ce qui couvre toutes les énergies prises en compte par EZID	Le Bond Graph représente les échanges d'énergie au travers des variables généralisées (effort et courant). Il est donc théoriquement possible de modéliser tous les types d'énergie à condition de pouvoir exprimer leurs caractéristiques au travers de variables généralisées	La REM représente les échanges d'énergie au travers de paramètres (ex. : tension et intensité pour l'énergie électrique) modélisant leurs caractéristiques. Il est théoriquement possible de modéliser tous les types d'énergie à condition de pouvoir exprimer leurs caractéristiques au travers de paramètres	Sur un diagramme SANKEY, les flèches représentent la variation d'un seul type d'élément et donc un seul type d'énergie peut être représenté sur un seul diagramme SANKEY	Tous les types d'énergie peuvent être représentés dans un IBD car le modèle de données derrière la représentation n'est pas limité dans ses possibilités	La modélisation des échanges d'énergie dans le MFS est basée sur les paramètres généralisé des Bond Graph. Tous les types d'énergie peuvent donc être modélisé à condition de les exprimer au travers de variables généralisés
Capacité à modéliser les dissipations	Les types de champ (qui utilisent la notation S-Field) permettent de représenter les caractéristiques des échanges d'énergie, et donc les dissipations avec les action néfastes et excessives	Les liaisons des Bond Graph symbolisent les transferts d'énergie entre les processeurs d'un système. Parmi ces processeurs, certains d'entre eux tels que l'élément dissipatif R, inertiel I et capacitif C modélisent les relations liants effort et courant et par conséquent la perte d'énergie lors de l'échange. Cependant, l'énergie dissipée (ex. : par effet Joule dans le cas d'une résistance électrique) n'est pas forcément modélisée comme un flux d'énergie (comme sur la figure 64 où le flux de chaleur n'apparait pas)	Dans cette représentation, les dissipations sont prises en considération au travers des équations liant les différents paramètres mais le flux d'énergie n'est pas forcément représenté dans le modèle	Le diagramme peut représenter les dissipations si elles ont le même type que l'énergie échangée	Les ports peuvent stocker les informations liées aux dissipations d'énergie, mais n'obligent pas leur modélisation en tant que flux	Les liaisons semi-conductrices sont les indicateurs de dissipations dans un échange d'énergie mais ren n'oblige la représentation des surfaces fonctionnelles des énergies dissipées
Modélisation de l'opérateur	L'opérateur peut être modélisé comme une substance (en tant qu'outil ou élément à transformer)	Les échanges d'énergie entre l'opérateur et la machine peuvent être modélisés au travers des variables généralisées liées à l'énergie cinétique (force et vitesse)	Les échanges d'énergie entre l'opérateur et la machine peuvent être modélisés au travers des variables généralisées liées à l'énergie cinétique (force et vitesse)	L'opérateur peut être modélisé s'il échange le même type d'énergie que celui qui est pris en compte dans le diagramme	L'opérateur peut être modélisé comme un bloc ou un flux d'énergie extérieur au système	L'opérateur peut être modélisé par une frontière et des surfaces fonctionnelles
Quantité d'informations relatives aux énergies étant gérée par le modèle	Seuls les caractéristiques des champs et le nom des substances sont capitalisées dans le modèle	Les informations contenues dans le modèle de données des Bond Graph concernent uniquement les caractéristiques des échanges d'énergie	Seules les caractéristiques des échanges d'énergie et les noms des composants gérants ces échanges sont capitalisées dans la REM	Seules les valeurs des échanges d'énergie et les noms des composants gérants ces échanges apparaissent sur le diagramme	Les informations sur les caractéristiques des énergies échangées et les éléments permettant ces transferts d'énergies peuvent être capitalisées dans IBD	Les informations sur les caractéristiques des énergies échangées et les éléments permettant ces transferts d'énergies peuvent être capitalisées dans le MFS
Existence d'éléments permettant de gérer l'évolution du modèle au cours du processus de conception	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun	Des opérateurs et règles de modélisation existent pour transformer le modèle

3. Annexe 3 : Modèles génériques de modélisation

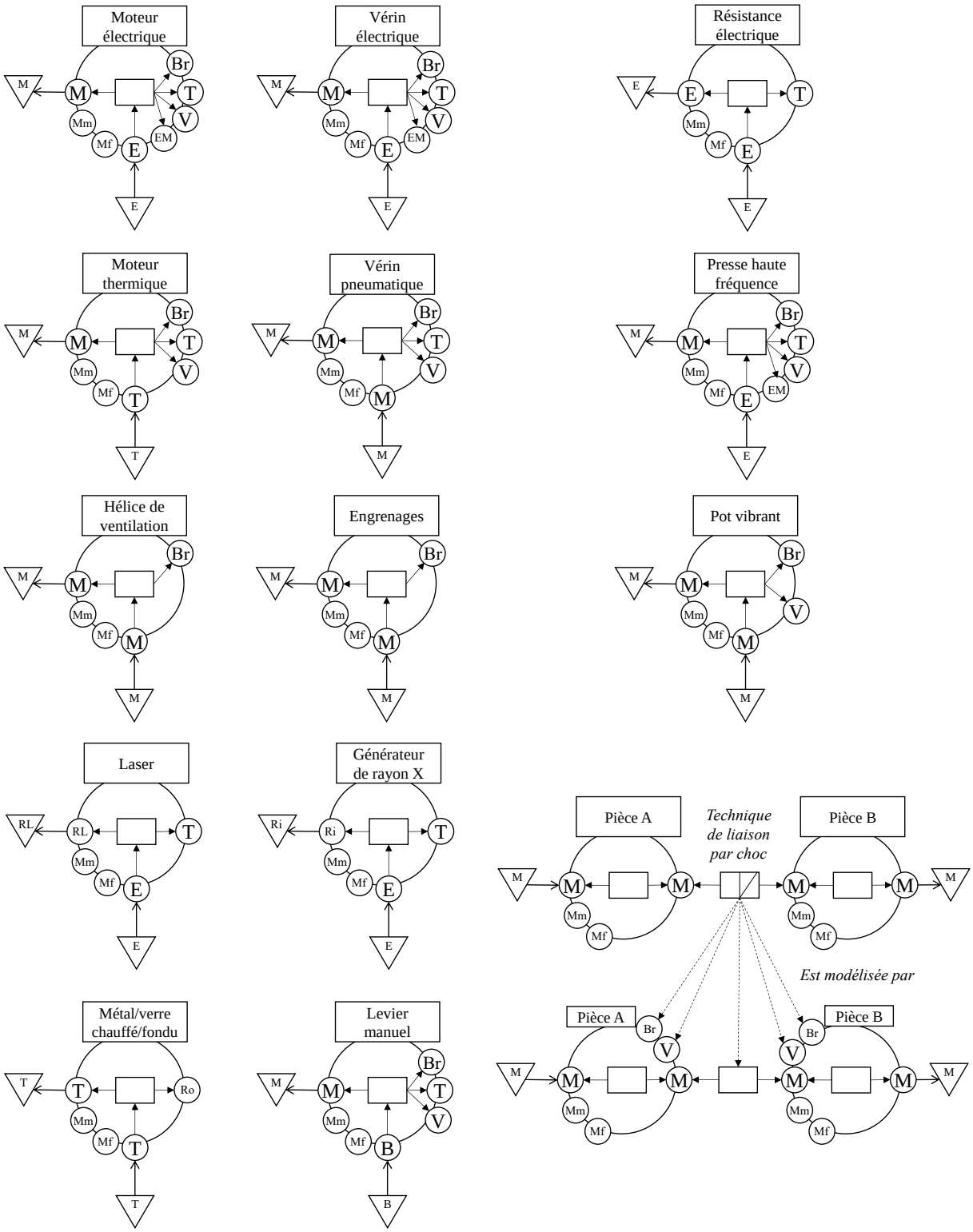
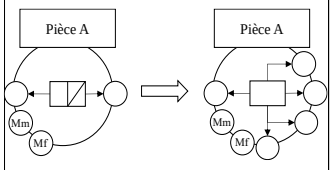
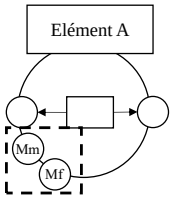
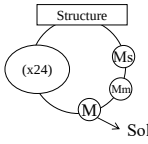


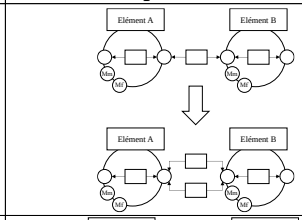
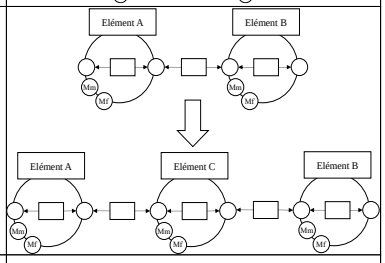
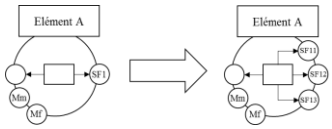
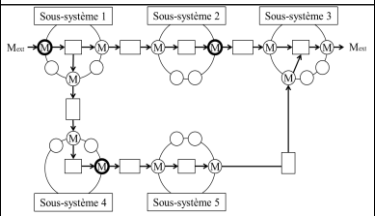
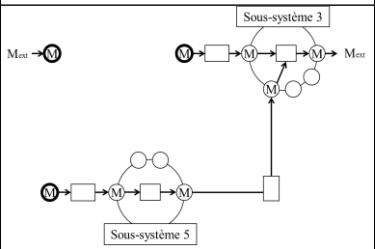
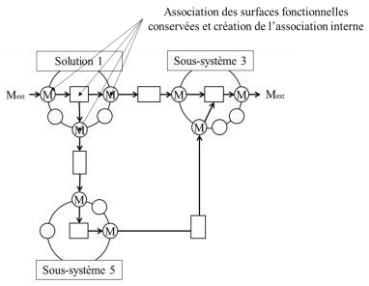
Figure 60. Exemples de modèles générique de modélisation

4. Annexe 4 : Récapitulatif des opérateurs, règles et automatismes de modélisation du MFS

Tableau 20. Opérateurs, règles et automatismes de modélisation

Choix concepteur	Type d'élément concerné	Règles	Opérateur de modélisation sollicité	Source
Remplacer une fonction par une autre	Lien	Règle 1 : Changer le nom de la fonction	Aucun	(Roucoules, 1999)
Remplacer une fonction par une association de fonctions	Lien	Règle 2 : Créer une liaison ou une association interne pour chaque nouvelle fonction	Décomposition en parallèle de la liaison ou de l'association Découpage des surfaces fonctionnelles	
Remplacer une fonction par une technologie	Association interne	Règle 3 : remplacer le nom de la fonction par le nom de la technologie. Appliquer la règle 3 bis.	Aucun	
		Règle 3 bis : si la technologie choisie ne peut pas réaliser les autres associations internes de l'élément, il faut donc créer de nouveaux éléments.	Décomposition d'un élément Décompositions en série de la liaison ou de l'association interne	
	Liaison	Règle 4 : remplacer la liaison par un nouvel élément représentant la technologie choisie. Cet élément a sa propre association interne. Il faut alors mettre en place les liaisons entre le nouvel élément et le système.	Décomposition en série de la liaison ou de l'association interne Découpage des surfaces fonctionnelles	
	Tous	Règle 5 : Enregistrer les références des éléments parents et des opérations dans les éléments générés	Aucun	
	Tous	Règle 6 : Agréger les fonctions ou les technologies	Sélection d'éléments dans le MFS Suppression d'éléments dans le MFS Association de surfaces fonctionnelles à une frontière	

Automatismes	Représentation
Automatisme 1 : Modélisation systématique des dissipations liées aux liaisons semi-conductrices	
Automatisme 2 : Génération systématique de surfaces fonctionnelles liées à l'échange d'énergie potentielle de pesanteur et d'énergie mécanique involontaire fournie par l'opérateur à la machine	
Automatisme 3 : Modélisation systématique de l'échange d'énergie entre la machine et un support	

Opérateurs	Représentation	Source
Opérateur 1 : Décomposition en parallèle d'une liaison ou d'une association interne		(Roucoules, 1999)
Opérateur 2 : Décomposition en série d'une liaison ou d'une association interne		
Opérateur 3 : Découpage d'une surface fonctionnelle		
Opérateur 4 : Sélection d'éléments dans le MFS		
Opérateur 5 : Suppression d'éléments dans le MFS		
Opérateur 6 : Association de surfaces fonctionnelles à une frontière		

5. Annexe 5 : Démonstrateur basé sur EZID (Nadi, 2016a, 2016b)

Le démonstrateur développé a pour objectif de capitaliser les données de conception relatives à la machine formalisées selon les principes du MFS (Nadi, 2016a, 2016b). Le concepteur commence tout d'abord par renseigner le nom du modèle qu'il va compléter comme cela est représenté sur la figure 61. Le nom du modèle correspond au nom de la machine. Les projets ainsi créés sont enregistrés dans le logiciel et peuvent être repris si besoin.



