

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 "Génie Industriel"

présentée et soutenue publiquement par

Mathieu Baudin

le 22 septembre 2014

Piloter la Complexité :

**Utilisation de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen
pour la planification collaborative**

Directeur de thèse : **Jean-Michel RUIZ**
Co-encadrement de la thèse : **Pierre BONNAL**

Jury

M. Améziane AOUSSAT, Professeur, LCPI, Arts et Métiers ParisTech
M. Didier GOURC, Professeur, Centre de recherche Génie Industriel, Mines D'Albi-Carmaux
Mme Julie LE CARDINAL, Professeur, Laboratoire Génie Industriel, École Centrale Paris
M. Pierre BONNAL, Ingénieur, Département d'Ingénierie, CERN
M. Manuel FERRE, Professeur, Centro de Automática y Robótica, Universidad Politécnica de Madrid
M. Jean-Michel RUIZ, Professeur, École Centrale Marseille
Mme Doris FORKEL-WIRTH, Physicienne, groupe de radioprotection, CERN

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Invitée

**T
H
È
S
E**

Remerciements

Une seule page est certainement bien peu pour remercier tous ceux qui m'ont soutenu pendant mes trois ans de thèse, personnellement comme professionnellement. Car si j'ai écrit seul cette thèse, nombreux sont ceux qui m'ont accompagné tout au long de mon travail.

Je vais débiter à l'origine de ma thèse, et remercier tout d'abord la Commission Européenne et ses Marie Curie Actions pour avoir financé le Projet PURESAFE dont ma thèse a fait partie. Par la même occasion, je remercie les coordinateurs du projet pour m'avoir donné l'opportunité d'y participer.

Ma présence au sein de PURESAFE n'aurait cependant jamais eu lieu sans l'appui de mon directeur de thèse Jean-Michel Ruiz qui m'a révélé son existence, invité à postuler, puis accompagné pendant mes trois ans de travail malgré la distance géographique. De même, je tiens à remercier chaleureusement Pierre Bonnal, mon superviseur dans PURESAFE et au CERN, ainsi que co-encadrant de thèse, pour sa présence à mes côtés, son engagement remarquable au quotidien dans ma recherche et mes projets, son assistance, et ses nombreux enseignements pendant toute la durée de mon travail.

D'un point de vue académique à présent, je tiens à remercier le Professeur Amé-
ziane Aoussat, président de mon jury de soutenance et directeur Laboratoire de
Conception de Produit et Innovation (LCPI), pour m'avoir accueilli pendant trois
ans au sein du LCPI, et m'avoir ainsi permis d'effectuer mon doctorat au sein d'un
établissement aussi prestigieux et chargé d'histoire que l'École Nationale Supérieure
d'Arts et Métiers, une école qui représente également pour moi l'histoire de ma
famille, ayant eu un grand-père Gadzart.

Mes plus sincères remerciements vont enfin aux membres de mon jury, pour
avoir fait le déplacement pour ma soutenance et pour avoir lu mes travaux. Je
remercie donc mes deux rapporteurs, les professeurs Julie Le Cardinal et Didier
Gourc, pour leur lecture avisée et leurs commentaires détaillés et constructifs. Je
remercie également le professeur Manuel Ferre d'avoir fait le déplacement depuis
Madrid pour assister à une soutenance multilingue mais sans espagnol, ainsi que
Doris Forkel-Wirth d'être venue du CERN écouter ma soutenance et refermer la
boucle après avoir fait partie de mon comité de recrutement au CERN.

Je tiens enfin, et probablement comme beaucoup, à terminer ces remerciements
sur une note personnelle, en y incluant ma famille et mes amis qui ont été à mes
côtés jusque durant la matinée fatidique de ma soutenance.

Mes parents, bien entendu, pour m'avoir donné le goût du travail, de la science,
de la recherche, mais aussi de la musique et de la harpe, et d'une façon générale
pour avoir fait de moi celui que je suis aujourd'hui.

Laetitia, pour ta présence à mes côtés. Merci de m'avoir soutenu et supporté pendant ces trois ans, pendant ma présence, mes absences parfois prolongées et ma rédaction.

Mon grand frère Clément (que je peux enfin appeler Jack dans une thèse de second cycle avec soulagement et satisfaction), avec qui j'ai tout partagé pendant des années, depuis la chambre et les jouets jusque, désormais, au grade de docteur. Ma petite sœur Louise, qui a pendant de longues années subi le développement de ma vocation d'enseignant chercheur en tant que cobaye privilégié.

Ma Mamie Couec, pour s'être énormément occupée de moi depuis bien longtemps, et avoir eu malgré cela encore l'envie et le courage de venir m'écouter parler de sciences une matinée de plus, en surmontant la barrière des langues. Ma tante Sylvie, également, dont le domaine de prédilection est bien éloigné des radiations et des algorithmes, tout comme nos discussions habituelles bien plus littéraires. Ma cousine Laura qui a également fait le déplacement pour venir m'écouter en pleine période de déménagement.

J'ai une pensée émue pour mes grand-parents absents en ce jour. Robert, Jean et Cécile, que j'aurais aimé avoir dans la salle avec toute ma famille le 22 septembre 2014.

Un grand merci à Claire pour avoir relu et corrigé intégralement ma thèse (et à plusieurs reprises qui plus est) avec un souci du détail de circonstance, ainsi qu'à Bertrand Nicquevert pour ses nombreux conseils avisés, ainsi que la lecture et la correction de mon manuscrit et de ma présentation finale.

Merci à Mélanie pour son aide précieuse à la préparation culinaire de ma soutenance et pour sa présence à celle-ci.

Un grand merci enfin à Benoit et à mes nombreux amis de lycée, de classe préparatoire et d'école d'ingénieur, d'être venus nombreux et parfois par surprise à ma soutenance remplir la salle et profiter avec moi de cet instant particulier, ainsi que du somptueux buffet qui allait avec : Céline, Cédric, Benjamin, Pierre (malgré son audit), Nolwenn (malgré la surcharge de travail), Mengxue, Pierrick, Romain, mais aussi Raphaël et Minh.

Table des matières

1	Le CERN : un environnement collaboratif de planification	1
1.1	Introduction	1
1.2	Notre terrain de jeu : le CERN	3
1.2.1	L'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire	3
1.2.2	Les installations du CERN	4
1.2.3	Pourquoi planifier ?	5
1.2.4	Le travail collaboratif au CERN	7
1.3	Modèle générique du mémoire et contribution à une nouvelle approche de la planification	8
1.3.1	Présentation systémique des trois dimensions de cette thèse	8
1.3.2	Notre nouvelle approche de la planification	10
1.3.3	De la théorie à la pratique : notre démarche	11
2	Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants	13
2.1	Interventions dans des milieux présentant des risques	13
2.1.1	Différentes situations, questionnements identiques	14
2.1.2	Installations scientifiques émettant des rayonnements ionisants : le cas du CERN	18
2.2	Quelques bases de physique nucléaire et de radioprotection	19
2.2.1	Qu'est-ce que la radioactivité ?	20
2.2.2	Les différents rayonnements ionisants	24
2.2.3	Effets biologiques des radiations et dosimétrie	29
2.3	Le principe ALARA : optimisation des interventions en milieux ionisants	35
2.3.1	Radioprotection et législation	35
2.3.2	L'approche ALARA : " <i>As Low As Reasonably Achievable</i> "	37
2.3.3	ALARA au CERN	39
2.4	Simulation des champs de radiations par les codes de calcul Monte Carlo	40
2.4.1	Estimation des champs de radiations	40
2.4.2	Utilisation de FLUKA et exemple de la zone TCC2 au CERN	44
2.5	Conclusions sur les interventions en milieux présentant des rayonnements ionisants	51
3	Vers une planification d'intervention collaborative	53
3.1	Planifier en collaboration	53
3.1.1	Définissons l'environnement collaboratif de planification	54
3.1.2	La complexité omniprésente	57
3.2	Un bref historique de la planification et de la modélisation de processus	59

3.2.1	Du qualitatif à l'analytique	59
3.2.2	Échéancement et ordonnancement	61
3.2.3	Planification en intelligence artificielle	63
3.2.4	Méthodes de modélisation de processus	69
3.3	Le choix des méthodes	73
3.3.1	Modèle ontologique et choix des critères	74
3.3.2	Notre échantillon complet	81
3.3.3	Un choix mettant la complexité en valeur	83
3.4	Conclusions sur le choix des méthodes	89
4	La DSM collaborative, algorithmes et description	91
4.1	Traiter contraintes et couplages : combinaison de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen	91
4.1.1	L'algèbre d'intervalles d'Allen	92
4.1.2	DSM	98
4.2	Analyse du processus collaboratif de planification	103
4.2.1	Les différentes tâches envisagées	103
4.2.2	Optimisation des interventions	105
4.2.3	Prise en compte de la radioprotection	106
4.3	Fusion de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen	108
4.3.1	Structure des données	108
4.3.2	Collecte des contraintes et recherche de compromis	110
4.3.3	Construction de la DSM	116
4.3.4	Échéancement et choix des solutions	117
4.4	Bilan : processus collaboratif global et utilisation de la DSM Collaborative	119
5	Application : comparaison de scénarii d'intervention	121
5.1	GSI-FAIR et le Superconducting Fragment Separator (Super-FRS)	121
5.1.1	GSI-FAIR	121
5.1.2	Le Super-Séparateur de Fragments	123
5.2	Données pour la planification d'interventions dans le Super-FRS	132
5.2.1	Différents scénarii d'intervention	132
5.2.2	La séquence d'activités du scénario télé-opéré	134
5.2.3	Données de radioprotection et doses simulées	139
5.3	Résultats et discussions : comment planifier collaborativement ?	143
5.3.1	Utilisation d'un prototype d'application pour l'étude de cas	143
5.3.2	Présentation des résultats	146
5.3.3	De nombreux facteurs d'amélioration	150
5.3.4	Vers une planification collaborative	152
5.4	Conclusions sur cette première étude	153
6	Conclusion générale	155

Table des matières

Bibliographie	159
Liste des Abréviations	173
A Dosimétrie et effets biologiques des rayonnements ionisants	181
A.1 Liste et description des différentes unités de dosimétrie	181
A.2 Effets biologiques	184
A.3 Récapitulatif des exigences ALARA pour les interventions au CERN	186
B Méthodes de planification et de modélisation d'interventions	191
B.1 Méthodes de planification et de simulation de projet	191
B.2 Modélisation et simulation des processus	196
C Ontologie de Bunge Wand et Weber : définitions et évaluations	209
C.1 Définitions des éléments de l'ontologie	209
C.2 Évaluations ontologiques des méthodes de planification et de modélisation	211
D Aide à la décision multicritère avec la méthode ELECTRE I	221
D.1 Rapide introduction à l'Aide à la Décision Multicritère (AMCD) . .	221
D.2 La Méthode ELECTRE I	223
E Les algorithmes de la DSM Collaborative	227
E.1 Structure de données : la classe <i>Intervention</i>	227
E.2 Propagation	228
E.3 Compromis	232
E.4 Résolution du CSP	235
E.5 Séquençage de la DSM	237
E.6 Construction du Gantt à partir de la DSM	240
F Scenarii d'intervention au Super-FRS de FAIR	243
F.1 Scénario automatisé	243
F.2 Scénario télé-opéré	246
F.3 Scénario hybride	250

Le CERN : un environnement collaboratif de planification

Sommaire

1.1	Introduction	1
1.2	Notre terrain de jeu : le CERN	3
1.2.1	L'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire	3
1.2.2	Les installations du CERN	4
1.2.3	Pourquoi planifier ?	5
1.2.4	Le travail collaboratif au CERN	7
1.3	Modèle générique du mémoire et contribution à une nouvelle approche de la planification	8
1.3.1	Présentation systémique des trois dimensions de cette thèse	8
1.3.2	Notre nouvelle approche de la planification	10
1.3.3	De la théorie à la pratique : notre démarche	11

1.1 Introduction

Tout comme Monsieur Jourdain dans *Le Bourgeois Gentilhomme* de Molière fait de la prose sans en avoir conscience, nous effectuons chaque jour des activités complexes sans nécessairement en avoir conscience. Qu'il s'agisse d'actions concrètes comme la conduite d'une automobile, ou d'actions aux résultats plus intangibles comme de la planification ou de la stratégie, nous sommes capables, en réfléchissant ou en interagissant avec notre environnement, de résoudre au quotidien des problèmes complexes, seuls ou en collaboration. Tout au long du XX^e siècle, l'amélioration des technologies et leurs mises en œuvre ont donné naissance à des systèmes de plus en plus complexes, au cœur desquels les ingénieurs occupent un rôle central. Donc s'il peut paraître de prime abord un peu présomptueux d'écrire sur la complexité et son pilotage, il en va en réalité de l'éthique de l'ingénieur : le siècle passé, ainsi que celui qui commence, n'ont pas été exempts d'accidents et d'erreurs humaines. En étant amené à concevoir des systèmes complexes, l'ingénieur se doit de participer à la réflexion nécessaire à leur amélioration.