Figure 61. Interface de création du modèle

Une fois le projet créé, le concepteur renseigne la phase de vie dans laquelle il doit modéliser la machine afin de permettre l'identification des phénomènes dangereux comme recommandé par EZID. Après cela, la modélisation suit l'ordre présenté dans le chapitre 3. Comme la figure 62 le montre, le concepteur définit tout d'abord les frontières des constituants de la machine en les créant manuellement ou en exploitant des modèles génériques préenregistrés.

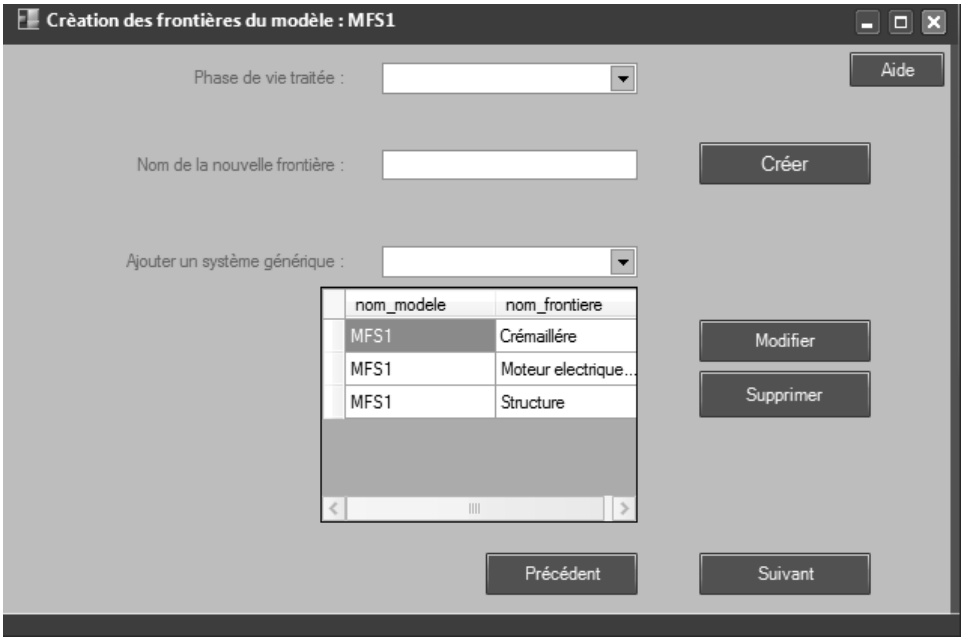


Figure 62. Interface de création des frontières composant le modèle

Une fois les frontières modélisées, le concepteur doit renseigner quelles sont leurs échanges d'énergies avec les autres frontières. Pour cela, il définit dans un premier temps les noms des surfaces fonctionnelles, comme illustré en figure 63. Le démonstrateur gère la génération automatique des surfaces fonctionnelles liées à l'énergie potentielle de pesanteur (surface fonctionnelle Mm) et à l'énergie pouvant être transmise involontairement de l'opérateur à la machine (surface fonctionnelle Mf).

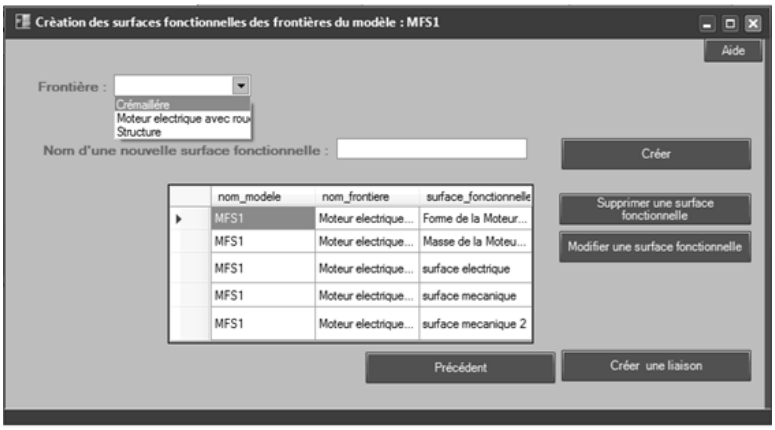


Figure 63. Interface de création des surfaces fonctionnelles d'une frontière

Une fois l'objet surface fonctionnelle créé, le concepteur peut modifier les paramètres qu'il contient. Cela commence par les paramètres énergétiques caractérisant l'échange d'énergie. Il définit tout d'abord le type d'énergie (cadre 1). Le démonstrateur renseigne automatiquement les paramètres énergétiques associés, basés sur la table des variables généralisées étendues du chapitre 3. Le concepteur peut ensuite renseigner les valeurs de ces paramètres énergétiques. Ce formulaire correspond au cadre en haut de la figure 64.

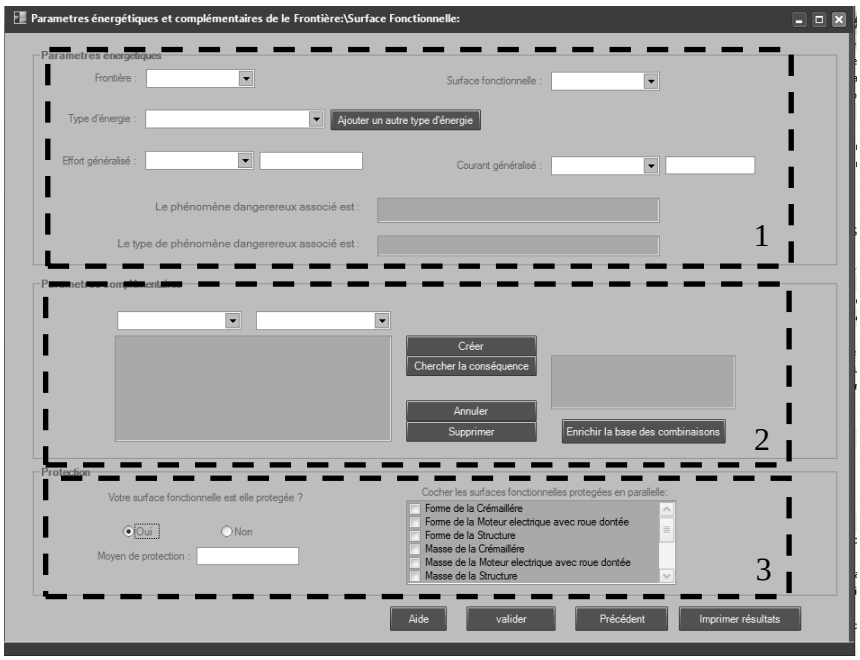


Figure 64. Interface de capitalisation des paramètres énergétiques et complémentaires d'une surface fonctionnelle

Lorsque le type d'énergie est renseigné, le démonstrateur réalise automatiquement le premier traitement d'EZID en identifiant le type du phénomène dangereux associé. Cela fonctionne de la même manière pour les valeurs des paramètres énergétiques qui sont comparées aux valeurs réglementaires enregistrées dans la base de données pour identifier l'aspect significatif des phénomènes dangereux (comme décrit dans le chapitre 3). Le concepteur reçoit donc en temps réel les résultats de ces traitements.

La capitalisation des paramètres complémentaires se fait dans le cadre 2 de la figure 64. Actuellement limité à l'énergie mécanique, le concepteur doit renseigner les valeurs pour les différents paramètres proposés, basés sur ceux exploités par les combinaisons logiques définies dans le chapitre 3. De la même manière que pour les précédents traitements, les résultats sont disponibles en temps réel.

Pour terminer la modélisation, le concepteur doit ensuite capitaliser les liaisons et associations internes de la machine en utilisant le formulaire de la figure 65. Pour cela, il doit sélectionner les surfaces fonctionnelles concernées et définir le type d'échange.

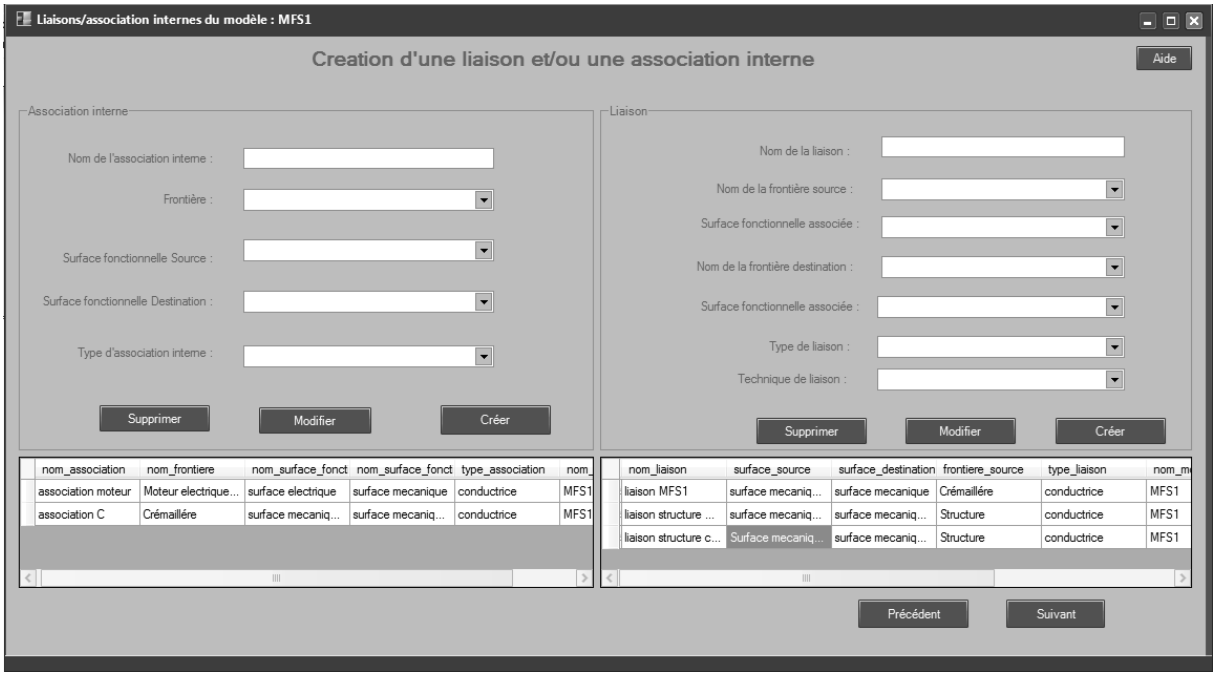


Figure 65. Interface de création des liaisons ou associations internes d'un modèle

Si l'échange est de type semi-conducteur, le logiciel fait apparaitre une boite de dialogue indiquant au concepteur qu'il doit transformer cet échange en conducteur et renseigner les surfaces fonctionnelles liées aux énergies dissipées.

Le concepteur peut enfin intégrer des solutions de prévention en définissant leur nom et les surfaces fonctionnelles couvertes par ces éléments dans le cadre 3 de la figure 64. Les éléments ainsi renseignés doivent ensuite être modélisé dans le MFS pour que l'identification des phénomènes dangereux soit complète

Une fois l'ensemble des éléments du MFS modélisés, le concepteur peut demander la génération d'un rapport d'identification des phénomènes dangereux regroupant l'ensemble des résultats obtenus comme illustré en figure 66. Ce rapport trie les informations par frontière puis par surfaces fonctionnelles et donne toutes les caractéristiques de l'identification (type, conséquence, aspect significatif) et les moyen de protection s'ils existent. Une fois ce rapport généré, cela conclu l'application d'EZID et le concepteur peut poursuivre le processus d'appréciation et de réduction des risques.

20/10/2016

	Type énergie échangé par la surface fonctionnelle	Type de phénomène dangereux généré par la surface fonctionnelle	Conséquences	Significatif	Protection	Moyen de protection
Courroie						
En Méca E						
	Mecanique translation	Mécanique	Entrainement Ecrasement	Significatif	VRAI	Structure
En Meca S						
	Mecanique translation	Mécanique	Entrainement Ecrasement	Significatif	VRAI	Structure
Forme de la Courroie						
	Mecanique translation	Mécanique	Choc	Significatif	VRAI	Structure
Masse de la Courroie						
	Potentiel de gravité	Mécanique	Choc Ecrasement	Significatif	FAUX	NULL
Moteur						
Dissip Bruit						
	Acoustique	Engendré par le bruit		Pertinent	VRAI	NULL
Dissip Thermique						
	Thermique	Thermique		Pertinent	VRAI	NULL
Dissip Vibration						
	Vibratoire	Engendré par les vibrations		Pertinent	VRAI	NULL
Energ Elec E						
	Electrique	Electrique		Significatif	VRAI	Système normalisé
Energ Meca S						
	Mecanique translation	Mécanique	Entrainement	Significatif	VRAI	Structure
Forme de la Moteur						
	Mecanique translation	Mécanique	Choc Coupure	Significatif	FAUX	NULL
Masse de la Moteur						
	Potentiel de gravité	Mécanique	Choc Ecrasement Cisaillement	Significatif	VRAI	Structure
Rouleau 1						
Energ Meca E						
	Mecanique rotation	Mécanique	Choc Ecrasement	Significatif	VRAI	Tapis Structure
Energ Meca S						
	Mecanique rotation	Mécanique	Choc Ecrasement	Significatif	VRAI	Tapis Structure

1

Figure 66. Rapport d'identification des phénomènes dangereux

Les données de références capitalisées dans la base de données du démonstrateur n'étant pas exhaustives, il est donc nécessaire de fournir aux concepteurs la possibilité de les modifier ou les compléter. C'est le rôle des deux formulaires de la figure 67 qui permettent de compléter les données de référence supportant les différents traitements d'EZID.

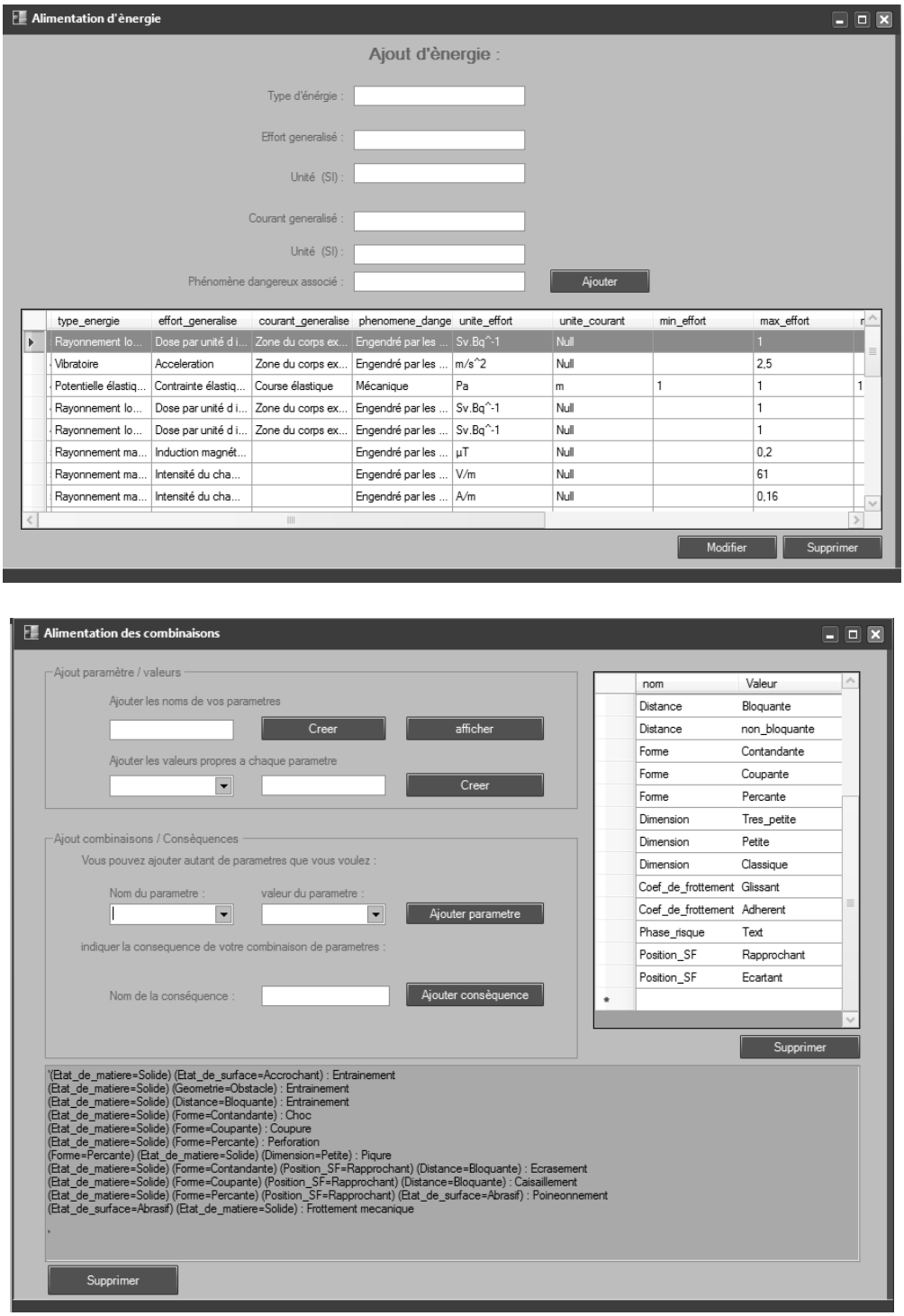


Figure 67. Interfaces d'alimentation des paramètres énergétiques et des valeurs seuils (en haut) et des combinaisons de paramètres pour l'identification des conséquences (en bas)

Ce démonstrateur n'est cependant pas parfait. Il aurait été préférable de disposer d'une interface de modélisation graphique afin que la représentation du MFS et la capitalisation de ses données soient plus intuitives. De même, si les données de référence peuvent être complétées, les automatismes, règles et opérateurs de modélisation sont fixes dans le logiciel.

6. Annexe 6 : MFS complémentaires

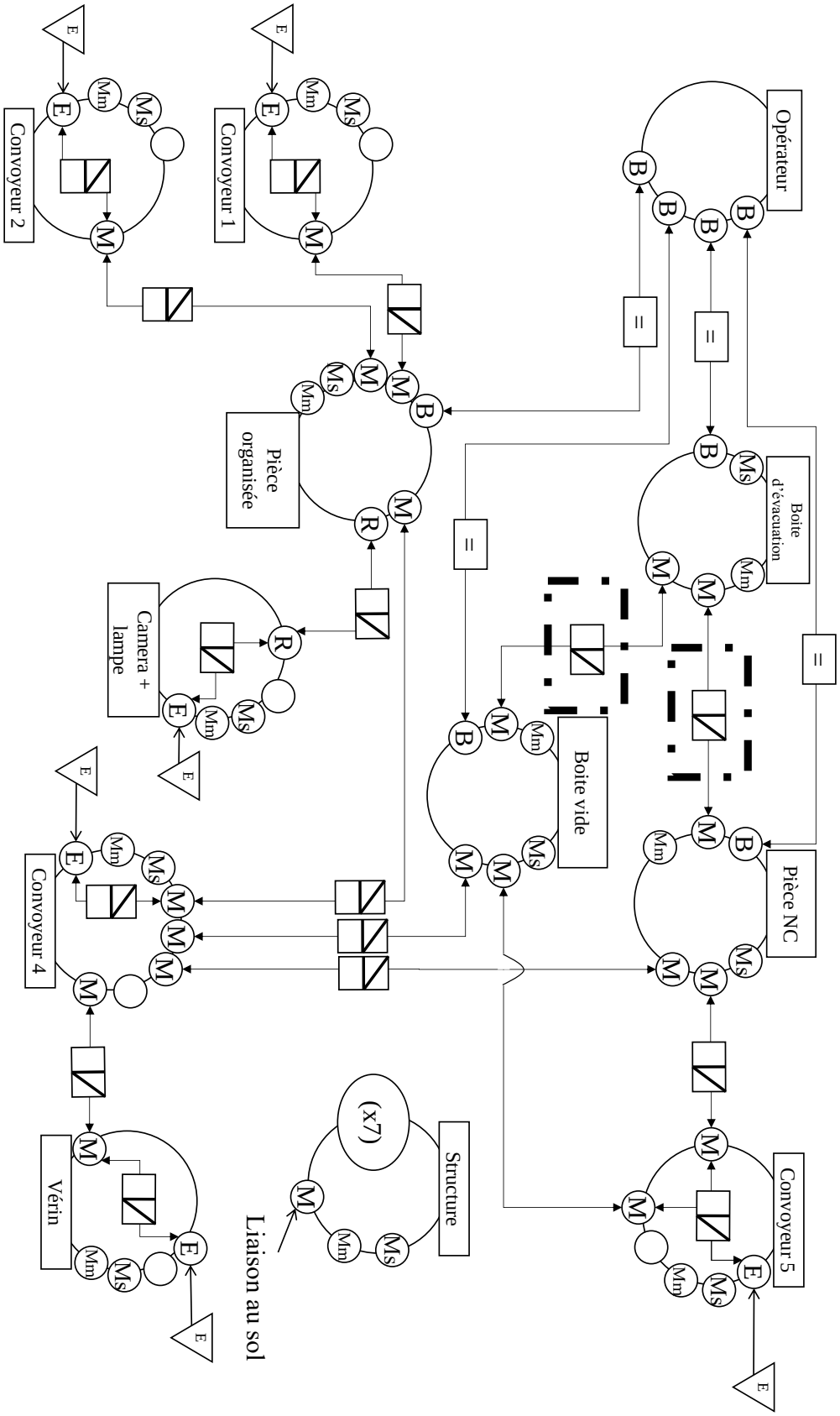


Figure 68. MFS de la ligne d'approvisionnement pour les pièces organisées en conception architecturale

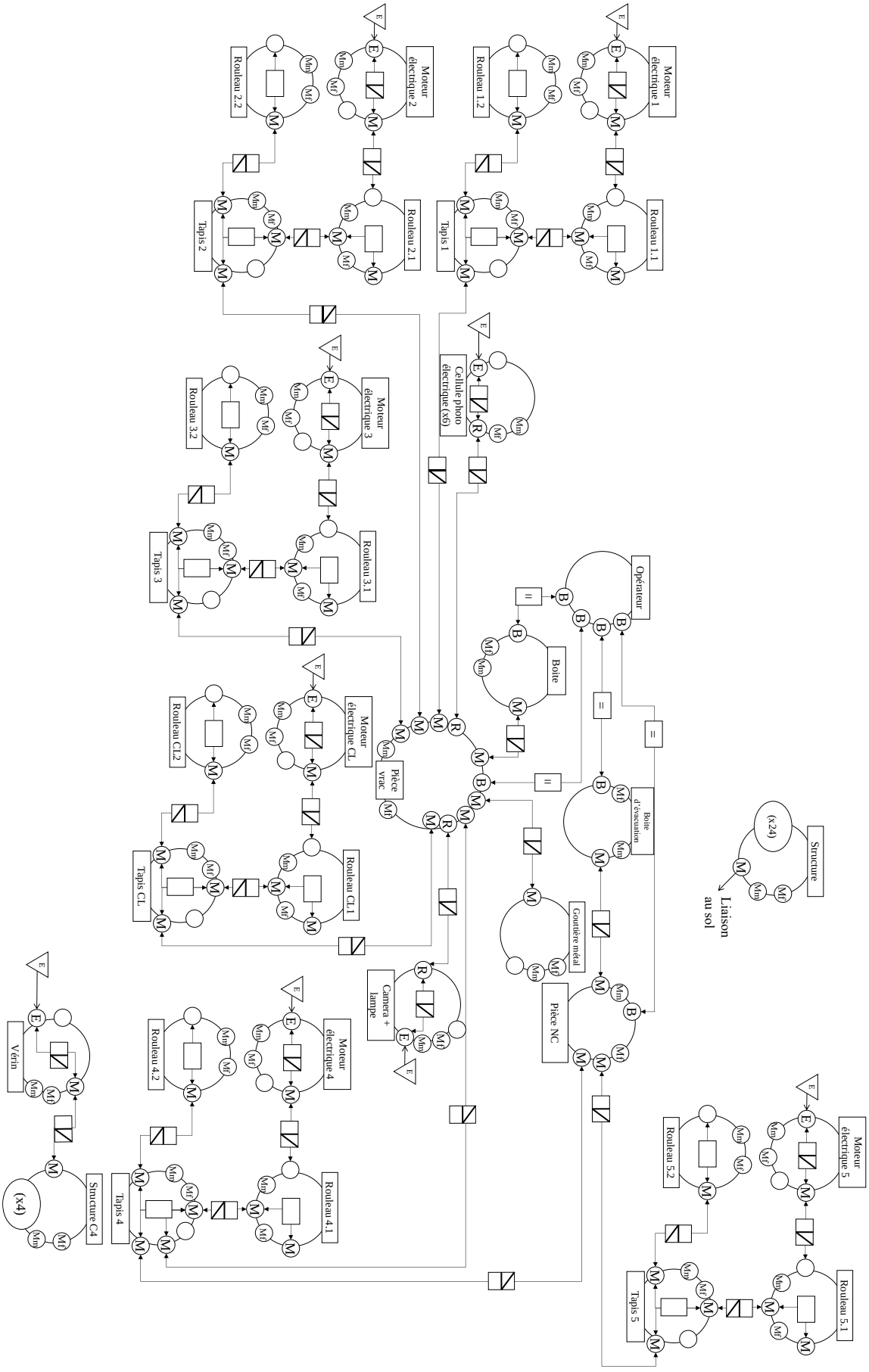


Figure 69. MFS complet de la ligne d'approvisionnement pour les pièces en vrac en conception détaillée

La ligne d'approvisionnement étant découpée en deux blocs, il a été nécessaire de découper en deux les MFS de montage de ces deux blocs dans la figure 70.