Piloter la complexité fait appel à une recherche constante du sens et de l'orientation qu'un système doit prendre. Dans une précédente thèse, Gilles Corriveau,

professeur à l'université du Québec, a montré que l'orientation d'un système dépend de cinq éléments majeurs qui interagissent les uns avec les autres et qui doivent orienter le pilotage de tout projet [Corriveau 1995, Corriveau 1996]. Le premier est externe à l'organisation hôte : il s'agit de l'environnement du projet. Les quatre autres sont quant à eux internes à l'organisation. Il s'agit du système de pouvoir, de la technologie, de la culture et de l'organisation interne. C'est naturellement sur ces derniers que nous avons porté toute notre attention, dans le cadre d'une organisation dont les projets dépassent par leur étendue et leur complexité le cadre usuel de la gestion de projet au sens traditionnel du terme : le CERN.

En tant que système sur lequel nous avons été amené à œuvrer, le CERN possède une quadruple particularité :

- il est le fruit d'un des plus vastes investissements mobilisés pour la recherche scientifique fondamentale à ce jour, sur une période de soixante ans ;
- il existe pour comprendre et valider des concepts de physique qui dépassent les limites de la connaissance actuelle : le boson de Higgs et la confirmation de son existence, dévoilée le 4 juillet 2012, en est un exemple éloquent ;
- il est d'une grande complexité culturelle et géopolitique, de par sa nature d'organisation internationale et donc des provenances multiples de ses acteurs ;
- il est organisé selon un cycle où des campagnes d'expérimentation s'étendant sur plusieurs années alternent avec des périodes de maintenance et de développement lourdes (s'étendant parfois également sur plusieurs années) qui doivent être menées en toute sûreté et sécurité.

Ces quatre aspects peuvent être rattachés aux quatre aspects internes traités par Corriveau. Ils régissent de façon immuable la vie de cette organisation. Mais la complexité générée constitue un défi colossal lorsqu'il s'agit de mener, ou selon notre titre, de piloter une telle organisation. Comment aborder cette tâche, qui dépasse le simple contexte de la rationalité d'un seul individu ? Telle est la problématique de notre thèse. Et pour l'aborder, nous avons choisi un traitement plus fin, en nous focalisant sur la notion d'intervention que nous venons de mentionner.

Tout au long de ce travail, il sera question de planification collaborative d'interventions dans des installations scientifiques émettant des rayonnements ionisants. Ce thème précisément énoncé nous invite à explorer trois principales dimensions. La première est l'étude de la collaboration en général et du travail collaboratif en particulier, problématique qui n'appartient pas à proprement parler au domaine des sciences qualifiées de “dures” comme les mathématiques ou la physique, mais plus à l'interface entre les sciences humaines et le génie industriel. Cependant, en tant qu'ingénieur, la collaboration a des conséquences tangibles sur nos travaux et il est tout à fait possible d'en observer les implications, notamment sur notre deuxième dimension, à savoir la planification, de par la complexité qu'elle génère et donc la nouveauté qu'elle apporte à ce domaine.

En effet, la planification a déjà livré beaucoup de ses secrets depuis la seconde moitié du XX^e siècle, pendant laquelle elle a été abondamment étudiée en management de projet et en intelligence artificielle comme nous le verrons au cours du chapitre 3. En revanche, il s'agit d'une discipline qui n'a jusqu'à aujourd'hui laissé

1.2. Notre terrain de jeu : le CERN

que peu de place au travail collaboratif, et de nombreux développements actuels portent sur cet aspect. Les grandes installations scientifiques comme les accélérateurs de particules du CERN, mais également celles d'autres laboratoires du même type comme celui de GSI-FAIR à Darmstadt en Allemagne, sont des environnements hautement collaboratifs de par la diversité des disciplines et des métiers auxquels ils font appel et la complexité (à la fois scientifique, technologique, organisationnelle voire géopolitique) des installations qu'ils renferment [Nicquevert 2013a].

Et parmi les spécificités de telles installations scientifiques, se trouve la troisième dimension de notre travail : l'activation de certains équipements par les faisceaux de particules circulant dans les accélérateurs. Ce phénomène engendre des rayonnements ionisants, ou radiations, auxquelles les personnes amenées à intervenir dans les installations vont être exposées. Pour des raisons évidentes de sécurité et de santé au travail, qui seront rappelées au cours de cette thèse, il est indispensable de minimiser cette exposition, et optimiser sa durée n'est qu'une possibilité parmi plusieurs.

C'est cette considération qui clôt notre énumération des thématiques de cette thèse, qui va donc s'attacher à étudier des méthodes de planification spécialement utiles en environnements de planification collaboratifs. Ces méthodes auront comme objectif ultime d'optimiser la planification non pas uniquement selon le critère de la durée, mais aussi en recherchant l'optimum en termes d'exposition aux rayonnements ionisants. Ainsi, ce travail introduit avec l'exposition aux radiations une criticité autre que le temps ou le coût dans la planification. Il introduit également le facteur humain dans les équations et les algorithmes par l'intermédiaire de la collaboration, et de l'optimisation des durées d'intervention.

1.2 Notre terrain de jeu : le CERN

1.2.1 L'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

L'essentiel du travail présenté dans cette thèse a été effectué au CERN. Fondé en 1952, pour établir l'Europe comme une puissance incontournable en termes de collaboration et de recherche scientifique, le CERN est une organisation internationale qui, comme son nom ne l'indique pas de prime abord, se consacre à la construction et à l'exploitation d'installations dédiées à la recherche en physique des particules. Initialement nommé Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, le CERN a changé de nom à l'issue de la ratification effective de sa constitution en 1954, tout en conservant son acronyme originel : désormais Organisation Européenne pour la recherche Nucléaire, on le rencontre également sous le nom de Laboratoire Européen pour la Physique des Particules, une appellation qui traduit bien mieux les activités et la recherche qui s'y déroulent. Le CERN est situé sur la frontière franco-suisse, et ses installations sont essentiellement des accélérateurs de particules dont son "vaisseau amiral", le Large Hadron Collider (LHC) est l'accélérateur de particules circulaire le plus grand du monde avec ses vingt-sept kilomètres de circonférence.

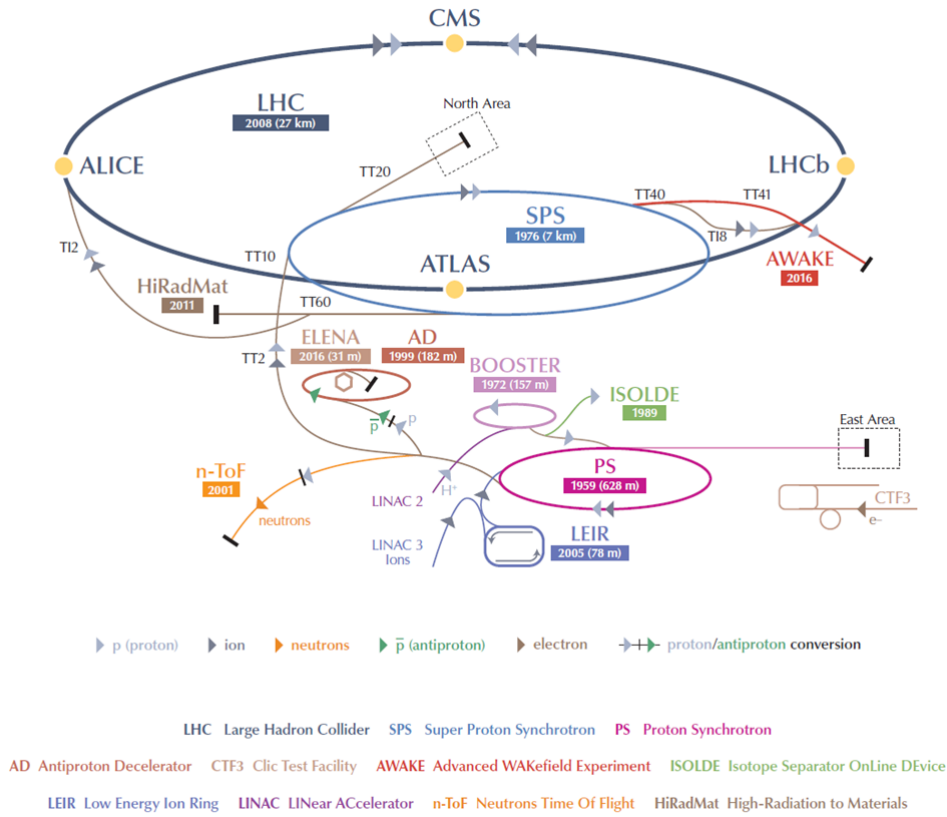


Figure 1.1 – Schéma du complexe d'accélérateurs du CERN, ainsi que des principales expériences

La multiplicité des nationalités présentes, et donc des cultures et des habitudes de travail, ainsi que la très large diversité des métiers représentés à la fois en termes de disciplines et de niveaux de qualification, associés à des objectifs hors du commun et fortement exigeants, font du CERN un parfait exemple d'environnement collaboratif. Et, par conséquence, un excellent sujet d'étude pour le travail présenté dans cette thèse.

1.2.2 Les installations du CERN

Le CERN possède plus de 50 km de tunnels dans lesquels sont installées des lignes de faisceaux. La plupart sont des accélérateurs de particules alimentant de nombreuses expériences de physique des particules, mais aussi de physique nucléaire. Un schéma détaillant ces installations est donné en Figure 1.1. Comme indiqué précédemment, le LHC est à l'heure actuelle le principal accélérateur du CERN. Il est cependant précédé de toute une chaîne d'injection permettant aux particules d'être graduellement accélérées jusqu'aux énergies nécessaires au fonctionnement du LHC. L'énergie y atteignait 4 TeV par faisceau fin 2012 avant une période d'arrêt

1.2. Notre terrain de jeu : le CERN

de deux ans¹ pour des travaux qui devraient permettre d'atteindre les 7 TeV par faisceau au cours de l'année 2015.

La particule la plus communément accélérée au CERN est le proton, unique constituant du noyau de l'atome d'hydrogène. Tout d'abord, les protons sont injectés dans un accélérateur linéaire, le Linear Accelerator 2 (Linac2) qui accélère le faisceau à une énergie de 50 MeV. Celui-ci est suivi du Proton Synchrotron Booster (PS Booster) dans lequel les particules atteignent 1.4 GeV, du Proton Synchrotron (PS) qui les accélère jusqu'à 25 GeV, puis du Super Proton Synchrotron (SPS) depuis lequel les protons sont injectés dans le LHC à une énergie de 450 GeV. Occasionnellement, des ions de plomb sont utilisés pour certaines expériences. Leur chaîne d'accélération est légèrement différente, puisqu'ils sont produits dans un autre accélérateur linéaire, le Linac3, suivi d'un petit accélérateur circulaire, le Low Energy Ion Ring (LEIR). Celui-ci injecte ensuite les ions dans le PS, après quoi la suite de la chaîne d'accélération est identique à celle du proton.

Le travail du CERN, en grossissant le trait, est de fournir ces faisceaux de particules à de nombreuses expériences. Les principales d'entre elles se trouvent sur le LHC, et se nomment ATLAS, CMS, LHCb et ALICE. Elles sont gérées par d'immenses collaborations éponymes auxquelles prennent part les plus grands instituts de recherche et les plus grandes universités du monde entier. Les expériences, cette fois au sens matériel, sont de gigantesques détecteurs installés aux points de collision des deux faisceaux du LHC circulant en sens opposés.