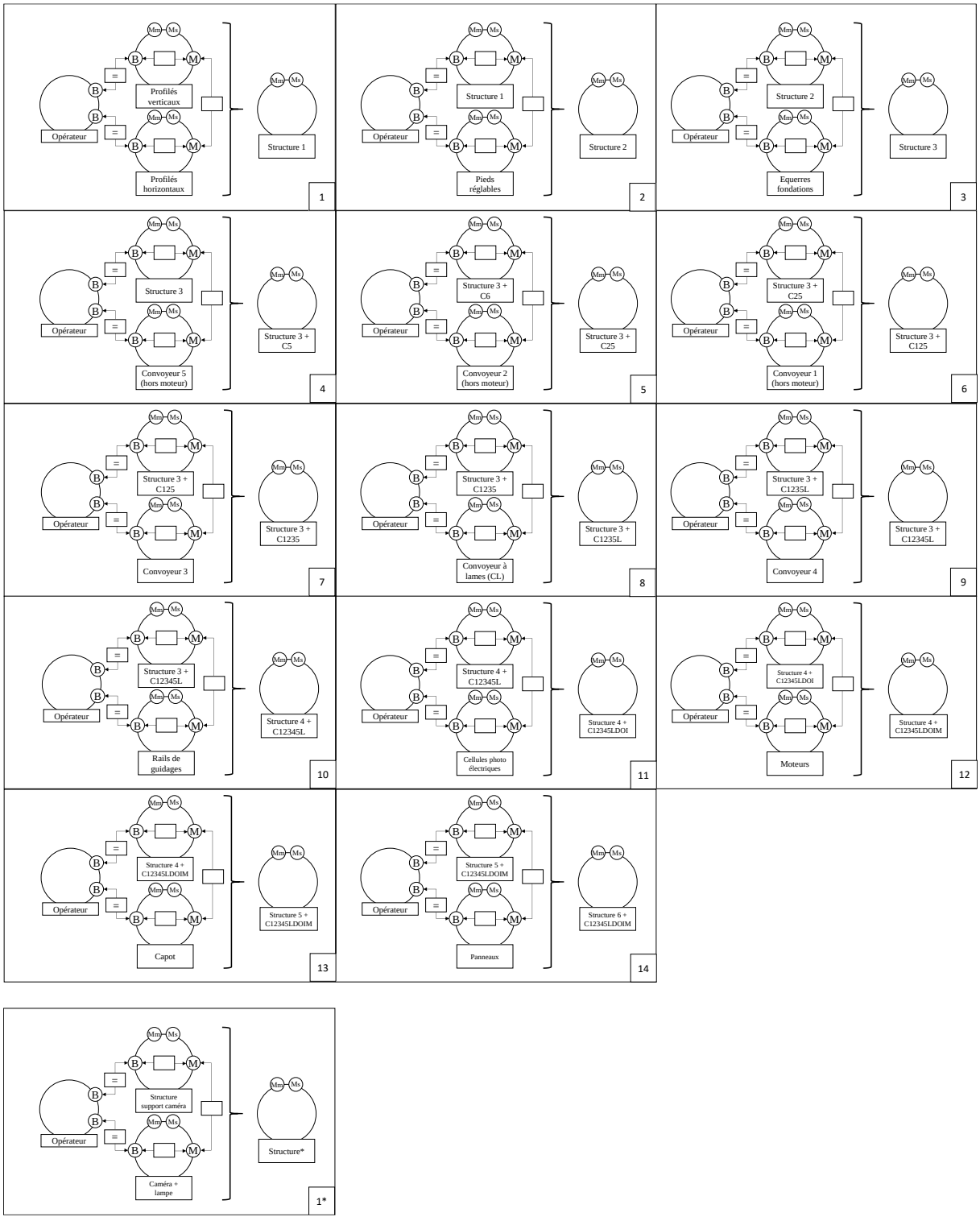


Figure 70. MFS du montage du bloc d'approvisionnement (en haut) et du bloc identification (en bas)

7. Annexe 7 : Expérimentations pédagogique sur le MFS

Ces expérimentations ont été réalisées sur six mois par des groupes d'élèves ingénieurs de deuxième année de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Metz dans le cadre de leurs « Projets Métiers » (PJM). Ces élèves avaient suivi les mêmes enseignements relatifs à la conception de produit.

La première expérimentation réalisée par un groupe de cinq élèves avait comme objectif d'appliquer le modèle fonctionnel énergétique (MFE) proposé par (Amara, 2013) sur deux machines industrielles présentes dans les locaux du campus de Metz (tronçonneuse et cisaille) afin de valider la possibilité de pouvoir identifier des phénomènes dangereux à partir de paramètres de conception. Ces travaux ont ensuite été repris et compléter par un deuxième groupe de quatre étudiants.

La seconde expérimentation réalisée par un groupe de cinq élèves a exploré la possibilité d'appliquer le MFS tout au long du processus de conception simplifié d'une perceuse à colonne.

7.1. Application du MFE sur une machine existante

7.1.1. Déroulement

L'objectif de ce premier projet était d'appliquer le MFE sur deux machines présentes dans les ateliers du campus de Metz une tronçonneuse et une cisaille afin de vérifier si les phénomènes dangereux identifiés correspondaient à ceux pris en considération par les constructeurs au travers des mesures de prévention installées (Benizri et al., 2016; Delpanque et al., 2014). Ces deux machines sont présentées sur la figure 71.



Figure 71. Visuels de la tronçonneuse (à gauche) et de la cisaille (à droite)

Les résultats attendus lors de cette application étaient la modélisation du MFE des deux machines, l'identification des phénomènes dangereux à partir des modèles générés et la comparaison des résultats par rapport aux mesures de prévention existantes sur les machines. Le groupe d'élèves a étudié ces équipements de manière autonome avec les conditions expérimentales suivantes :

- Communication du rapport de Master et présentation de la méthode ;
- Travail en autonomie de la part des étudiants avec soutien ponctuel en cas de question

La démarche qu'ils ont suivie a été :

- D'étudier visuellement les machines afin de repérer la structure, les fonctions, les énergies mises en jeu et les éléments de prévention ;
- De réaliser une analyse fonctionnelle en suivant la méthode APTE (diagramme pieuvre, SADT A-0, FAST) ;
- De faire un schéma cinématique des machines ;
- De réaliser les MFE en basant leur réflexion sur le schéma cinématique pour définir quels éléments doivent être modélisés (niveau de détail) et quels échanges d'énergies doivent être mis en jeu ;
- D'analyser le MFE pour en tirer des conclusions sur la sécurité

7.1.2. Résultats

En suivant cette démarche, ils ont été capables, sans explication supplémentaire par rapport au mémoire d'Amara, de modéliser les MFE des machines présentées en figure 72. Dans cette représentation, les flux d'énergies accessibles à l'opérateur apparaissaient sous forme de large flèche en parallèle des liaisons.

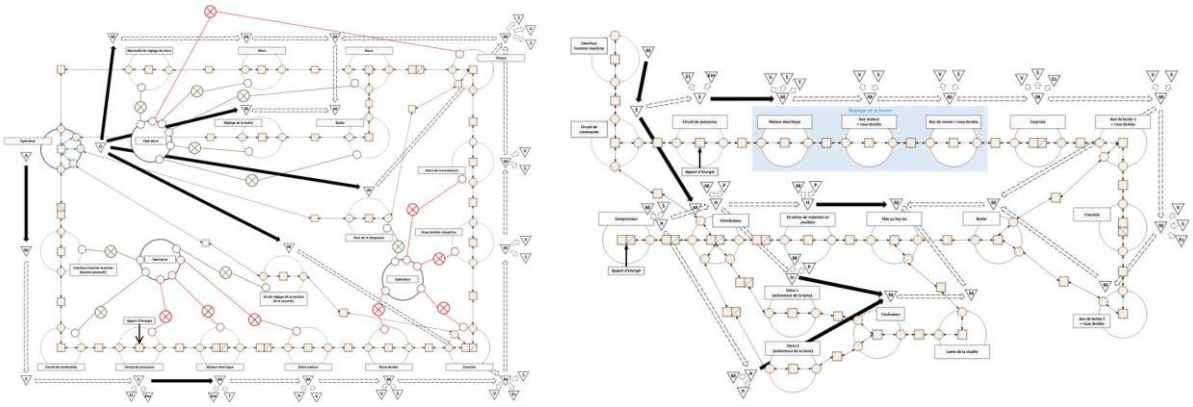


Figure 72. Aperçu des MFE de la tronçonneuse (à gauche) et de la cisaille (à droite) pour la phase de vie d'utilisation

Le tableau 21 présente un extrait des résultats de l'identification des phénomènes dangereux. On peut remarquer que dans cette version intermédiaire, les résultats obtenus mélangeaient les types des phénomènes dangereux avec les conséquences. Les protections choisies par les concepteurs des machines apparaissent dans la dernière colonne.

Tableau 21. Extrait des résultats obtenus par l'application de cette version intermédiaire d'EZID sur la tronçonneuse

Composant	Energie	Phénomènes dangereux potentiels	Mesure de protection mise en place
Disque	Méca	coincement	Capot mobile & EPI
		entrainement	
		coupure/sectionement	
		abrasion	
	Thermique	brûlure	
	Sonore	risques liés au bruit	
	Vibratoire	risques liés aux vibrations	
Arbre de transmission	Méca	coincement	
		entrainement	
		happement	
	Sonore	risques liés au bruit	
	Vibratoire	risques liés aux vibrations	

7.1.3. Conclusion

Au travers de cette expérience apparaissent plusieurs constats :

- Les éléments de modélisation ajoutés dans le MFE par rapport au MFS de Constant/Roucoules complexifient la lecture du modèle et n'apporte pas de nouvelles informations (les flux d'énergies étant déjà modélisés au travers des liaisons et des associations internes). Il a donc été décidé, dans le cadre du développement d'EZID, de reprendre le MFS comme base de modélisation, et de compléter les éléments qui le manipulent (opérateurs, règles, etc.) en conservant les constituants de la représentation (frontière, liaisons, etc.) ;
- Les phénomènes dangereux identifiés sont seulement organisés par sous-systèmes, mais aucune priorité de traitement n'a été proposée entre eux ;
- L'informatisation de l'approche est préconisée par les étudiants.

7.1.4. Application d'EZID sur une machine existante

Un deuxième PJM a été réalisé afin d'actualiser les résultats précédemment obtenus (modélisation, identification des phénomènes dangereux) mais aussi pour :

- analyser d'autres phases de vie ;
- identifier de façon détaillée les conséquences potentielles des phénomènes dangereux mécaniques.

7.1.4.1. Application du MFE étendu

A partir des résultats précédents, la seconde expérimentation a permis la réalisation des MFS correspondant aux phases de vie d'utilisation, de maintenance et de montage de la tronçonneuse. Ces modèles sont respectivement représentés en figure 73, 74 et 75.

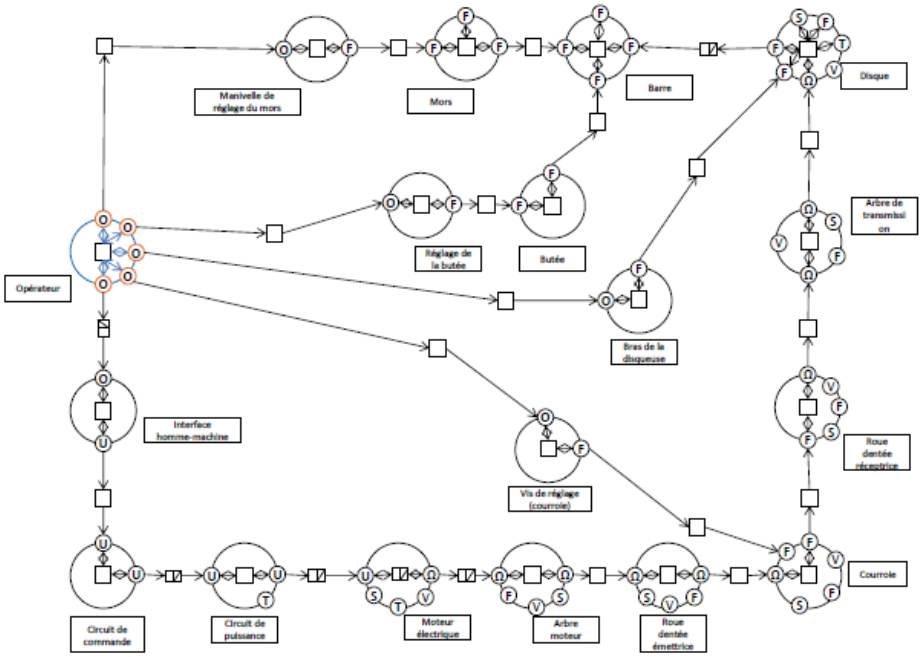


Figure 73.Aperçu du MFE pour l'utilisation

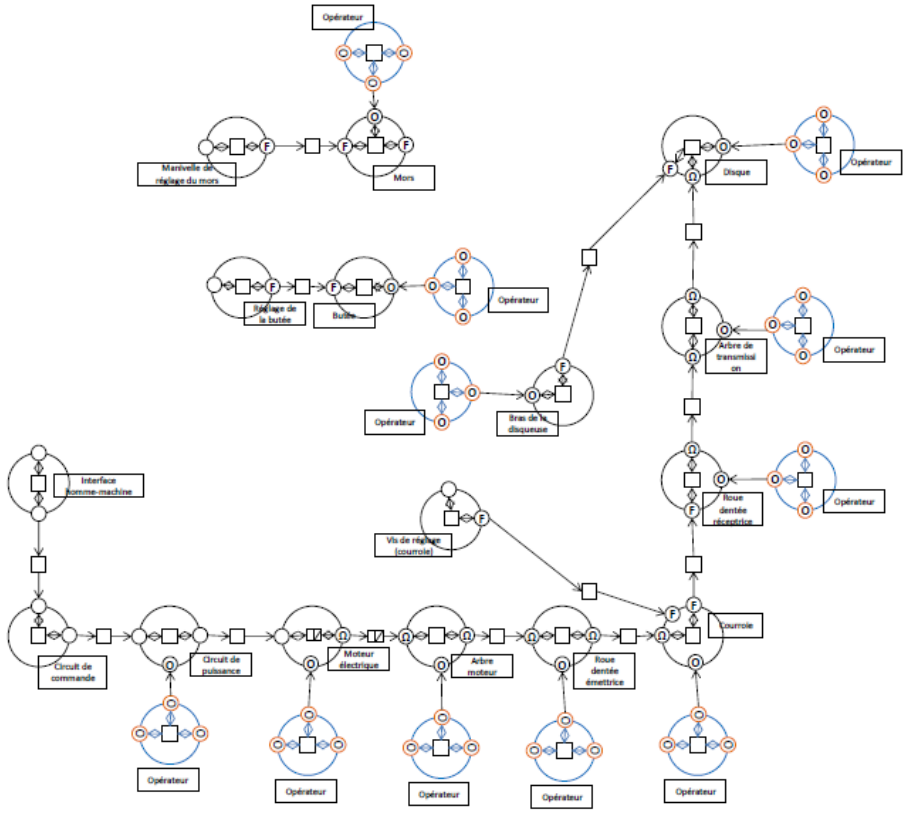


Figure 74.Aperçu du MFE pour la maintenance

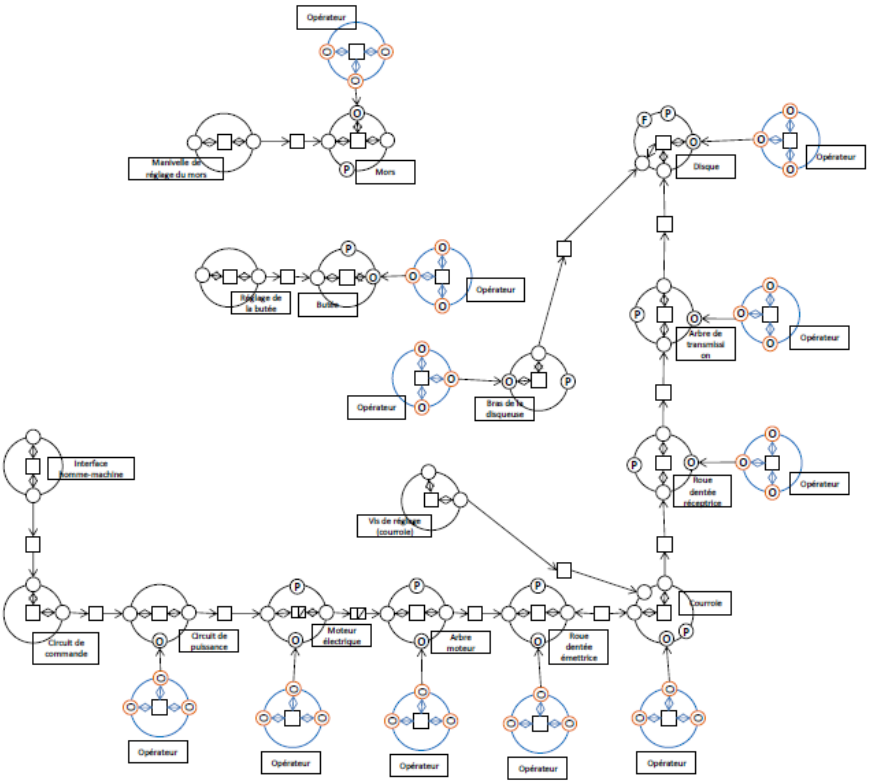


Figure 75.Aperçu du MFE pour le montage

7.1.4.2. Résultats

Ce second PJM a fait apparaitre plus d'informations vis-à-vis des phénomènes dangereux et des paramètres de conception mis en jeu. Un extrait est présenté dans le tableau 22. A partir des paramètres énergétiques, intrinsèques (PI), de position (PP) et géométriques (PG) renseignés dans le modèle de données des MFS, les étudiants ont été capables d'exploiter les combinaisons logiques définies dans le chapitre 3.

7.1.4.3. Conclusion

Lors de cette deuxième application, il a été constaté que :

- La modélisation, l'identification des types de phénomènes dangereux et des conséquences ont été réalisées sans problème ;
- Il est nécessaire d'organiser le retour d'informations au concepteur ;
- Il est nécessaire de formaliser la manière dont doit être modélisé le MFS pour la phase de vie d'assemblage ;
- L'informatisation de l'approche a été encore une fois préconisée.

Cette expérimentation a montré qu'il était possible et utile de réaliser les MFS de la machine dans plusieurs de ses phases de vie. L'identification des conséquences a également été vérifiée durant ce projet. Le MFS est donc applicable sur une machine dont toutes les caractéristiques sont connues.

Tableau 22. Extrait des résultats de l'identification des phénomènes dangereux obtenus

Composant	Surface fonctionnelle	Phase de conception initiale					Phase de conception détaillée						Phénomène dangereux potentiel
	Lien	Type d'énergie	P.J			P.E			P.G		P.P		
Disque	Disque - opérateur	Energie mécanique	Masse volumique	Matière		Couple	Diamètre	épaisseur	forme	masse	Degré de liberté	distance/opérateur	Coupure, entrainement, abrasion
	Disque - opérateur	Energie thermique	Matière	conduction thermique	Température fusion/	Vitesse Température	isolation thermique	volume	masse			distance/opérateur	Brulûre
	Disque - opérateur	Energie sonore	Fréquence du son	Matière		Effort	isolation acoustique	volume	masse			distance/opérateur	Risques liés aux bruits
	Disque opérateur	Energie vibratoire	Fréquence de la vibration	Fréquence de résonance		Effort						distance/opérateur	Risques liés aux vibration
	Disque - arbre de transmission	Energie mécanique	Masse volumique	Matière		Couple	Diamètre	épaisseur	forme	masse	Degré de liberté	distance/opérateur	
	Disque - barre	Energie mécanique	Masse volumique	Matière		Force	Diamètre	épaisseur	forme	masse	Degré de liberté	distance/opérateur	
	Disque - bras de la disqueuse	Energie mécanique	Masse volumique	Matière		Effort	Diamètre	épaisseur	forme	masse	Degré de liberté	distance/opérateur	
Arbre de transmission	Arbre de transmission - disque	Energie mécanique	Masse volumique	Matière		vitesse couple	Diamètre	longueur	forme	masse	Degré de liberté	distance/opérateur	
	Arbre de transmission - opérateur	Energie mécanique	Masse volumique	Matière		vitesse couple	Diamètre	longueur	forme	masse	Degré de liberté	distance/opérateur	coincement, entrainement, happement
	Arbre de transmission - roue dentée	Energie mécanique	Masse volumique	Matière		vitesse couple	Diamètre	longueur	forme	masse	Degré de liberté	distance/opérateur	
	Arbre de transmission - opérateur	Energie sonore	Fréquence du son	Matière		Effort	isolation acoustique	volume	masse			distance/opérateur	Risques liés aux bruits
	Arbre de transmission - opérateur	Energie vibratoire	Fréquence de la vibration	Fréquence de résonance		Effort						distance/opérateur	Risques liés aux vibration

7.2. Application pratique d'EZID sur une perceuse à colonne

L'objectif de ce troisième PJM était de confronter le MFS et le principe d'identification des phénomènes dangereux par l'analyse des énergies durant la conception d'une perceuse à colonne, système jamais conçu par les étudiants (De La Fabrègue et al., 2015). Le projet comportait deux axes :

- Concevoir théoriquement une perceuse à colonne en suivant une démarche de conception développée par (Godot et al., 2014) combinant ingénierie système et conception systématique ;
- Application d'une version intermédiaire d'EZID sur les différents éléments intermédiaires générés;

7.2.1. Démarche suivie

Dans un premier temps, les étudiants ont suivi la démarche de conception proposée par (Godot et al., 2014). La figure 76 synthétise les premières activités qui permettent d'exprimer de manière exhaustive les fonctions d'un système. En suivant cette démarche, les étudiants ont pu réaliser un cahier des charges fonctionnel ainsi que le schéma cinématique du système qu'il devait concevoir.