D'autres expériences de moindre ampleur se trouvent au CERN. On retrouve parmi elles On-Line Isotope Mass Separator (ISOLDE), située au niveau du PS Booster et spécialisée dans la physique nucléaire, notamment l'étude d'isotopes rares. Le décélérateur d'antiprotons ou Antiproton Decelerator (AD), situé au niveau du PS, permet quant à lui de délivrer des antiprotons à plusieurs expériences travaillant sur l'antimatière.

1.2.3 Pourquoi planifier ?

La planification est omniprésente au CERN, et concerne de nombreux aspects des travaux qui y sont effectués. On y trouve de grands projets de développement, de consolidation ou encore d'amélioration. Le plus connu est donc le projet LHC mentionné précédemment, qui s'est étendu sur plus de vingt ans et a coûté plus de six milliards de francs suisses (plus de 5 milliards d'euros). Parmi les grands projets actuels, on retrouve :

- **High Luminosity LHC Project (HL-LHC)** : amélioration du LHC, afin d'atteindre des luminosités (équivalentes en quelque sorte à des densités de collisions) supérieures à celles du LHC. Prévu pour être achevé à l'horizon 2025, HL-LHC prévoit l'amélioration de nombreuses technologies utilisées actuelle-

1. Période appelée *Long Shutdown 1 (LS1)*. Il s'agit du premier grand arrêt du LHC depuis sa mise en opération en 2010 afin d'entretenir et d'améliorer les installations pour atteindre des énergies de faisceaux plus élevées et des probabilités de collisions supérieures.

- ment dans le LHC, comme les aimants supraconducteurs ou l'alimentation à très haute intensité de courant sans dissipation d'énergie [HL-LHC 2014].
- **Projet Linac4** : remplacement du Linac2 par un nouvel accélérateur linéaire, le Linac4 qui accélérera des ions H^- et non des protons comme le Linac2 (ions qui seront convertis en protons dans le PS Booster) et atteindra des intensités et des énergies de faisceaux environ deux fois supérieures à celles utilisées actuellement, ce qui augmentera la probabilité de réalisation de collisions dans le LHC [Linac4 2014].
 - **LHC Injectors Upgrade (LIU)** : amélioration de la chaîne d'accélération menant au LHC. Concerne le remplacement du LINAC2 par le LINAC4 évoqué précédemment, mais aussi le PS Booster, le PS et le SPS ainsi que toute la chaîne pour les ions lourds [LIU 2014].
 - **LHC Consolidation Project** : consolidation des infrastructures du LEP réutilisées dans le LHC (refroidissement, ventilation, électricité) ainsi que des équipements de protection contre les dommages causés par les radiations. Constitution d'un stock de pièces de rechange pour le LHC [CERN EN-Department 2014].
 - **Compact Linear Collider Study (CLIC Study)** : étude de faisabilité indépendante sur le développement de technologies (réalistes et à des coûts raisonnables) pour un futur collisionneur linéaire d'électrons et de positons [CLIC 2014].
 - **High Intensity and Energy ISOLDE Project (HIE-ISOLDE)** : projet d'amélioration d'ISOLDE en termes d'énergies atteintes, ainsi que de qualité, de flexibilité et d'intensité des faisceaux utilisés [HIE-ISOLDE 2014].
 - **ELENA Project** : un anneau compact (30 m de diamètre) pour le refroidissement et la décélération des antiprotons fournis par l'Antiproton Decelerator afin de diminuer les pertes et d'augmenter le nombre d'antiprotons piégés pour les expériences [ELENA 2014].
 - **Future Circular Collider (FCC)** : étude de faisabilité de collisionneurs proton-proton ou électron-électron (voire électron-proton) dont la circonférence pourrait atteindre 100 km.

Il va sans dire que tout projet nécessite une phase de planification, et ce dès son approbation, afin de définir ses objectifs temporellement parlant : on en déduit la date à laquelle on peut espérer bénéficier de ses résultats, mais également quelles sont les différentes phases qui le composent, leurs durées approximatives, leur ordonnancement ou les ressources qui leur seront affectées [Bonnal 2015].

La planification au CERN ne s'arrête pas à la planification de projet, loin s'en faut. Il est également important de mentionner la planification des opérations de maintenance, de consolidation et d'amélioration des installations. Les maintenances préventive et corrective ainsi que des interventions d'inspection (liées à la sécurité, la sûreté et la santé des travailleurs sur les sites du CERN) sont effectuées de façon répétée, et s'intercalent entre deux périodes d'opération des installations. On parle alors d'arrêts techniques, terme qui désigne des périodes d'arrêt allant de quelques heures à quelques jours. La consolidation et l'amélioration des installations s'ins-

1.2. Notre terrain de jeu : le CERN

crivent en revanche plutôt dans une perspective de projet, avec des interventions uniques qui s'effectuent soit pendant un arrêt technique si leur durée le permet, soit dans le cadre d'arrêts importants comme le LS1 qui se déroule au CERN entre février 2013 et début 2015 [O'Luanaigh 2013].

Cette alternance entre périodes d'opération et d'arrêt, ainsi que la multiplicité des interventions à effectuer pendant ces derniers, nécessite un important travail de planification et de coordination. Les interventions de maintenance sont nombreuses et portent sur des équipements variés. De plus, la durée des arrêts doit être minimale pour maximiser le temps d'exploitation des faisceaux pour les expériences de physique des particules. Enfin, la présence de risques, par exemple ceux dus aux rayonnements ionisants ou aux installations de cryogénie impose une planification attentive, comprenant notamment des procédures d'optimisation de l'exposition.

C'est essentiellement la notion de radioprotection qui va nous intéresser dans cette thèse. Cependant, il faut garder à l'esprit la diversité des problèmes de planification qui se posent au CERN, dont la collaboration est au centre. En prenant un peu de recul et en considérant le CERN lui-même comme un système complexe, on peut rapidement se rendre compte qu'il s'agit de problèmes non triviaux. Les grands projets du CERN impliquent de vastes collaborations entre instituts du monde entier, et partent sur des calendriers s'étendant sur de nombreuses années (par exemple, HL-LHC s'étend jusqu'en 2035 environ).

D'un point de vue plus pragmatique, l'opération des accélérateurs, l'inspection et la maintenance sont également soumises à des problématiques de collaboration liées à l'environnement même que constitue le CERN. Il s'agit de maximiser le temps d'exploitation des faisceaux dans les installations pour permettre aux expériences de fonctionner, tout en laissant suffisamment de temps d'arrêt technique pour les interventions de maintenance. Celles-ci sont effectuées par un nombre important de collaborateurs de nationalités très diverses qui opèrent dans des installations en grande partie souterraines donc limitées en espace, et souvent soumises à des rayonnements ionisants. La planification des interventions au CERN est donc un problème complexe, où se mêlent optimisation et collaboration avec en toile de fond l'excellence scientifique, mais également la santé des collaborateurs.

1.2.4 Le travail collaboratif au CERN

Depuis le début de ce chapitre, le mot “collaboration” et son champ lexical ne cessent d'apparaître. Le CERN a été créé pour faciliter la collaboration scientifique entre ses états membres, les principales expériences que l'on y trouve sont exploitées par de gigantesques collaborations entre instituts du monde entier, et la collaboration de plusieurs dizaines de métiers différents, scientifiques ou non, est nécessaire pour permettre l'opération des installations.

Et d'autres signes ne trompent pas. Ces dernières décennies, le CERN a déjà développé ou vu naître de nombreux outils tournés vers la collaboration, afin de faciliter la communication entre différents acteurs se trouvant parfois sur des continents différents. Le plus connu est mondialement utilisé : il s'agit du *World Wide*

Web, créé par Tim Berners-Lee et Robert Cailliau en 1989 afin de faciliter la communication des informations entre collaborateurs au sein du CERN [WEB 2014].

D'autres outils plus spécifiques ont par la suite été créés comme le système de Product Lifecycle Management (PLM) du CERN, l'Engineering and Equipment Data Management System (EDMS) [EDM 2014]. Depuis la fin des années 1990, il a permis aux collaborateurs du projet LHC de partager en s'appuyant sur le *Web* de grandes quantités d'information sur le développement et la construction du collisionneur. On peut également mentionner deux autres outils développés entièrement ou en partie au CERN : PPT-EVM pour planifier et contrôler les projets, et Integrated Digital Conferencing (INDICO) pour l'organisation et la gestion de conférences ou de réunions [IND 2014].

Plus intéressant encore pour cette thèse, le CERN développe depuis 2011 un outil dédié à la gestion des interventions sur les installations à faisceaux, et à terme également sur les installations techniques de surface. Cet outil est nommé Intervention Management Planning and Activity Coordination Tool (IMPACT). En plus d'illustrer une fois encore la forte utilisation d'acronymes au CERN, cet outil a pour vocation de concentrer la planification de toutes les interventions sur les installations dans un seul et même système. Il en permet la description détaillée, notamment concernant les ressources utilisées, les localisations des interventions ou encore les aspects liés à la sécurité.

À l'heure où ces lignes sont écrites, du chemin reste encore à parcourir quant à l'étendue des fonctionnalités de planification, notamment en termes de gestion de contraintes temporelles entre tâches. Les aspects de radioprotection demeurent également peu intégrés dans IMPACT, et une interaction importante avec le service de radioprotection reste indispensable, notamment pour les interventions entraînant les plus fortes expositions. Nous aurons l'occasion de revenir amplement sur ces différents aspects dans les chapitres suivants.

Pour résumer en quelques mots cette section entière, le CERN est donc un excellent exemple d'environnement de planification collaboratif. Du moins, il comporte tous les éléments que nous pourrions inclure dans une définition de ce terme, et nous avons pu constater que la volonté de travailler collaborativement est bien présente et est couronnée de succès si les outils adéquats sont à disposition.

1.3 Modèle générique du mémoire et contribution à une nouvelle approche de la planification

1.3.1 Présentation systémique des trois dimensions de cette thèse

Poursuivons notre chapitre introductif en formalisant notre approche du point de vue de la systémique. Nous avons choisi d'aborder la problématique du pilotage de la complexité par la planification, car ces deux notions sont fortement liées. En effet, piloter un système complexe implique entre autre d'être capable de fixer une marche à suivre, et de pouvoir anticiper les étapes qui vont se dérouler. Comme

1.3. Modèle générique du mémoire et contribution à une nouvelle approche de la planification

nous l'avons décrit dans la section précédente, cette planification ne pourra se faire sans notre première dimension, la collaboration. Les institutions, la culture et le fonctionnement d'un système tel que le CERN sont profondément collaboratifs, et par conséquent, les technologies qui y sont développées le sont également.

Pour maîtriser et mettre en œuvre ces technologies dans notre contexte collaboratif, il faut donc une planification spécialement adaptée au niveau de complexité intrinsèque à notre système CERN. Les cycles de vie rencontrés pour les projets de recherche (pour rappel, jusqu'à plusieurs dizaines d'années) comme pour l'opération d'installations hors normes, requièrent une planification spécialement adaptée, répartie sur les trois niveaux que sont l'opérationnel, le tactique et le stratégique (ou normatif). De nombreuses techniques de planification de projet ont été développées tout au long du XX^e siècle [Bonnal 2015], et plusieurs systèmes commerciaux se basent dessus et sont largement utilisés dans l'industrie ainsi qu'au CERN ou dans d'autres organisations similaires. Cependant, elles demandent à être réexaminées face à la problématique de la complexité et du collaboratif.

La notion de collaboration n'est bien entendu pas absente des systèmes de planification modernes. Des méthodologies de management de projet telles que PRINCE [PRINCE2 2014] permettent une meilleure coordination entre direction générale (stratégique) et opérationnelle d'une organisation. Des systèmes dits "OPX" (car inspirés du système OPX2, commercialisé par Planisware et aujourd'hui remplacé) ainsi que les leaders du marché (aujourd'hui en 2014, Project de Microsoft ou Primavera Project Planner d'Oracle) peuvent considérer l'individu en tant que ressource, ce qui permet d'introduire la notion de disponibilité ainsi que les contraintes qui en résultent. De tels systèmes présentent de plus aujourd'hui un fonctionnement de type "*workflow*", facilitant la circulation documentaire notamment grâce à l'utilisation d'applications web avec des interactions entre les niveaux opérationnel et tactique de type demande-validation-rejet. Au CERN, c'est également le cas pour IMPACT, qui introduit un fonctionnement similaire non pas pour la planification de projet mais pour la planification des opérations dans les installations.