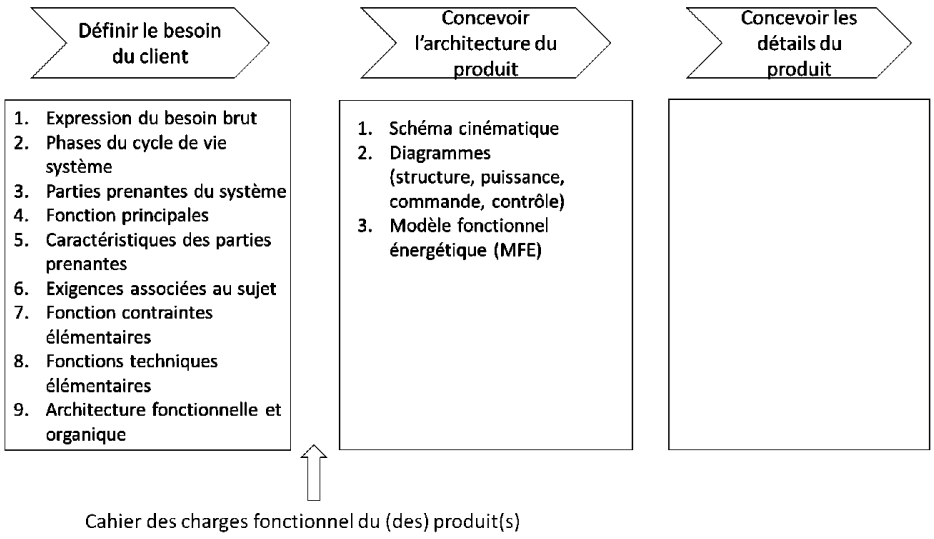


Figure 76. Processus de conception suivi par le groupe de PJM

Une fois ces éléments intermédiaires générés, ils ont ensuite appliqué la version intermédiaire d'EZID définir le MFS de la perceuse conçue. Sans indications particulières, les étudiants ont été capables de générés les MFS de la perceuse à colonne sur trois phases de vie différentes : utilisation, maintenance et transport. Le MFS de la perceuse à colonne durant sa phase d'utilisation est représenté en figure 77.

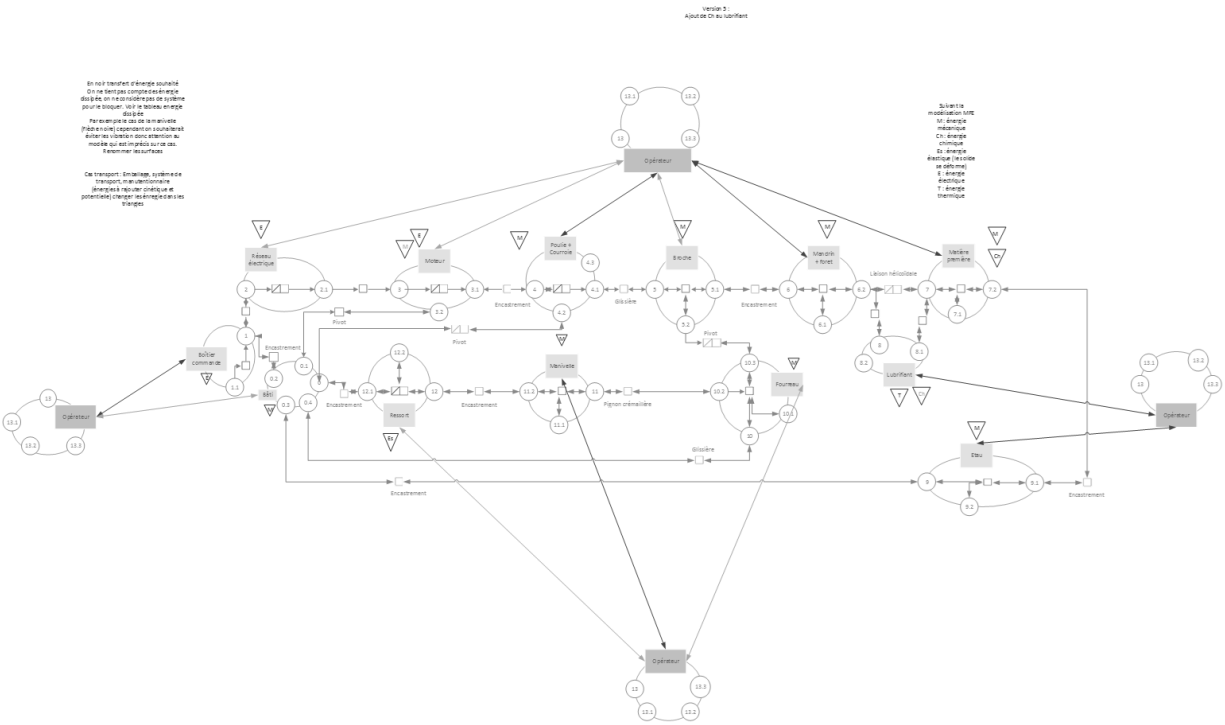


Figure 77. Aperçu du MFE de la perceuse à colonne en phase utilisation

7.2.2. Résultats

Durant ce travail, les étudiants ont pu identifier les types et les conséquences des phénomènes dangereux de façon progressive en remplissant les cases d'un tableur qu'ils avaient définis représenté en partie sur le tableau 22.

Tableau 23. Extrait des résultats de l'application d'une version intermédiaire d'EZID durant le processus de conception d'une perceuse à colonne

Définition du flux	Ordre d'énergie	Qualification de l'énergie	Indicateur primaire	Effort généralisé	paramètres géométriques	paramètres de position	paramètres intrinsèques	paramètres de diffusion	Gravité
Flux opérateur – réseau électrique	Electrique	Energie électrique/électrostatique	non détaillé						
Flux opérateur – moteur	Mécanique	Energie cinétique	Vitesse de déplacement	Couple (100 Nm, 10 fois plus qu'une perceuse à main)	clavette, géométrie de l'arbre (arêtes vives, épaulement, formes contondantes…)	100 tr/min	résistance mécanique : acier (210MPa)		Entraînement/emprisonnement ; Arrachement ;Choc ;
					roulements				Ecrasement, entraînement/emprisonnement
					état de surface de l'arbre, rugosité, non lubrification de l'arbre				brûlure par abrasion, choc
			(Bruit) Eléments utiles créant du bruit	Puissance de sortie : précisions d'informations non atteintes lors du projet	précisions d'informations non atteintes lors du projet	précisions d'informations non atteintes lors du projet	précisions d'informations non atteintes lors du projet	fréquence de fonctionnement : 100 tr/min, temps d'exposition 1min toutes les 3 min au maximum	trouble suite à une expostion prolongée (système auditif)
			(Bruit) Vitesse (d'un solide)	Couple (100 Nm à voir)	jeu, qualité de fabrication : non définis	arbre en rotation par rapport au bâti, fq 100 tr/min	précisions d'informations non atteintes lors du projet	précisions d'informations non atteintes lors du projet	trouble suite à une expostion prolongée (système auditif)
			(Vibration) Amplitude/Fréquence	précisions d'informations non atteintes lors du projet					Troubles musculo squelettique
	Electrique	Energie électrique/électrostatique	non détaillé						

Les résultats obtenus ont une nouvelles fois été comparés avec les protections présentes sur les perceuses à colonne commerciales. La cartérisation des machines commerciales protège la majorité des phénomènes dangereux identifiés durant ce PJM et d'autres tels que le protecteur mobile ou l'étau permette d'éloigner l'utilisateur des sources de phénomènes dangereux.

En plus de cela, les phénomènes dangereux liés au non-respect des principes ergonomiques identifiés dans les premières phases de conception sont toujours présents en fin de processus car aucune solution n'a été définie pour assister l'opérateur dans l'installation et l'évacuation des pièces à percer ou dans la manipulation de la colonne.

Ce PJM montre donc l'intérêt potentiel de l'application du d'EZID durant le processus de conception.

7.3. Conclusion sur les projets pédagogiques

Ces différents projets pédagogiques ont permis de confronter l'approche envisagée à différents cas d'étude (perceuse colonne, cisaille, tronçonneuse). Ainsi, si le premier PJM testait la première version du MFE, ce qui a validé la possibilité d'identifier les phénomènes dangereux à partir des paramètres énergétiques, le second a permis de tester les traitements permettant l'identification des conséquences à partir de combinaisons de paramètres énergétiques et complémentaires. Enfin, le troisième PJM a appliqué la méthode EZID (MFS + traitements) sur un processus de conception ce qui permis de montrer l'évolution dans la construction des phénomènes dangereux lors de chaque phase de conception.

Un des constats de ces applications académiques est que la majorité des phénomènes dangereux identifiés sont effectivement pris en compte par les fabricants car des protections existent. Cela montre la capacité du MFE à fournir des résultats pertinents vis-à-vis de l'identification des phénomènes dangereux.

Un autre constat est que le formalisme du MFS est aisément pris en main par des étudiants. Quelques indications de modélisation, notamment sur les phases de vie d'assemblage/désassemblage ont cependant été nécessaires, ainsi que pour la gestion de l'évolution du modèle. On peut donc envisager que cette étape de modélisation peut être aisément réalisées par des concepteurs expérimentés.

L'apparition d'éléments systématiques dans les différentes modélisations a motivé l'intérêt de définir des MFS pour des éléments génériques utilisés dans de nombreuses machines.

Ces travaux ont préparés l'application d'EZID sur un cas industriel en montrant les obstacles qui apparaissent durant son application. La partie suivante présente les résultats de cette application.

8. Annexe 8 : Equivalence MFS - IBD

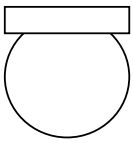
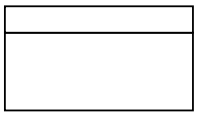
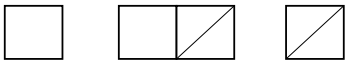
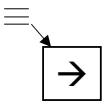
Fonction	MFS	IBD
Délimitation des composants	Frontière 	Bloc 
Interfaces d'échange	Surface fonctionnelle 	Port 
Caractéristiques d'un flux	Types des liaisons/association interne 	Données contenues dans le modèle de données de IBD 
Paramètre énergétique	Données contenues dans le modèle de données du MFS 	
Sens des flux	Flèche de la liaison/ association interne	Item flow 

Figure 78. Equivalence MFS - IBD

Bibliographie

AFIS. (2016). Association Française d'Ingénierie Système. from www.afis.fr

Ahmad, S. I., Hashim, H., & Hassim, M. H. (2015). A graphical method for assessing inherent safety during research and development phase of process design. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2015.09.018

Altshuller, G., Shulyak, L., & Rodman, S. (1997). 40 Principles: TRIZ keys to innovation (Vol. 1): Technical Innovation Center, Inc.

Amara, M. (2013). Master Recherche CII - Caractérisation en phases de conception générale et détaillée du niveau de rique d'un équipement de travail: Arts et Métiers Paristech Metz - LCFC - INRS.

Annuaire (2015) Annuaire des entreprise de France - Codes NAF (rév. 2, 2008) 2573B, 2822Z, 2825Z, 2892A et B, 2803Z, 2841Z, 2849Z, 2891Z, 2892Z, 2893Z, 2894Z, 2895Z, 2896Z, 2899A et B, 3312Z, 3320B, 3320C et 7112B from www.aef.cci.fr

APTE (2016). Méthode APTE. from www.methode-apte.com

Arcane. (2016). Fournisseur de convoyeurs à bande. from www.arcanefrance.fr

Benizri, A., Henard, T., Roesler, S., & Schick, B. (2016). PJM - Analyse de modèles pour la sécurité industrielle.

Benjaoran, V., & Bhokha, S. (2010). An integrated safety management with construction management using 4D CAD model. Safety Science, 48(3), 395-403. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2009.09.009

Blizzard, J. L., & Klotz, L. E. (2012). A framework for sustainable whole systems design. Design Studies, 33(5), 456-479. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2012.03.001

Bluff, E. (2015). Safety in machinery design and construction: Knowledge and performance. Safety Science, 74, 59-69.

Borutzky, W. (2009). Bond graph methodology: development and analysis of multidisciplinary dynamic system models: Springer Science & Business Media.

Boujut, J.-F., & Blanco, E. (2003). Intermediary objects as a means to foster co-operation in engineering design. Computer Supported Cooperative Work (CSCW), 12(2), 205-219.

Bovea, M. D., & Pérez-Belis, V. (2012). A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. Journal of Cleaner Production, 20(1), 61-71. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.012

Burlet-Vienney, D., Chinniah, Y., Bahloul, A., & Roberge, B. (2015). Design and application of a 5 step risk assessment tool for confined space entries. Safety Science, 80, 144-155. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.07.022

Cacciabue, P. C. (2004). Human error risk management for engineering systems: a methodology for design, safety assessment, accident investigation and training. Reliability Engineering & System Safety, 83(2), 229-240. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2003.09.013

Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (2013). AHP-based methodology for selecting safety devices of industrial machinery. Safety Science, 53(0), 202-218. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2012.10.006

Chinniah, Y. (2015). Analysis and prevention of serious and fatal accidents related to moving parts of machinery. Safety Science, 75, 163-173. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.02.004

Cocca, P., Marciano, F., & Alberti, M. (2016). Video surveillance systems to enhance occupational safety: A case study. Safety Science, 84, 140-148. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.005

Constant, D. (1996). Thèse - Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques. Université de Grenoble 1.

Coulibaly, A., Houssin, R., & Mutel, B. (2008). Maintainability and safety indicators at design stage for mechanical products. Computers in Industry, 59(5), 438-449. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2007.12.006

CRAMIF (2003). Guide de prévention du risque chimique : De l'évaluation des risques chimiques à la mise en œuvre des mesures de prévention.

Cross, N., & Roy, R. (1989). Engineering design methods (Vol. 2): Wiley New York.

Cyprès. (2016). Centre d'information pour la prévention des risques majeurs - Risques technologiques - Risque industriel. from http://www.cypres.org/risques-technologiques/risque-industriel/

Daille-Lefèvre, B., Fadier, E., Marsot, J., Roignot, R., & Falconnet, E. (2012). Sécurité des machines : proposition d'une démarche de spécifications basée sur l'analyse fonctionnelle du besoin et la notion de situation de travail. Lambda Mu 18.

de Galvez, N. (2015a). Identification et caractérisation du niveau de risque des situations de travail. Paper presented at the Journée "jeunes ingénieurs et jeunes chercheurs", Paris, France.

de Galvez, N. (2015b). L'identification des phénomènes dangereux d'un équipement de travail par l'analyse de la construction de ses flux énergies. Paper presented at the 21ème journée STP du GDR MACS, Nantes, France.

de Galvez, N., Amara, M., Marsot, J., Martin, P., & Baudouin, C. (2014). Caractérisation en conception générale et détaillée du niveau de risque d'un équipement de travail. Paper presented at the Lambda Mu 19, Dijon, France.

de Galvez, N., Marsot, J., Martin, P., & Godot, X. (2015). Détection et retour d'information sur les phénomènes dangereux durant le processus de conception. Paper presented at the AIP Primeca 2015, La Plagne, France.

de Galvez, N., Marsot, J., Martin, P., Siadat, A., & Etienne, A. (2016a). Proposition of an Approach Applicable During the Design Process of Working Equipment to Identify Potential Hazards for Workers. Procedia CIRP, 50, 258-263. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.080

de Galvez, N., Marsot, J., Martin, P., Siadat, A., Etienne, A., & Godot, X. (2016b). Design for Safety: Proposition of a Model to Detect Hazards through Energy Flows Analysis. Procedia CIRP, 41, 1107-1112. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.052

De La Fabrègue, A., Viot, P.-H., Poirier, G., Dias, F., & Akoto, M.-A. (2015). PJM - Application pratique d'un modelé de conception pour la caractérisation des phénomènes dangereux. Arts et Métiers ParisTech de Metz.

Delpanque, U., Henry-Lheureux, T., Phetsinorath, D., & Soudy, B. (2014). PJM - Inrs : Modélisation énergetique de machine.

Didelot, A. (2001). Thèse - Contribution à l'identification et au contrôle des risques dans le processus de conception. INPL, INRS.

Directive. (2000). Directive 2000/54/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents biologiques au travail.

Directive. (2001). Directive 2001/59/CE de la commission du 6 août 2001 portant vingt-huitième adaptation au progrès techniques de la directive 67/548/CEE du conseil concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives relatives à la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses.

Directive. (2002). Directive 2002/44/CE du Parlement européen et du Conseil du 25 juin 2002 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (vibrations).

Directive. (2003). Directive 2003/10/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 février 2003 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (bruit).

Directive. (2006a). Directive 2006/25/CE du Parlement européen et du Conseil du 5 avril 2006 relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels).

Directive. (2006b). Directive 2006/42/CE du Parlement européen et du conseil du 17 mai 2006 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE (refonte). Journal officiel de l'Union européenne, L 527, 24-86.

Directive. (2009). Directive 2009/104/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 septembre 2009 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour l'utilisation par les travailleurs au travail d'équipements de travail.

Directive. (2013a). Directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 juin 2013 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques).

Directive. (2013b). Directive 2013/59/EURATOM du Conseil du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants et abrogeant les directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom et 2003/122/Euratom.

Dowlatshahi, S. (2001). The role of product safety and liability in concurrent engineering. Computers & Industrial Engineering, 41(2), 187-209. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352(01)00054-7

Drogoul, F., Kinnersly, S., Roelen, A., & Kirwan, B. (2007). Safety in design – Can one industry learn from another? Safety Science, 45(1–2), 129-153. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2006.08.004

Dulché, B. (2015). Application pratique d'un modèle de conception pour la caractérisation des phénomènes dangereux. Institut Supérieur d'Ingénierie de la Conception.

EPICEA. (2016). Base de données nationale et anonyme recensant des milliers de descriptifs d'accidents du travail mortels, graves ou significatifs pour la prévention. Retrieved from: http://epicea.inrs.fr

Fadier, E., & De la Garza, C. (2006). Safety design: Towards a new philosophy. Safety Science, 44(1), 55-73. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2005.09.008

Faisandier, A. (2011). Les bases de l'ingénierie de système. Ingénierie de système (document pédagogique), MAP Système.

Feng, Y. (2013). Effect of safety investments on safety performance of building projects. Safety Science, 59(0), 28-45. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2013.04.004

Gardeux, F., & Marsot, J. (2014). A 3-D interactive software tool to help VSEs/SMEs integrate risk prevention in workplace design projects. Safety Science, 62, 214-220. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2013.08.018

Garro, O., Salau, I., & Martin, P. (1995). Distributed Design Theory and Methodology in the Context of Concurrent Engineering. Concurrent Engineering : Research and Application, 3 N°1, 323-311.

Gero, J. S. (1990). Design prototypes: a knowledge representation schema for design. AI magazine, 11(4), 26.

Gero, J. S., & Kannengiesser, U. (2004). The situated function–behaviour–structure framework. Design Studies, 25(4), 373-391. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2003.10.010

Ghemraoui, R. (2009). Thèse - Méthodologie de conception innovante intégrant la sécurité des utilisateurs : application aux liaisons tracteur-outils. (Docteur de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan Mécanique - Génie Mécanique - Génie Civil), ENS Cachan (ENSC-2009-190)

Godot, X. (2013). Thèse - Interaction Projet/Données lors de la conception de produits multi-technologiques en contexte collaboratif. ENSAM.

Godot, X., Etienne, A., Siadat, A., & Martin, P. (2014). Methodology to develop a geometric modeling process according to collaborative constraints. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 1-17.

Hale, A., Kirwan, B., & Kjellén, U. (2007). Safe by design: where are we now? Safety Science, 45(1–2), 305-327. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2006.08.007

Hale, A. R., & Swuste, P. (1998). Safety rules: procedural freedom or action constraint? Safety Science, 29(3), 163-177. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0925-7535(98)00020-4

Hasan, R. (2002). Thèse - Contribution à l'amélioration des performances des systèmes complexes par la prise en compte des aspects socio-techniques dès la conception : proposition d'un modèle original de situation de travail pour une nouvelle approche de conception. École Doctorale IAEM (DFD Automatique et Production Automatisée), Université Nancy 1.

Hasan, R., Martin, P., & Bernard, A. (2001). L'intégration de l'approche TRIZ dans le processus d'utilisation du modèle générique de la situation de travail : cas d'une ligne d'imprimerie. Paper presented at the 4e Congrès International de Génie Industriel, Aix-Marseille

Hasan, R., Martin, P., & Bernard, A. (2004). Solving contradictions problems related to safety integration in design process. Paper presented at the Proceedings of the TRIZ Conference, University Henri Poincare, Faculty of Sciences, Vancouver Les Nancy.

Hassim, M. H., & Edwards, D. W. (2006). Development of a Methodology for Assessing Inherent Occupational Health Hazards. Process Safety and Environmental Protection, 84(5), 378-390. doi: http://dx.doi.org/10.1205/psep.04412

Hayns, M. R. (1999). The Evolution of Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Industry. Process Safety and Environmental Protection, 77(3), 117-142. doi: http://dx.doi.org/10.1205/095758299529947

Hu, J., Zhang, L., & Liang, W. (2012). An adaptive online safety assessment method for mechanical system with pre-warning function. Safety Science, 50(3), 385-399. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2011.09.018

INRS. (2016). Dossier - Conception et utilisation des équipements de travail. from http://www.inrs.fr/demarche/conception-utilisation-equipements-travail/ce-qu-il-faut-retenir.html

Janssens, J., Talarico, L., Reniers, G., & Sörensen, K. (2015). A decision model to allocate protective safety barriers and mitigate domino effects. Reliability Engineering & System Safety, 143, 44-52. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.05.022

Jeantet, A. (1998). Les objets intermédiaires dans la conception - Eléments pour une sociologie des processus de conception. Sociologie du Travail, n°3/98.

Jouffroy, D., Demor, S., Ciccotelli, J., & Martin, P. (1999). An approach to integrate safety at the design stage of numerically controlled woodworking machines Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering'98 (pp. 643-650): Springer.

Kirwan, B. (2007). Safety informing design. Safety Science, 45(1–2), 155-197. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2006.08.011

Kjellén, U. (2000). Prevention of accidents through experience feedback: Taylor and Francis.

Kjellén, U. (2007). Safety in the design of offshore platforms: Integrated safety versus safety as an add-on characteristic. Safety Science, 45(1–2), 107-127. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2006.08.012

Krishnan, V., Eppinger, S. D., & Whitney, D. E. (1997). A model-based framework to overlap product development activities. Management science, 43(4), 437-451.

Kriwet, A., Zussman, E., & Seliger, G. (1995). Systematic integration of design-for-recycling into product design. International Journal of Production Economics, 38(1), 15-22. doi: http://dx.doi.org/10.1016/0925-5273(95)99062-A

Kunitomi, K., & Shiozawa, S. (2004). Safety design. Nuclear Engineering and Design, 233(1–3), 45-58. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2004.07.010

Labrousse, M. (2004). Thèse - Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprise. Ecole centrale de Nantes.

Lamy, P., & Charpentier, P. (2009). ND 2305-214-09 Estimation des risques machines - Recensement des méthodes et subjectivités des paramètres de l'estimation. Hygiène et sécurité du travail, 214.

Le Coze, J.-c. (2013). Outlines of a sensitising model for industrial safety assessment. Safety Science, 51(1), 187-201. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2012.06.008

Legifrance (2012), Article L. 4121-2 du Code du Travail.

Le Moigne, J.-L. (1994). La théorie du système général: théorie de la modélisation: jeanlouis le moigne-ae mcx.

Leveson, N. (2004). A new accident model for engineering safer systems. Safety Science, 42(4), 237-270. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00047-X

Lhomme, W. (2007). Gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique. Lille 1.

Liu, H.-C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. Expert Systems with Applications, 40(2), 828-838. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010

Lormac (2016) LORMAC Automation. from www.lormac.fr

Lutters, E., van Houten, F. J. A. M., Bernard, A., Mermoz, E., & Schutte, C. S. L. (2014). Tools and techniques for product design. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 63(2), 607-630. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.010

Lyon, B. K., Popov, G., & Hanes, K. (2013). Improving Ergo IQ: A Practical Risk Assessment Model. Professional Safety, 58(12), 26-34.

Main, B. W., & McMurphy, K. J. (1998). Safer by design: Reducing hazards through better designs. Professional Safety, 43(2), 29.

Marsot, J. (2015). NT 26 - Prévention intégrée : quelles sont les pratiques des concepteurs de machines ? Hygiène et sécurité du travail, 239.

Martin P., Baudouin C., Daille-Lefèvre B., Godot X., Etienne A., Siadat A., Marsot J. (2012), "Prise en compte de la sécurité dès la conception du produit, expérience pédagogique" Paper presented at the 13e colloque national AIP PRIMECA, Le Mont Dore, France.

Martin, P., Lossent, L., Abt, L., & Brasset, F. (2004). Conception de machines spéciales : Méthodologie d'élaboration de cahier des charges. Mécanique & Industries, Editions Elsevier SAS, 5, 305-316.

Mathieu, L., & Marguet, B. (2001). Integrated Design Method to Improve Producibility based on Product Key Characteristics and Assembly Sequences. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 50(1), 85-88. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62077-0

Meerkamm, H. (1994). Design for X—A core area of design methodology. Journal of Engeering Design, 5(2), 165-181.

Mentes, A., & Ozen, E. (2015). A hybrid risk analysis method for a yacht fuel system safety. Safety Science, 79, 94-104. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.05.010

Mer, S., Jeantet, A., & Tichkiewitch, S. (1995). Les objets intermédiaires de la conception: modélisation et communication. Le communicationnel pour concevoir, 21-41.