C'est ce type de mécanismes que nous tenons à améliorer. Il est possible de voir que, bien qu'ils impliquent un certain degré d'interaction entre les différents niveaux hiérarchiques de la planification, les échanges se font essentiellement par voie documentaire, un processus qui peut être long et entraîne, si l'on peut dire, une séparation entre les "mains" et le "cerveau" de l'organisation, c'est-à-dire entre l'opérationnel et le tactique, le tactique et le stratégique et *a fortiori* entre l'opérationnel et le stratégique. Dans ces cas, le travail de planification introduit du collaboratif avec la circulation de documents, mais l'action de planification elle-même reste cantonnée au niveau tactique. Un système de planification entièrement collaboratif devrait pouvoir prendre en compte en temps réel les contraintes des participants, notamment au niveau opérationnel, envisager les conflits et les compromis possibles afin de faciliter le retour d'informations aux niveaux supérieurs.

À cela vient enfin s'ajouter notre troisième dimension : l'exposition aux radiations et la prise en compte de ce risque dans la planification d'interventions. Dans ce contexte, chaque intervention est unique, même si elle peut être amenée à être

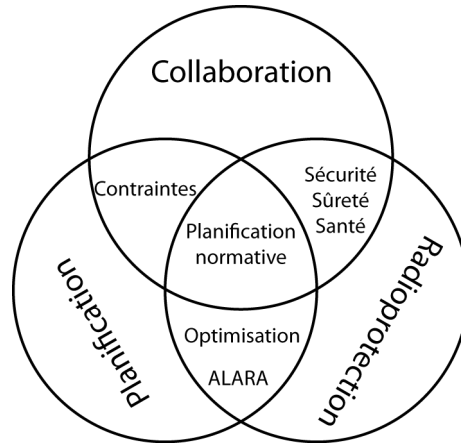


Figure 1.2 – Modèle systémique des trois dimensions principales de ce travail de thèse et de leurs intersections.

répétée au cours du temps, car les conditions radiologiques évoluent selon l’activation des matériaux. Leur connaissance en temps réel, mais surtout leur anticipation, est nécessaire pour estimer les doses de radiations qui seront reçues par le personnel en cours d’intervention. Cela passe par une collaboration étroite entre le groupe de radioprotection, qui a besoin de connaître les tâches à effectuer et de déterminer celles qui seront critiques, et les collaborateurs qui planifient les interventions, qui doivent quant à eux justifier et optimiser (à l’aide d’une démarche dite ALARA, que nous définirons dans le chapitre 2) les doses de radiations anticipées. Ici encore, l’opérationnel se mêle au tactique, et seule une véritable collaboration permet de contrôler ce processus.

C’est seulement en considérant ces trois dimensions que sont le collaboratif, la planification et la maîtrise du risque radiologique qu’une véritable planification normative est possible au CERN comme résumé en Figure 1.2. Et c’est ce que nous avons cherché à produire dans notre nouvelle approche de la planification présentée dans la suite de ce travail.

1.3.2 Notre nouvelle approche de la planification

La nouvelle approche de planification que nous proposons dans cette thèse s’inscrit dans trois principes : la complexité, le multi-objectif et la maîtrise du risque. La complexité est intrinsèque au CERN et à son fonctionnement. Elle se traduit en ce qui nous concerne par la nécessité de faire de la planification d’intervention un processus réellement collaboratif.

Le multi-objectif en est une conséquence : nous verrons au cours du chapitre suivant que dans notre contexte de planification, l’optimisation temporelle n’est pas forcément suffisante : ce sont également les doses de radiations qui doivent être optimisées, ce qui ne passe pas nécessairement par l’optimum temporel. Enfin, ce traitement de la planification par la complexité s’inscrit dans une démarche de

1.3. Modèle générique du mémoire et contribution à une nouvelle approche de la planification

maîtrise du risque radiologique : notre objectif est de développer des méthodes de planification permettant de diminuer son impact, et ce dès la phase de conception des interventions.

Pour cela, nous développons dans ce travail une méthode de planification fondée sur l'existant, avec des méthodes de planification matricielles d'une part, comme la Design Structure Matrix (DSM), et les méthodes de planification en intelligence artificielle d'autre part. Nous verrons en effet que l'introduction de ces dernières, tout en conservant l'interactivité avec l'humain, permet une plus grande flexibilité grâce à la prise en compte et la propagation des contraintes.

1.3.3 De la théorie à la pratique : notre démarche

Durant ce travail de thèse, nous allons chercher à exposer les problèmes de planification collaborative dans leur environnement complexe de façon la plus claire et la plus intelligible possible, mais sans perdre cette complexité intrinsèque au CERN, qui nous servira d'environnement, et aux problèmes de planification eux-mêmes. Il va ainsi s'agir pour nous de faire passer dans la pratique ces idées désormais communes en systémique en les traduisant dans des méthodes concrètes et utilisables.

Ce premier chapitre introductif a posé les bases de cette thèse. Nous y avons découvert le CERN, bien que très rapidement et superficiellement, et il va à présent nous servir de contexte ou plutôt d'environnement de planification. Nous en avons ensuite décrit les différents acteurs, et insisté sur le rôle prépondérant de la collaboration dans leurs travaux, et sur la complexité que cette dernière engendre sur les procédés que nous allons étudier et développer par la suite.

Le chapitre suivant entre de plein pied dans la pratique, en s'intéressant aux interventions en milieux présentant des risques. Plus particulièrement, le cas du CERN va introduire la problématique des radiations dans les installations dédiées à la recherche scientifique, et une grande partie de ce chapitre 2 y sera consacrée. Dans le chapitre 3, nous retournerons plus vers la théorie avec tout d'abord la définition de notre environnement collaboratif de planification, puis avec la modélisation et la planification des interventions. Il y sera question de planification collaborative, mais aussi d'ontologies et de choix de méthodes, tout en gardant en tête les spécificités de notre problème *cernois*.

Les chapitres suivants détailleront les apports de cette thèse à la planification collaborative. Les méthodes phares de cette thèse, la Design Structure Matrix (DSM) et l'algèbre d'intervalles d'Allen, y seront présentées en détail. Il sera question dans le chapitre 4 d'algorithmes, mais également de conflits et de compromis. Enfin, le chapitre 5 plongera lui entièrement dans la pratique, mettant à l'épreuve les méthodes présentées sur un système réel, le futur Super-Séparateur de Fragments (Super-FRS) situé dans le complexe d'accélérateurs de GSI-FAIR à Darmstadt en Allemagne, que l'on peut considérer par de nombreux aspects comme un "petit frère" du CERN.

Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

Sommaire

2.1 Interventions dans des milieux présentant des risques . . .	13
2.1.1 Différentes situations, questionnements identiques	14
2.1.2 Installations scientifiques émettant des rayonnements ionisants : le cas du CERN	18
2.2 Quelques bases de physique nucléaire et de radioprotection	19
2.2.1 Qu'est-ce que la radioactivité?	20
2.2.2 Les différents rayonnements ionisants	24
2.2.3 Effets biologiques des radiations et dosimétrie	29
2.3 Le principe ALARA : optimisation des interventions en milieux ionisants	35
2.3.1 Radioprotection et législation	35
2.3.2 L'approche ALARA : " <i>As Low As Reasonably Achievable</i> " . .	37
2.3.3 ALARA au CERN	39
2.4 Simulation des champs de radiations par les codes de calcul Monte Carlo	40
2.4.1 Estimation des champs de radiations	40
2.4.2 Utilisation de FLUKA et exemple de la zone TCC2 au CERN	44
2.5 Conclusions sur les interventions en milieux présentant des rayonnements ionisants	51

2.1 Interventions dans des milieux présentant des risques

Nous allons dans ce chapitre faire un premier pas vers la pratique. Nous avons commencé à décrire nos *interventions* dans le chapitre 1. À ce stade, nous savons qu'elles sont planifiées et réalisées de manière collaborative, et qu'elles s'effectuent dans un environnement complexe. Elles sont notamment soumises à d'importantes

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

contraintes spatiales dues aux installations souterraines d'accélération et d'acheminement de particules. Mais plus important encore pour notre problématique, les interventions auxquelles nous nous intéressons de près dans ce travail se déroulent dans un environnement radioactif. Cette spécificité implique une planification soignée et spécialement adaptée, comme pour toute intervention en environnement présentant des risques.

C'est donc de radioactivité et plus précisément de radioprotection qu'il va être question dans ce chapitre. Mais avant de nous consacrer entièrement à ce sujet, nous allons commencer par aborder les caractéristiques générales que tout environnement présentant des risques impose en termes de planification, en considérant quelques domaines analogues pour illustrer nos propos.

2.1.1 Différentes situations, questionnements identiques

Il est bien entendu difficile d'imaginer des membres du personnel du CERN réalisant leurs interventions en même temps sans avoir au préalable planifié leurs travaux dans les tunnels, où certains équipements émettent des rayonnements ionisants à des niveaux pouvant être suffisamment élevés pour avoir des conséquences sur la santé. Il en va de même pour de nombreux domaines de planification en environnement présentant des risques, ce qui va nous permettre de dégager certaines caractéristiques communes qu'il va nous être nécessaire de prendre en compte dans notre méthode de planification.

Nous allons considérer différents exemples : la planification d'interventions sur des feux de forêt ou plus généralement les techniques de management de crise, ainsi que les vols spatiaux habités et les risques auxquels s'exposent les astronautes. Dans notre domaine des interventions en environnements radioactifs, les installations orientées vers une utilisation industrielle comme les centrales nucléaires sont confrontées à des situations similaires, notamment lorsqu'il s'agit de maintenance et de démantèlement.

Prise en compte de la variabilité de l'environnement et des conditions d'intervention

Quel que soit l'environnement ou le contexte de l'exercice de planification en milieux présentant des risques plus ou moins importants, il est indispensable de considérer le problème dans sa globalité. La planification d'intervention sur un feu de forêt dépend de facteurs environnementaux dont l'évolution peut être hautement imprévisible et sur lesquels il n'existe que peu ou pas de données complètes (provenant notamment de cas antérieurs), comme le décrit un article de Avesani *et al.* [Avesani 2000]. Les conditions météorologiques, l'aire de répartition (de quelques mètres carrés à plusieurs kilomètres carrés), le type de comburant, le type de terrain (accidenté, plaine) et les voies d'accès disponibles sont autant de données qu'il est très difficile de contrôler. La durée d'intervention est également très aléatoire, pouvant aller de quelques secondes à plusieurs jours. Enfin, la collaboration entre plusieurs

2.1. Interventions dans des milieux présentant des risques

centres (office de gestion des forêts, gendarmerie, pompiers, vigies des hôpitaux si besoin, etc.) fait des interventions sur feux de forêt un excellent cas d'analogie pour notre problématique.

Bien entendu, comme nous le rappellerons dans la suite de ce chapitre (section 2.2.1), le cas de la radioactivité est différent. En effet, une source d'activité radiologique donnée décroît exponentiellement avec le temps ce qui est un comportement facile à anticiper. Cependant, comme pour un incendie, certaines données ne sont pas toujours ni complètes, ni disponibles, et nécessitent une adaptation constante aux conditions. Il est en effet compliqué sinon impossible de connaître exactement la forme et la valeur d'un champ de radiations à un instant donné, et les données collectées pendant et après l'intervention ne peuvent qu'éventuellement servir à de futures utilisations.

Nous avons donc décrit une première caractéristique qu'ont en commun les interventions dans divers environnements présentant des risques, à savoir la présence d'au moins un paramètre aux valeurs incertaines à un instant donné et aux variations difficiles voire impossibles à prévoir. Dans ces conditions, les principes fondamentaux de la recherche opérationnelle ne sont plus nécessairement applicables, à commencer par la notion d'optimisation, comme l'explique Schärliig [Schärliig 1985, chapitre 1], ou encore Bernard Roy qu'il cite abondamment [Roy 1977, Roy 1985]. Optimiser devient en effet une action toute relative lorsque plusieurs paramètres indépendants entrent en jeu, et évoluent de façon dynamique. Les hypothèses suivantes, très souvent implicites de la recherche opérationnelle, ne tiennent plus dans ces conditions :

- l'hypothèse de globalité : parmi l'ensemble des actions potentielles à effectuer, une et une seule est l'unique meilleure option. Ceci signifie qu'elle englobe tous les aspects du problème, et exclue les autres (qui par ailleurs sont également mutuellement exclusives) ;
- l'hypothèse de stabilité : l'ensemble des paramètres et actions potentielles ne changent pas en cours d'étude ;
- l'hypothèse de transitivité : deux actions potentielles sont comparables l'une à l'autre par une relation donnée si elles sont toutes deux comparables à une même troisième par la même relation. Cette hypothèse est plus simple à exprimer mathématiquement. Soient a , b , et c trois éléments d'un ensemble quelconque et R une relation permettant de les comparer. R est transitive si aRb et $bRc \Rightarrow aRc$.

Ces trois hypothèses sont très souvent satisfaites en recherche opérationnelle. Elles permettent, comme le précise Schärliig, de résoudre certains problèmes en recherchant un optimum. Ces problèmes sont typiquement ceux qu'il est possible d'isoler de leur contexte et de leur environnement, que celui-ci soit managérial, politique, ou dans notre cas présentant des risques variant au cours du temps et sur lesquels seules des données au mieux incomplètes sont disponibles. Il s'agit de problèmes bien traités dans la littérature de la planification avec des méthodes déterministes comme le *Job-Shop Planning and Scheduling* [Pinedo 2008]. Il peut s'agir par exemple de gestion de production, ou d'organisation de rotations de ramassage des ordures ou de déblaiement de la neige dans les régions montagnardes et septentrionales.

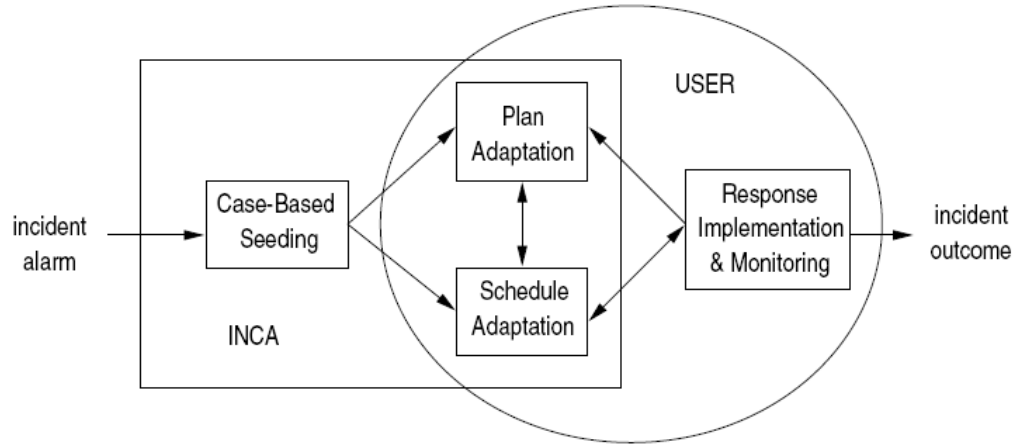


Figure 2.1 – Illustration d’un processus de planification interactif et adaptatif avec l’interface INCA dédiée à la planification d’intervention impliquant des matières dangereuses [Gervasio 1998].

Elles ne seront cependant plus valides si l’on commence à considérer des problèmes complexes et fortement connectés à leurs environnements décisionnel et extérieur. L’hypothèse de stabilité est celle pour laquelle cette constatation est la plus évidente. Les conditions environnementales évoluant, il peut être nécessaire de considérer d’autres tâches ou de modifier ses priorités en cours d’exécution d’un plan, par exemple si le vent tourne et menace des habitations lors d’un incendie. De même, si une nouvelle solution est adoptée en cours de route, l’hypothèse de globalité est également réfutée car la “meilleure” solution est alors supplantée par une autre.

Dans de telles conditions, des modèles de planification rigides et calculés à l’avance laissent la place à des approches plus communément trouvées en intelligence artificielle à base de réseaux de contraintes temporelles, de propagation de contraintes, mais aussi de planification par cas (c’est-à-dire basée sur des interventions précédentes) interactive et adaptative en temps réel. C’est le cas par exemple pour les feux de forêt [Avesani 2000, Cohen 1989, de la Asunción 2005], mais aussi pour les incidents impliquant des substances ou matériaux dangereux [Gervasio 1998, Iba 1998] comme illustré en Figure 2.1, et d’une façon générale pour la planification dédiée à la gestion de crises ou d’urgences ainsi que de certaines applications de planification plus généralistes [Tate 1992, Shen 2004].

L’hypothèse de transitivité est quant à elle plus compliquée à rejeter et ceci donnerait lieu à de plus longues explications qui sont clairement données par Schärlig et que nous invoquerons lors du choix des méthodes de planification dans le chapitre 3 de cette thèse.

2.1. Interventions dans des milieux présentant des risques

Une criticité non temporelle

La variabilité de l'environnement n'est pas la seule caractéristique des interventions en milieux présentant des risques. Pour illustrer la seconde, intéressons-nous à présent aux vols spatiaux habités. White et Averner dressaient en 2001 un panorama du rôle des humains dans l'exploration spatiale [White 2001]. Alors qu'il est possible de croire que l'avenir de ce domaine sera entièrement dévolu à la robotique, il n'en est rien et il apparaît que l'être humain y a même encore toute sa place. Un rôle prépondérant attend même les astronautes avec pour horizon l'exploration de Mars, mais ce rôle s'accompagne de trois risques majeurs auxquels il faut se confronter :

- les modifications voire dommages corporels associés à l'apesanteur ;
- les effets psychologiques d'un voyage prolongé, en environnement confiné, en relation constante avec un même effectif réduit de collaborateurs ;
- l'exposition à des types et des doses de radiations très différents des conditions terrestres, avec des conséquences à long terme comme le cancer ou la cataracte. [Cucinotta 2001].

Il est bien entendu possible de s'intéresser séparément à chacun de ces trois risques et à leurs conséquences, notamment lorsqu'il s'agit d'en étudier les différents impacts sur la santé des astronautes. Cependant, les auteurs remarquent fort justement qu'il est important de considérer l'être humain dans sa globalité. *"Body parts will not travel on exploration missions"*². Cette phrase tournée de façon ironique illustre bien la démarche adoptée : pour bien estimer les conséquences des vols spatiaux sur le corps humain, il faut le considérer de façon réaliste, dans sa totalité et en tenant compte des interactions de ses constituants, et procéder à une approche de l'organisme humain dans sa complexité. Une telle approche porte sur la biologie et la biologie moléculaire, mais repose également sur la modélisation du corps humain en tant que système. Cette approche est désignée par le terme de physiologie intégrative (*integrative physiology* en anglais), et peut sembler ambitieuse : certains projets comme celui du National Space Biomedical Research Institute [NSBRI 2000] visent tout simplement à obtenir sur le long terme un "humain digital" compilant un maximum de connaissances sur le fonctionnement de l'organisme.

Les vols spatiaux habités offrent donc un exemple supplémentaire de la nécessité d'approcher les problèmes réels par la complexité. Ce qu'ils illustrent également, tout comme les feux de forêts ou nos interventions humaines en environnements à émissions radioactives, c'est que la criticité temporelle n'est plus forcément la seule criticité lorsqu'il s'agit de planifier dans des environnements présentant des risques. Planifier une intervention optimale en termes de durée ne garantira pas nécessairement une meilleure gestion du risque. Nous avons mentionné précédemment la priorité de la protection de vies et d'habitations dans le combat des incendies. En effet, s'il faut maîtriser le feu au plus vite, le scénario le plus rapide ne sera pas nécessairement le plus efficace selon cette perspective.

Pour les vols spatiaux, la problématique est différente. Même avec une planification temporelle optimisée (bien que nous ayons vu précédemment qu'il faut consi-

2. Ce ne sont pas nos différents organes qui partent en missions d'exploration

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

dérer avec prudence la notion d’optimisation dans la résolution de problèmes complexes), le risque demeure et doit être au cœur des préoccupations. Comme nous le verrons très prochainement dans le cas du CERN avec l’approche dite ALARA (cf. section 2.3), nous allons être amenés à définir des notions de “risque acceptable” ou “raisonnable” et non pas “minimal”, et à considérer une intervention comme optimisée si elle reste dans ces limites acceptables. Pour les astronautes, cette optimisation ne passera pas par la planification et l’optimisation temporelle, car la durée des missions ne peut se réduire à volonté. Elle se fera plutôt par une étude poussée des blindages contre les radiations et donc des matériaux [Wilson 2001, Schimmerling 2003], ou du point de vue de la biologie par l’absorption par l’organisme d’agents de radioprotection [Durante 2008]. Notre analogie s’arrête donc là pour les vols spatiaux, même si nous pouvons noter que le choix du blindage affectera la masse du véhicule spatial, et donc sa vitesse et la durée globale de la mission : dans un problème complexe, les paramètres sont couplés. Nous retiendrons surtout de cette analogie l’introduction d’une criticité non temporelle : celle de l’atténuation et du contrôle du risque. Et dans le cas du risque radiologique sur Terre, nous allons maintenant voir qu’elle n’est pas systématiquement synonyme d’optimum temporel.

2.1.2 Installations scientifiques émettant des rayonnements ionisants : le cas du CERN

Toutes ces considérations sont déjà plus concrètes que celles de notre chapitre 1. Nous y avons vu des cas pratiques, exposé des problématiques autres que la collaboration ainsi que certaines caractéristiques des interventions dans les environnements présentant des risques.

Il est à présent temps de se rapprocher d’un pas supplémentaire de la pratique, en se concentrant sur l’exposition aux rayonnements ionisants dans des environnements comme des accélérateurs de particules. Cette problématique peut être illustrée précisément sur le cas d’environnements comme ceux du CERN ou de GSI. Par soucis de généralité, ces installations seront par la suite désignées par le terme d’*installations scientifiques émettant des rayonnements ionisants*. Cette appellation peut sembler lourde, mais elle est justifiée, notre but étant de garder à l’esprit que si la problématique présentée dans cette thèse a été traitée dans le contexte particulier du CERN, les méthodes développées ont une visée plus universelle : à titre d’exemple, des installations liées à la physique des plasmas et de la fusion nucléaire comme JET en Grande Bretagne [EFDA 2014] ou ITER actuellement en construction à Cadarache dans le sud de la France [ITER Organization 2014] pourraient en bénéficier, ainsi bien entendu que des installations plus orientées vers la production comme les centrales nucléaires [Yanagihara 2001].

Commençons donc par analyser les similarités avec les différents exemples que nous venons d’évoquer. Tout d’abord, la variabilité de l’environnement. Les champs de radiations auxquels les intervenants sont confrontés évoluent au cours du temps. Et si le terrain et sa géométrie sont quant à eux bien connus, il est très difficile de connaître en temps réel et avec précision à la fois les valeurs d’un champ de radiations

2.2. Quelques bases de physique nucléaire et de radioprotection

et sa forme globale. La problématique du vol spatial est encore plus proche de la nôtre du fait que les radiations sont également impliquées. Le risque encouru s'étale donc sur plusieurs années, y compris après l'activité considérée.

Le cas des installations scientifiques émettant des rayonnements ionisants présente bien entendu des différences notables avec les situations mentionnées précédemment. Certaines peuvent nous simplifier la tâche : les formules d'évolution de l'intensité de la radioactivité sont bien connues et suivent pour la plupart une loi de décroissance exponentielle. Les principales difficultés qui créent donc des inconnues sont donc :

- la connaissance de l'activation des matériaux, et donc les activités initiales des sources ainsi que leur nature ;
- la connaissance des valeurs actualisées des débits de doses (où se trouve-t-on sur la courbe de décroissance à un instant donné).

Donc si le terrain et les lois d'évolution du facteur de risque sont mieux connues que celles d'un feu où d'une situation d'exposition à une substance dangereuse, l'inconnue se situe plus sur l'absence de données fiables en temps réel.

Par comparaison avec les vols spatiaux, trois différences notables apparaissent : tout d'abord, nous n'opérons pas en apesanteur et les risques liés à l'absence de gravité sont absents de notre contexte, et il en va de même pour le risque psychologique lié à la durée de la mission et au confinement. Enfin, dans notre contexte, la durée d'exposition est ajustable, alors qu'elle n'est que peu flexible pour une mission spatiale donnée. Cette caractéristique va nous intéresser tout particulièrement, car il est possible de mettre en évidence dans les installations scientifiques produisant des rayonnements ionisants des situations où l'exposition la plus courte ne sera pas nécessairement l'exposition optimale en termes de dose reçue.

À noter également que les radiations considérées sur Terre sont bien mieux connues que celles rencontrées dans l'espace [White 2001], et que les niveaux de radiations rencontrés dans les installations auxquelles nous nous intéressons n'impliquent pas les mêmes préoccupations. Bien entendu, le risque sur la santé existe, mais au CERN la radioprotection englobe d'autres aspects, notamment légaux. Nous allons donc sans tarder entamer l'étude des radiations. Nous verrons jusqu'à la fin de ce chapitre les différentes conséquences qu'elles peuvent entraîner en cas d'exposition, et les différents outils dont nous disposons notamment en termes de planification d'interventions pour y faire face.

2.2 Quelques bases de physique nucléaire et de radioprotection

L'objectif de cette section n'est pas d'être exhaustif sur les sujets des rayonnements ionisants et de la radioprotection. Il nous semble cependant important d'en reprendre les bases pour le lecteur qui n'est pas (ou n'est plus) familier avec ces concepts, puis de développer les pratiques élémentaires de radioprotection afin de

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

montrer comment il est possible d'inclure cette problématique dans la planification collaborative d'interventions.

Le contenu de cette section d'introduction à la physique nucléaire provient essentiellement de trois supports de cours auxquels le lecteur intéressé par le sujet peut se référer à [Jimonet 2009], [IRA 2010], et [Tübingen 2013]. Ces trois références contiennent les mêmes informations théoriques, mais permettent d'accéder à certaines spécificités légales de trois pays, respectivement la France, la Suisse et l'Allemagne.

2.2.1 Qu'est-ce que la radioactivité ?

Nomenclature

Avant de définir la radioactivité, rappelons la nomenclature en usage pour désigner les éléments chimiques à l'aide de la formule suivante :

$${}^A_ZX_N \quad (2.1)$$

Dans cette notation, X désigne l'élément chimique considéré. Un élément donné est caractérisé par son numéro atomique Z , qui correspond au nombre de protons dans le noyau. Prenons l'exemple commun du carbone pour illustrer notre propos. Le carbone de symbole C possède 6 protons, soit $Z = 6$. Parmi les deux autres grandeurs données par cette nomenclature, N fournit le nombre de neutrons et $A = Z + N$ est le nombre de masse, donnant le nombre total de nucléons du noyau. Pour un élément donné, Z est invariant mais N peut prendre plusieurs valeurs. Il existe donc plusieurs noyaux différents pour un élément chimique donné. Ces différentes variantes d'un même élément chimique sont nommées isotopes. Toujours pour le carbone, N peut prendre majoritairement trois valeurs : 12, 13, et 14. Comme nous l'avons vu, les grandeurs A , Z et N sont liées, et l'utilisation des trois simultanément est redondante. En pratique, seule la notation AX est utilisée. Ainsi, nous pouvons reprendre l'exemple du carbone en ne considérant que ses trois isotopes majoritaires (il en existe 15 au total) : ${}^{12}C$, ${}^{13}C$ et ${}^{14}C$. Les plus abondants dans la nature sont ${}^{12}C$ et ${}^{13}C$.

Parmi les isotopes d'un même élément, certains sont stables, c'est-à-dire que la composition du noyau est fixée et n'évolue pas au cours du temps. Pour nos trois isotopes principaux du carbone, c'est le cas de ${}^{12}C$ et ${}^{13}C$. D'autres isotopes sont en revanche instables, c'est-à-dire que le noyau atomique présente un déséquilibre dans sa composition (bien plus de neutrons que de protons ou inversement). C'est le cas du ${}^{14}C$. Dans ces cas-là, les noyaux vont chercher à se stabiliser par différents mécanismes appelés désintégrations.

La Figure 2.2 dresse le tableau de tous les isotopes connus. Ce tableau est appelé carte des nucléides. Il est possible de constater qu'il existe bien plus d'isotopes radioactifs que d'isotopes stables. On peut également y repérer les différents mécanismes de désintégration sur lesquels nous allons revenir très prochainement.

2.2. Quelques bases de physique nucléaire et de radioprotection

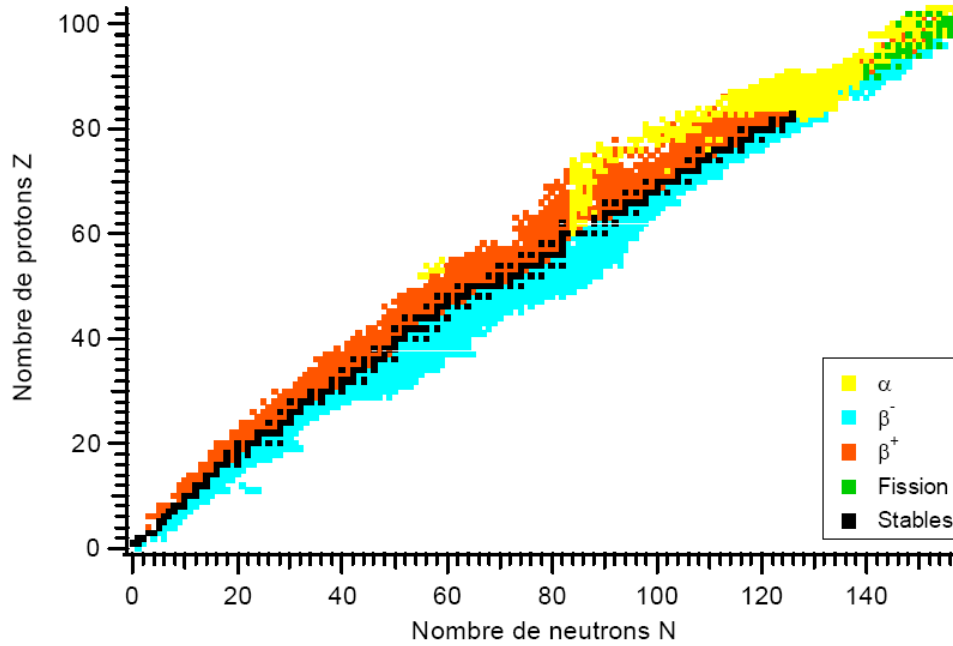


Figure 2.2 – Tableau des nucléides.

Définitions

Une désintégration radioactive est un phénomène naturel, spontané et aléatoire par lequel un noyau atomique (appelé noyau-père) va évacuer un excès d'énergie sous forme de rayonnement pour atteindre une configuration nucléaire plus stable (noyau-fils). Les rayonnements émis peuvent prendre la forme de particules, d'ondes électromagnétiques ou même les deux à la fois.

Un échantillon radioactif est caractérisé par son activité, dont l'unité est le becquerel³ (nombre de désintégrations par seconde) noté Bq. L'activité d'un échantillon décroît exponentiellement au cours du temps selon l'équation 2.2 :

$$A(t) = A_0 \times e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

où A_0 est l'activité initiale de l'échantillon considéré et λ la probabilité de désintégration d'un atome de l'échantillon par seconde. Cette grandeur λ , appelée constante de désintégration, est une valeur très importante pour identifier un élément radioactif, car elle est une caractéristique de l'isotope concerné. L'activité étant un nombre de désintégrations d'atomes par seconde, le nombre d'atomes radioactifs dans l'échantillon évolue selon la même constante λ à partir du nombre initial d'atomes radioactifs dans l'échantillon N_0 :

$$N(t) = N_0 \times e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

3. Unité ainsi nommée en hommage au physicien Français Henri Becquerel.

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

Pour compléter ces définitions, nous pouvons nous intéresser à une autre grandeur caractéristique d'un isotope radioactif : sa demi-vie T ou période de radioactivité. Il s'agit de la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs de l'échantillon ont été désintégrés (ou de façon équivalente lorsque l'activité initiale est divisée par deux). Il s'agit d'une constante, elle dépend de λ et se calcule aisément :

$$\begin{aligned} A(T) &= \frac{A_0}{2} = A_0 \times e^{-\lambda T} \\ \Leftrightarrow \quad \ln 2 &= \lambda \times T \\ \Leftrightarrow \quad T &= \frac{\ln 2}{\lambda} \end{aligned} \tag{2.4}$$

Cette demi-vie, caractéristique d'un isotope donné, varie grandement d'un isotope à un autre. Elle peut être inférieure à une seconde, de l'ordre de quelques minutes ou dépasser le millier, voire le milliard d'années. Voici quelques exemples :

- krypton-89 (^{89}Kr) : environ 3 minutes ;
- carbone-14 (^{14}C) : 5730 ans ;
- plutonium-239 (^{239}Pu) : environ 24110 ans ;
- uranium-238 (^{238}U) : environ 4.47 milliards d'années.

Origine de la radioactivité

Nous avons défini la radioactivité ainsi que les principales grandeurs qui la caractérisent. Avant de décrire plus en détail les rayonnements ionisants, il est nécessaire de conclure ces définitions par un point essentiel et souvent peu connu du public : d'où vient la radioactivité ?

En effet, nous entendons souvent parler dans les médias des déchets nucléaires et des centrales, souvent sous un aspect négatif et sur fond d'inquiétude du public. Mais il ne s'agit là que de radioactivité d'origine humaine, et même seulement d'une partie de celle-ci. La radioactivité est avant tout naturelle, et la radioactivité produite par les activités humaines ne se limite pas uniquement à celle que l'on rencontre dans l'industrie nucléaire. Une personne est exposée tout au long de sa vie à plusieurs sources de radioactivité. Quelques chiffres fournis par l'Institut de Radiologie de Lausanne sont donnés en Figure 2.3, qui indique également l'origine naturelle ou artificielle des radiations.

Parmi les différentes sources de radioactivité et donc de rayonnements ionisants auxquelles toute personne est exposée au quotidien, on retrouve donc :

- des sources naturelles : le radon (gaz rare naturel présent dans la croûte terrestre), les rayonnements cosmiques (auxquels on s'expose de façon un peu plus intense lors des vols en avion), les éléments radioactifs présents dans les matériaux de la planète, et la radioactivité de notre propre corps (essentiellement du potassium-40 (^{40}K)) ;
- des sources d'origine humaine : en grande majorité des examens médicaux (radiographies aux rayons X, scanner, tomographies par émission de positons (TEP), etc.) et les retombées atmosphériques (centrales nucléaires entre autres).

2.2. Quelques bases de physique nucléaire et de radioprotection

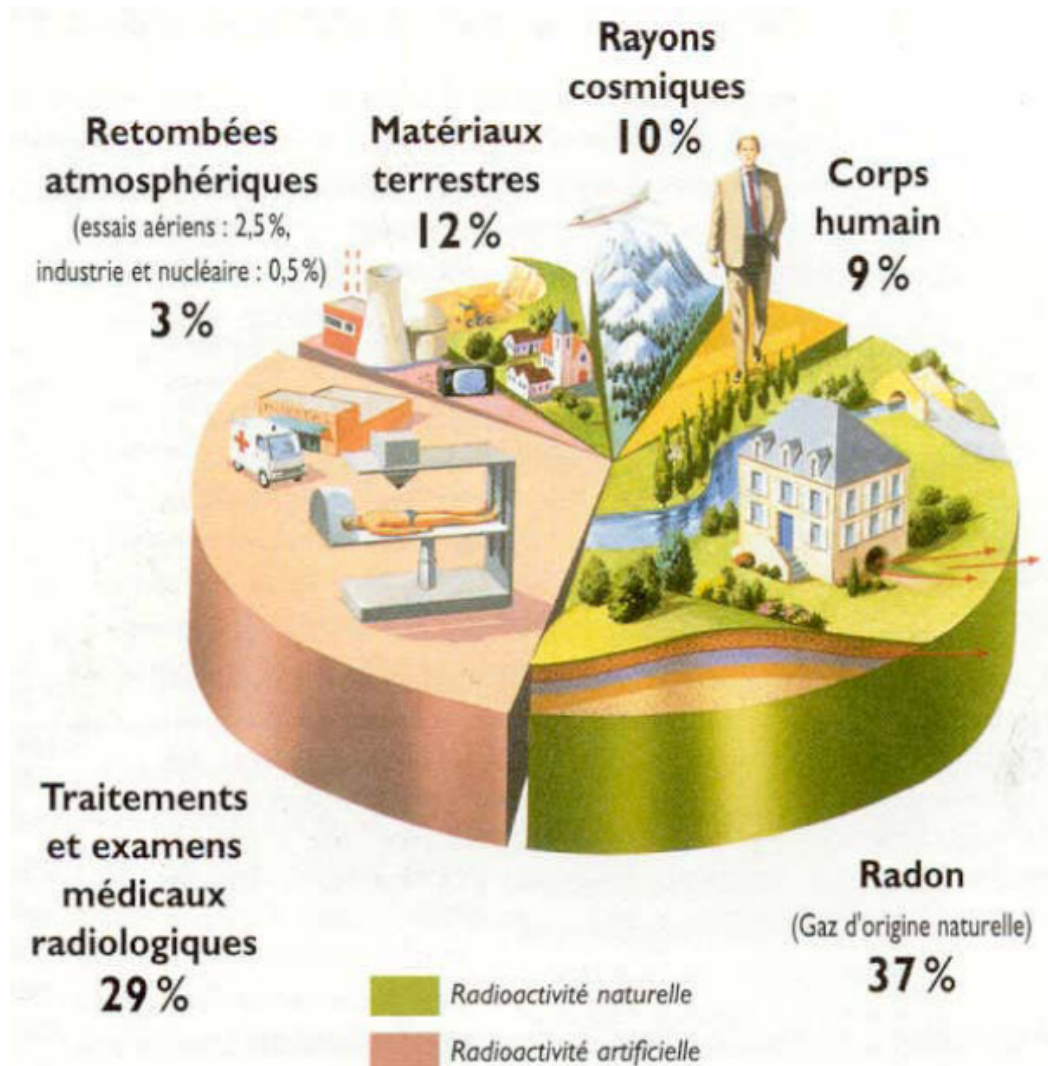


Figure 2.3 – Les différentes origines de la radioactivité ainsi que les proportions approximatives qu'elles apportent à l'exposition moyenne d'un humain aux rayonnements ionisants. Source : [IRA 2011]

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

Ces différentes sources concernent donc toute personne au quotidien. Celles qui nous intéressent dans les installations scientifiques produisant des rayonnements ionisants engendrent donc une exposition professionnelle qui vient s'ajouter à celle de tout un chacun. C'est cette exposition supplémentaire, qu'il nous appartient d'étudier et de maîtriser. Pour cela, une connaissance des différents types de rayonnements est impérative afin de mieux pouvoir s'en protéger.

2.2.2 Les différents rayonnements ionisants

Passons donc à présent à la description des rayonnements ionisants eux mêmes. On désigne par le terme *rayonnement ionisant* toute particule ou onde électromagnétique capable d'ioniser un atome, c'est-à-dire d'arracher directement ou indirectement un ou plusieurs électron(s) de son nuage électronique. C'est notamment le cas de toutes les particules ou rayonnements émis lors des désintégrations radioactives.

En radioprotection, quatre types de rayonnements ionisants sont considérés :

- le rayonnement α ;
- le rayonnement β ;
- les rayonnements électromagnétiques X et γ ;
- le rayonnement neutronique.

Les trois premiers correspondent aux émissions associées aux différents types de désintégrations radioactives. Les neutrons sont un cas à part, mais leur prise en compte est importante notamment dans des installations comme celles du CERN ou de GSI. Nous allons dresser une rapide “carte d'identité” pour chacun d'entre eux, afin d'en décrire les processus d'émission, mais également leurs interactions avec la matière ainsi que les techniques de protection spécifiquement adaptées.

Le rayonnement α

Un rayonnement alpha est l'émission de noyaux d'hélium (${}^4\text{He}$) privés de leurs électrons (et donc chargés deux fois positivement : He^{2+}). Il s'agit du seul mode de désintégration connu où plusieurs nucléons sont expulsés simultanément du noyau. Comme nous pouvons le constater sur la Figure 2.2, ce mode de désintégration n'est par conséquent fréquent que pour les noyaux massifs possédant un nombre important de nucléons (à quelques exceptions près, $N > 83$).

L'émission d'une particule α se fait selon l'équation suivante :

$${}_Z^AX_N \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y_{N-2} + {}_2^4\alpha_2 \quad (2.5)$$

De par sa taille importante, une particule alpha interagit fortement avec la matière en déposant son énergie essentiellement en surface. Comme c'est une particule chargée positivement, elle va interagir essentiellement avec les électrons présents dans le nuage électronique des matériaux. Et de par sa taille et sa masse, ces interactions se font simultanément avec plusieurs électrons en suivant une trajectoire rectiligne. La pénétration d'une particule α est par conséquent rapidement freinée,

2.2. Quelques bases de physique nucléaire et de radioprotection

et si l'on compare par exemple avec un électron, une épaisseur de protection dix fois plus faible suffit à l'arrêter.

Cependant, en cas de contact avec des tissus vivants, elle peut provoquer d'importants dommages aux cellules qu'elle rencontre car elle relâche toute son énergie sur un faible nombre de cellules. C'est pour cela que les émetteurs α sont les plus nocifs en cas d'ingestion ou d'inhalation. En revanche, cette forte déposition d'énergie associée à leur très faible pouvoir pénétrant rend la protection contre l'exposition externe aisée : une simple feuille de papier ou une paire de gants seront suffisantes.

Le rayonnement β

Il existe deux types de rayonnements β . Le rayonnement β négatif est l'émission d'un électron et d'un antineutrino et est noté β^- . Le rayonnement β positif (β^+) est le processus inverse, qui se solde par l'émission d'un anti-électron (appelé positon) et d'un neutrino. Ces deux modes d'émission correspondent respectivement à la transformation d'un neutron en un proton et d'un proton en un neutron. Les neutrinos émis n'interagissent pas avec la matière, et seule la particule β est ionisante.

Les deux mécanismes sont indiqués dans les équations suivantes :

$$\begin{aligned}\beta^- : \quad {}^A_Z X_N &\rightarrow {}^A_{Z+1} Y_{N-1} + \beta^- + \bar{\nu} \quad (a) \\ \beta^+ : \quad {}^A_Z X_N &\rightarrow {}^A_{Z-1} Y_{N+1} + \beta^+ + \nu \quad (b)\end{aligned}\tag{2.6}$$

Comme la particule α , les électrons ou les positons sont des particules chargées qui vont interagir avec les nuages électroniques des matériaux. Cependant, ces interactions se font à l'échelle de l'électron, et une seule à la fois. La trajectoire d'une particule β dans la matière est donc plus aléatoire que celle d'une particule α et son pouvoir pénétrant est plus important. Le rayonnement β est stoppé par des milieux à numéro atomique faible comme l'eau ou le plexiglas sur des épaisseurs de l'ordre du centimètre. Il faut en effet éviter de trop grandes épaisseurs de blindage pour arrêter le rayonnement β , car sur de longues distances, en plus de déposer leur énergie localement dans les collisions, les électrons produisent des photons par rayonnement de freinage continu (phénomène désigné par le terme allemand "*Bremmstrahlung*", rayonnement de freinage, utilisé notamment pour produire des rayons X).

En ce qui concerne le positon (qui n'est pas un constituant stable de la matière), il va d'abord être freiné dans la matière comme un électron avant de s'annihiler avec l'un d'eux en produisant deux rayons γ de directions opposées et d'énergie égale à 0,511 MeV⁴.

Un autre phénomène concurrent de la désintégration β^+ peut également se produire chez les éléments émetteurs de rayons X : la capture d'électron. Il s'agit de la capture d'un électron par le noyau, accompagnée de l'émission d'un neutrino et

4. Ce rayonnement γ est la signature d'une désintégration β^+ . Il est notamment utilisé en imagerie médicale pour la tomographie par émission de positon (TEP). Son énergie de 0.511 MeV correspond à l'énergie de masse de l'électron.

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

d'un rayonnement électromagnétique. Comme pour la désintégration β^+ , le noyau-fils possède alors un proton de moins et un neutron de plus que le noyau-père.

Les rayons X et γ

L'émission γ , à la différence des deux mécanismes précédemment décrits, ne débouche pas sur l'obtention d'un élément différent de celui de départ. Il s'agit de la désexcitation d'un noyau par émission d'une onde électromagnétique, le rayonnement γ . Cette désexcitation se produit souvent juste après une désintégration α ou β ou après une réaction de fission nucléaire. Dans certains cas, la durée de vie de l'atome excité peut être assez importante (de l'ordre de plusieurs heures, ou jours). On parle alors de rayonnement γ retardé.

L'équation suivante décrit le processus d'émission γ :



Les rayons X et γ étant des photons, ils interagissent avec la matière de façon autre que les rayonnements directement ionisants α et β . Par opposition avec ces deux derniers, on parle donc pour les rayonnements électromagnétiques de rayonnements indirectement ionisants, car c'est par l'intermédiaire de l'énergie cinétique qu'ils transmettent aux électrons lors de leurs interactions que leur énergie est relâchée dans la matière. Trois mécanismes existent, selon que le photon cède plus ou moins d'énergie à l'électron avec lequel il interagit (nous n'en donnons ici qu'une description très limitée par souci de synthèse) :

- l'effet photoélectrique : le photon transmet toute son énergie à l'électron et disparaît. L'électron à l'énergie accrue s'échappe de l'atome qui est ainsi ionisé.
- L'effet Compton : le photon transmet une partie de son énergie à un électron lors de l'interaction. Celui-ci subit un recul et est expulsé de l'atome. L'énergie résiduelle continue sa propagation sous forme de photon jusqu'à absorption par effet photoélectrique.
- La création de paire : le photon est absorbé par le champ magnétique du noyau et il se forme une paire électron-positon. Le positon va alors aller s'annihiler avec un électron avoisinant, créant une ionisation.

En termes de protection, il n'est pas possible de définir avec certitude une épaisseur de blindage qui permettra d'arrêter totalement un rayonnement électromagnétique car l'interaction photons-matière est un phénomène stochastique relevant de la physique quantique. L'approche sera donc différente de celle adoptée pour les rayonnements α et β : nous allons parler d'atténuer les rayonnements X ou γ et non de les arrêter. Cela se fait avec des matériaux à fort nombre de protons (Z élevé), et en pratique ce sont le plomb et le béton qui sont utilisés.

En pénétrant dans un matériau, l'intensité d'un faisceau de rayonnement X ou γ décroît exponentiellement⁵ avec la distance de pénétration. Pour une épaisseur de blindage donnée notée z , il est donc possible de calculer des facteurs de transmission

5. Formule de la forme $I(x) = I_0 e^{-\mu z}$, où z est la distance de pénétration.

2.2. Quelques bases de physique nucléaire et de radioprotection

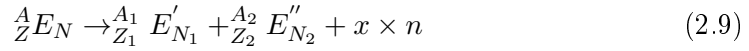
permettant d'évaluer l'intensité passant au travers :

$$T(z) = \frac{I(z)}{I_0} \quad (2.8)$$

Ces facteurs de transmission sont déterminés expérimentalement et mis à disposition des praticiens de la radioprotection sous forme de graphes. Ils permettent, pour un radio-isotope et un matériau donnés de calculer l'épaisseur de blindage nécessaire à une installation. Typiquement, le plomb sera utilisé pour des épaisseurs de quelques centimètres ou décimètres, alors que le béton sera utilisé pour les épaisseurs de plusieurs dizaines de centimètres, voire au-delà du mètre.

Les neutrons

Les neutrons sont également à prendre en compte en radioprotection. S'ils ne résultent pas d'un mécanisme de désintégration donné, ils sont cependant émis par divers mécanismes. Le plus connu est leur libération au cours des réactions de fission nucléaire. La fission peut être spontanée (cf équation 2.9) ou induite, comme c'est le cas dans les réacteurs des centrales nucléaires. Dans le cas de réactions induites, ce sont les neutrons qui en sont à l'origine, ce qui fait qu'on les retrouve des deux côtés de l'équation.



où $Z = Z_1 + Z_2$ et $N = N_1 + N_2 + x \times n$

Le second mécanisme de génération des neutrons est celui que l'on rencontre dans les accélérateurs de particules. Il s'agit de la spallation, où les neutrons sont obtenus par destruction de noyaux atomiques suite à une collision, par exemple entre un proton du faisceau et un noyau atomique d'une cible métallique.

Les neutrons étant des particules non chargées, leurs mécanismes d'interaction avec la matière diffèrent de ceux des rayonnements de particules chargées (α et β) et électromagnétiques (rayons X et γ). Comme ces derniers, ce sont des rayonnements indirectement ionisants : ils vont ioniser la matière en transférant d'abord leur énergie à d'autres particules qui vont par la suite ioniser leur environnement. On distingue deux mécanismes d'interaction neutrons-matière :

- l'absorption d'un neutron de basse énergie par un noyau et la formation d'un isotope radioactif, qui est donc suivie de l'émission d'un rayonnement α , β ou γ . C'est par exemple le cas du xénon-132 :



Cette réaction peut aussi être notée ${}^{132}\text{Xe}(n, \gamma){}^{133}\text{Xe}$, que l'on peut lire de la façon suivante : le xénon-132 soumis à un neutron comme particule incidente produit du xénon-133 avec émission de rayonnement γ . De nombreuses transformations nucléaires peuvent être décrites à l'aide de cette notation condensée.

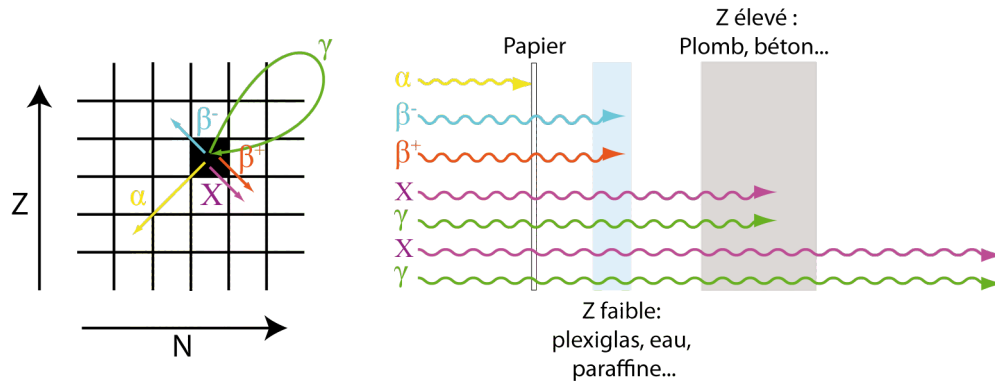


Figure 2.4 – Récapitulation des différentes désintégrations et des placements respectifs des noyaux père et fils dans la carte des nucléides pour chacune. Les différents blindages utilisés pour chaque type de rayonnement sont également résumés.

– Avant qu'un neutron ne possède une énergie suffisamment basse pour être capté par un noyau suivant le mécanisme d'absorption, il subit plusieurs collisions au cours desquelles il cède une partie de son énergie. On parle de diffusion. Ce second mécanisme voit son efficacité augmentée par l'utilisation d'éléments à faible numéro atomique, typiquement des matériaux riches en hydrogène⁶. L'ionisation due aux neutrons provient donc exclusivement des rayonnements secondaires résultant des réactions d'absorption.

Maintenant que nous avons décrit les différents types de rayonnements ionisants, il est temps d'apprendre à s'en protéger. Après un court bilan, nous allons nous intéresser à la radioprotection et à la planification des interventions en environnements radioactifs.

Résumé sur les rayonnements ionisants

Comme nous venons de le voir, il existe donc plusieurs types de rayonnements ionisants. Particules chargées ou non, ondes électromagnétiques, rayonnement directement ou indirectement ionisant, tous ces termes ne vont pas avoir d'impact critique sur la suite de notre travail, car la planification d'intervention telle que nous allons l'envisager va se situer à un niveau plus tactique qu'opérationnel. Ils sont cependant nécessaires pour comprendre l'environnement dans lequel nous évoluons au sein des installations scientifiques émettant des rayonnements ionisants. La Figure 2.4 résume les différents mécanismes de désintégration radioactive ainsi que les différentes caractéristiques que nous venons d'énoncer.

Différents types de rayonnements impliquent différentes techniques de protection. Différents radio-isotopes impliquent des durées d'atténuation différentes. Cela a des conséquences évidentes lorsqu'il s'agit de concevoir une installation puis d'y planifier

6. Une particule cède une part maximale de son énergie lors d'une collision avec une particule de masse équivalente, et le neutron possède une masse proche de celle du proton.

2.2. Quelques bases de physique nucléaire et de radioprotection

des interventions. Il ne faut pas uniquement penser au blindage, mais aussi aux accès et aux futurs moyens d'intervention (humains, télé-opérés, automatisés, etc.) qui seront mis en œuvre en fonction des sources et des niveaux de radioactivité en présence.

En revanche, ce qui ne varie pas selon le type de rayonnement ionisant, c'est la nécessité de protéger quiconque peut y être exposé et les grandeurs utilisées à cette fin. Pour cela, nous allons maintenant explorer les effets biologiques des radiations ainsi que les dispositions pratiques et légales mises en œuvre dans nos installations scientifiques émettant des rayonnements ionisants.

2.2.3 Effets biologiques des radiations et dosimétrie

Les rayonnements ionisants interagissent avec les constituants fondamentaux de la matière. Cette interaction de très bas niveau a des implications sur toutes les échelles supérieures : celles de la molécule, de la cellule et de l'organisme tout entier. À l'échelle de la molécule, l'ionisation des atomes peut rompre les liaisons covalentes. Et si la molécule touchée est par exemple l'ADN d'une cellule, il y a trois issues possibles comme illustré sur la figure 2.5 plus loin en page 34 :

- réparation totale de l'ADN : pas d'effet biologique ;
- réparation partielle ou défectueuse de l'ADN : mutation de la cellule et effets stochastiques ou mort cellulaire programmée ;
- pas de réparation car les dommages sont trop importants : mort cellulaire non contrôlée et effets déterministes (pathologies des tissus).

Avant de revenir sur ces différents effets, nous allons définir le plus succinctement possible les mesures sur lesquelles leur estimation se base.

Principales unités de dosimétrie

Dans les sections précédentes, nous avons décrit les types de rayonnements ionisants et insisté sur ce qui les différencie. Cependant, lorsqu'il s'agit d'en étudier les effets et de les quantifier, ce sont les mêmes grandeurs et les mêmes mesures qui sont considérées. Nous allons ici simplement donner les grandeurs les plus communes. Une liste plus complète des unités de dosimétrie ainsi que leurs utilisations sont données en annexe A.

Un rayonnement ionisant, quel qu'il soit, va interagir avec la matière (directement ou indirectement) en y déposant de l'énergie. C'est cette énergie déposée qui est au centre de l'attention lorsqu'il s'agit de mesurer l'exposition d'un matériau ou d'un être vivant aux radiations. On l'appelle *dose absorbée*, et elle se mesure en gray (*Gy*) qui sont des $J.kg^{-1}$, soit une quantité d'énergie déposée par unité de masse :

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} [J.kg^{-1}] = [Gy] \quad (2.11)$$

L'absorption d'une dose de radiation se résume à deux conséquences sur lesquelles nous allons revenir dans la prochaine section : des conséquences permanentes

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

stochastiques (thermoluminescence, modifications structurales, etc.) qui sont mineures, et une élévation de la température exprimée par la dose absorbée (1 Gy correspond à une hausse de $2 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$). De cette dose absorbée, on peut déduire le débit de dose absorbée, qui décrit la dose absorbée par unité de temps⁷ :

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} [\text{Gy.s}^{-1}] \quad (2.12)$$

Mais comme nous l'avons vu, les différents types de radiations déposent leur énergie dans la matière selon différents mécanismes, et à des profondeurs variées. Par exemple, les rayonnements α ne dépassent pas les cellules mortes de l'épiderme tandis que les rayonnements électromagnétiques traversent intégralement notre corps en n'étant que plus ou moins atténués par les tissus, ce qui implique des effets biologiques différents pour une même dose absorbée. La dose absorbée telle que définie ci-dessus n'en tient pas compte, et il faut ajouter de l'information afin décrire de façon plus exacte les doses reçues par les organismes vivants. Pour cela, des coefficients de pondération sans dimension notés w_R sont utilisés pour calculer une autre dose appelée *dose équivalente*. La dose équivalente H_T reçue par un organe T est calculée ainsi :

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} [\text{J.kg}^{-1}] = [\text{Sv}] \quad (2.13)$$

où $D_{T,R}$ est la dose reçue par l'organe T due aux rayonnements R . L'unité de la dose équivalente est le sievert (Sv). Il s'agit toujours de J.kg^{-1} , mais l'usage de cette grandeur est cette fois tourné vers les effets biologiques. Les valeurs des coefficients w_R sont données dans le Tableau A.1 en annexe A sur la dosimétrie. Par exemple, le coefficient de pondération du rayonnement α est plus important (de vingt fois) que ceux des rayonnements β et γ : s'il parvient jusqu'à des cellules vivantes (notamment par ingestion), l'énergie déposée sera plus importante que pour les deux autres car une particule α interagit plus fortement avec la matière de par sa taille qu'un électron ou un photon.

Il nous reste maintenant une dernière grandeur à définir avant de pouvoir décrire les effets biologiques des radiations. En effet, nous avons vu qu'une même dose absorbée n'avait pas le même effet selon le type de radiation. Il faut en plus de cela tenir compte du fait qu'une même dose absorbée provenant d'un type de rayonnement ionisant donné ne provoquera pas les mêmes effets selon l'organe touché : chaque organe de notre corps possède sa propre sensibilité aux rayonnements ionisants. Un nouveau jeu de coefficients sans dimension w_T est donc introduit pour traduire cette variabilité. La dose ainsi définie est appelée *dose efficace* et se calcule selon l'équation 2.14 :

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (2.14)$$

Il faut cependant noter que la dose équivalente et la dose efficace restent des grandeurs "virtuelles" que l'on ne peut que déduire de la dose absorbée. Leur existence

7. À chaque unité de dose définie dans la suite de ce chapitre correspond un débit de dose que l'on peut définir de la même façon. Il sera donc fait abstraction de ces définitions par la suite.

2.2. Quelques bases de physique nucléaire et de radioprotection

est essentiellement due à des raisons légales : elles permettent d'estimer un risque radio-induit stochastique sur l'ensemble des organes d'une personne pour l'ensemble des radiations reçues et ce indépendamment du moment où ces doses ont été reçues. Remarquons également que ces doses équivalentes et efficaces n'ont réellement de sens que pour des valeurs faibles de dose absorbée, pour lesquelles seuls des effets stochastiques sont observés.

Ces doses équivalente et efficace étant des doses “virtuelles” non mesurables, des grandeurs opérationnelles ont été définies pour effectuer les mesures et caractériser la dangerosité d'un champ de radiation pour l'organisme humain. Ces grandeurs opérationnelles sont basées sur une sphère de 30 cm de diamètre appelée sphère ICRU⁸. Cette sphère est une modélisation très simplifiée du corps humain en termes de dimensions et de composition⁹. À partir de cette sphère, trois grandeurs sont définies :

- l'équivalent de dose ambiant H^*d , qui est l'équivalent de dose à d mm de profondeur dans la sphère ICRU, qui est une bonne approximation pour les doses équivalentes reçues par les organes en profondeur en présence d'un rayonnement pénétrant. La valeur de d la plus courante pour cette mesure est 10 mm, et on parle alors dans ce cas de H^*10 ;
- l'équivalent de dose directionnel $H'(d, \Omega)$, qui est l'équivalent de dose obtenu pour les rayonnements faiblement pénétrants, à une profondeur de d mm dans la sphère ICRU. La valeur la plus courante de d pour cette mesure est 0,07 mm ; on parle alors de $H^*(0,07, \Omega)$;
- l'équivalent de dose individuel $H_p(d)$, de fonctionnement identique aux deux grandeurs précédentes utilisées pour la dosimétrie personnelle, visant notamment à estimer la dose efficace. Les profondeurs d utilisées en pratique sont les mêmes que celles de H^*d et $H'(