Monreal, A., Burisch, M., Sanchez, M., Pérez, D., Villasante, C., Olabarrieta, E., . . . Olarra, A. (2014). EASY: An Innovative Design for Cost Effective Heliostats/Solar Fields. Energy Procedia, 49, 174-183. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.019

Nadi, N. (2016a). Comparaison de solutions pour assister les concepteurs de machines à l'identification des phénomènes dangereux à l'aide de graphes. Université de Lorraine: Inrs.

Nadi, N. (2016b). Développement d'un outil pour assister les concepteurs de machines à l'identification des phénomènes dangereux. Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique.

Norme. (2002). NF EN ISO 5349 - Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main - Vibrations mécaniques. AFNOR.

Norme. (2008a). NF EN 1005 - Sécurité des machines - Performance physique humaine. AFNOR.

Norme. (2008b). NF EN 62471 - Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes. AFNOR.

Norme. (2008c). NF EN ISO 13732, NF X35-112 - Ergonomie des ambiances thermiques - Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces. AFNOR.

Norme. (2009a). NF EN 60204 - Sécurité des machines - Equipement électrique des machines. AFNOR.

Norme. (2009b). NF EN ISO 9612 - Acoustique - Détermination de l'exposition au bruit en milieu de travail - Méthode d'expertise. AFNOR.

Norme. (2010a). NF EN 12268 - Machines pour les produits alimentaires - Scies à ruban - Prescriptions relatives à la sécurité et à l'hygiène. AFNOR. 34.

Norme. (2010b). NF EN ISO 12100 - Sécurité des machines - Principes généraux de conception. AFNOR.

Norme. (2014a). NF EN 60825 - Sécurité des appareils à laser. AFNOR.

Norme. (2014b). NF ISO 2631 - Vibrations et chocs mécaniques - Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps. AFNOR.

Norme. (2015). NF EN ISO 13850 - Sécurité des machines - Fonction d'arrêt d'urgence - Principes de conception. AFNOR.

OMG SysML™ (2015). SysML v1.4 Specification. from http://www.omgsysml.org/

Pahl, G., & Beitz, W. (1977). Engineering design - A systematic approach.

Paynter, H. M. (1961). Analysis and Design of Engineering Systems (T. M. I. T. Press Ed.).

Petti, D. A., Merrill, B. J., Moore, R. L., Longhurst, G. R., El-Guebaly, L., Mogahed, E., . . . Abdou, A. (2006). ARIES-AT safety design and analysis. Fusion Engineering and Design, 80(1–4), 111-137. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.06.351

Prévention (2012). Officiel Prévention Santé et Sécurité au Travail. from http://www.officiel-prevention.com/

Rausand, M., & Bouwer Utne, I. (2009). Product safety – Principles and practices in a life cycle perspective. Safety Science, 47(7), 939-947. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2008.10.004

Ronchetti, M., Di Tecco, C., Russo, S., Castaldi, T., Vitali, S., Autieri, S., . . . Iavicoli, S. (2015). An integrated approach to the assessment of work-related stress risk: Comparison of findings from two tools in an Italian methodology. Safety Science, 80, 310-316. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.08.005

Roucoules, L. (1999). Thèse - Méthodes et connaissances : contribution au développement d’un environnement de conception intégrée. Institut National Polytechnique de Grenoble.

Roucoules, L., Eynard, B., Nowak, P., & Skander, A. (2006). Une approche au juste nécessaire de l'intégration métier, en conception vers des solutions alternatives innovantes: ed HERMES.

Sadeghi, L. (2014). Thèse - Aide à la décision pour l'intégration de la sécurité au plus tôt en phase de conception - Approche innovante de reconception de machines Ecole normale supérieure de Cachan.

Sadeghi, L., Mathieu, L., Tricot, N., & Al Bassit, L. (2015). Developing a safety indicator to measure the safety level during design for safety. Safety Science, 80, 252-263. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.08.006

Sadeghi, L., Siadat, A., Marsot, J., & Dantan, J.-Y. (2016). Design for Human Safety in Manufacturing System: A Review of Applications of Design Theories and Methodologies (DTM) and Design Tools and Techniques (DTT). Journal of engineering design.

Scaravetti, D., Nadeau, J.-P., Pailhès, J., & Sebastian, P. (2005). Structuring of embodiment design problem based on the product lifecycle. International Journal of Product Development, 2(1-2), 47-70.

Schmidt, M. (2006). Der Einsatz von sankey-diagrammen im stoffstrommanagement: Beiträge der Hochschule Pforzheim.

Schupp, B., Hale, A., Pasman, H., Lemkovitz, S., & Goossens, L. (2006). Design support for the systematic integration of risk reduction into early chemical process design. Safety Science, 44(1), 37-54. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2005.09.002

Shahrokhi, M. (2006). Thèse - Intégration d'un modèle de situation de travail pour l'aide à la formation et à la simulation lors de la conception et l'industrialisation de systèmes. École Centrale de Nantes et Université de Nantes.

Shahrokhi, M., & Bernard, A. (2005). Modelling of the occupational hazards entities in a general model of products, processes and resources. Paper presented at the 6e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation - MOSIM'06, 3 -5 April 2006, Rabat, Morocco.

Shahrokhi, M., & Bernard, A. (2009). A framework to develop an analysis agent for evaluating human performance in manufacturing systems. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2(1), 55-60. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2009.08.002

Sohlenius, G. (1992). Concurrent engineering. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 41(2), 645-655.

Statistiques (2015). Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés Direction des Risques Professionnels - Mission Statistiques. Statistiques sur la sinistralité de l'année 2014, suivant la nomenclature d'activités française (NAF)

Su, X., Deng, Y., Mahadevan, S., & Bao, Q. (2012). An improved method for risk evaluation in failure modes and effects analysis of aircraft engine rotor blades. Engineering Failure Analysis, 26, 164-174. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.009

IGL Technology, Jaulent, P., & Galinier, M. (1989). SADT: un langage pour communiquer: Eyrolles.

Tichkiewitch, S., & Veron, M. (1997). Methodology and product model for integrated design using multiview system. Annals of the CIRP, 46/1.

Tixier, J., Dusserre, G., Salvi, O., & Gaston, D. (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 15(4), 291-303. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00008-6

Tollenaere, M. (1998). Conception de produits mécaniques: méthodes, modèles et outils: Hermes.

Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., & Kimura, F. (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58(2), 543-565. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.003

Vijayan, A., Islam, S., Jones, M., Padhye, R., & Arnold, L. (2016). Degradation of fluorescent high-visibility colors used in safety garments for the Australian railway industry. Journal of Safety Research, 56, 1-7. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jsr.2015.11.008

Vink, P., Urlings, I. J. M., & van der Molen, H. F. (1997). A participatory ergonomics approach to redesign work of scaffolders. Safety Science, 26(1–2), 75-85. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0925-7535(97)00030-1

Wilson, P. F., Dell, L. D., & Anderson, G. F. (1993). Root Cause Analysis: A Tool for Total Quality Management. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press.

Zhou, W., Whyte, J., & Sacks, R. (2012). Construction safety and digital design: A review. Automation in Construction, 22, 102-111. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2011.07.005

Zimmer, l., & Zablit, P. (2001). Global aircraft predesign based on constraint propagation and interval analysis. Paper presented at the CEAS Conference on multidisciplinary Aircraft design and Optimisation, Köln, Germany.

Zimolong, B., & Elke, G. (2006). Occupational health and safety management. Handbook of human factors and ergonomics, 673-707.

SECURITE DES MACHINES : METHODOLOGIE D'IDENTIFICATION SYSTEMATIQUE DES PHENOMENES DANGEREUX EN CONCEPTION

RÉSUMÉ :

LES CONCEPTEURS DE MACHINES DOIVENT PRENDRE EN CONSIDERATION DIFFERENTS ASPECTS, NOTAMMENT LA SANTE-SECURITE DES FUTURS UTILISATEURS. DANS CE DOMAINE, LA DIRECTIVE EUROPEENNE 2006/42/CE DEFINIT UNE DEMARCHE DITE DE « PREVENTION INTEGREE » AFIN D'OBTENIR LE NIVEAU DE RISQUE LE PLUS FAIBLE POSSIBLE SELON L'ETAT DE LA TECHNIQUE. LA MISE EN PRATIQUE DE CETTE DEMARCHE EST CEPENDANT ENCORE IMPARFAITE, EN PARTICULIER VIS-A-VIS DE L'ETAPE D'IDENTIFICATION DES PHENOMENES DANGEREUX POUR LAQUELLE IL N'EXISTE PAS D'OUTIL FORMALISES. AFIN DE PALLIER A CETTE DIFFICULTE, UNE APPROCHE ORIGINALE APPELEE EZID EST PRESENTEE DANS CE MEMOIRE DE THESE.

BASEE SUR L'HYPOTHESE QUE LES PHENOMENES DANGEREUX SONT LIES A LA PRESENCE D'ENERGIES, EZID S'APPUIE SUR LE MODELE FONCTIONNO-STRUCTUREL POUR DISTINGUER LES SOURCES ET FLUX D'ENERGIES, AINSI QUE SUR TROIS TRAITEMENTS DES PARAMETRES DE CONCEPTION POUR IDENTIFIER CHAQUE CARACTERISTIQUE DES PHENOMENES DANGEREUX POTENTIELS. L'APPLICATION D'EZID SUR DES DONNEES INDUSTRIELLES A MONTRE QU'ELLE PERMET UNE INDENTIFICATION SYSTEMATIQUE DES PHENOMENES DANGEREUX TOUT AU LONG DU PROCESSUS DE CONCEPTION. UN DEMONSTRATEUR A ETE DEVELOPPE ET A EGALEMENT MONTRE QU'IL ETAIT POSSIBLE D'AUTOMATISER LES DIFFERENTS TRAITEMENTS DE LA METHODE. AVEC EZID, LE CONCEPTEUR EST INFORME DES PHENOMENES DANGEREUX POTENTIELS DES LEUR APPARITION.

Mots clés : Sécurité des machines, processus de conception, analyse d'énergie

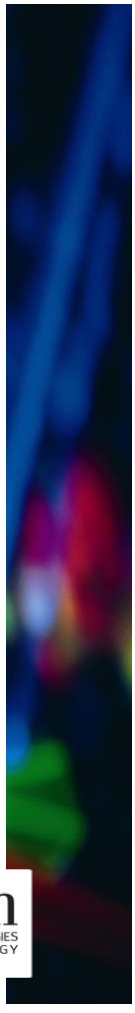
Machine safety : method for systematic hazard identification during design

ABSTRACT :

MACHINE DESIGNERS MUST TAKE INTO ACCOUNT SEVERAL ASPECTS OF PRODUCTS SUCH AS THE OCCUPATIONAL SAFETY OF THE FUTURE USERS. EUROPEAN DIRECTIVE 2006/42/CE PROMULGATES AN APPROACH CALLED "INTEGRATED PREVENTION" TO OBTAIN THE LOWEST RISK LEVEL POSSIBLE ACCORDING TO THE STATE OF THE ART. HOWEVER, THE APPLICATION OF THIS APPROACH IS NOT PERFECT, ESPECIALLY FOR THE HAZARD IDENTIFICATION STEP THAT DOES NOT HAVE STRUCTURED METHODS OR TOOLS. TO SOLVE THIS PROBLEM, AN ORIGINAL APPROACH CALLED EZID IS PRESENTED IN THIS REPORT.

BASED ON THE HYPOTHESIS THAT HAZARDS ARE LINKED TO THE PRESENCE OF ENERGIES, EZID USED THE FUNCTIONAL-STRUCTURAL MODEL TO DISTINGUISH EVERY ENERGY SOURCE AND FLOW, AND THREE PROCESSES ON THE DESIGN PARAMETERS TO IDENTIFY EVERY POTENTIAL HAZARD CHARACTERISTIC. THROUGH ITS APPLICATION ON INDUSTRIAL DATA, EZID SHOWED THAT IT ALLOWED A SYSTEMATIC HAZARD IDENTIFICATION ALL ALONG THE DESIGN PROCESS. A SOFTWARE PROTOTYPE WAS DEVELOPED AND PROVED THAT IT IS POSSIBLE TO AUTOMATIZE THE PROCESSES OF THE METHOD. BY USING EZID, THE DESIGNER RECEIVES INFORMATION ABOUT POTENTIAL RISKS FROM THEIR CREATION.

Keywords : **Machine safety, design process, energy analysis**



ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY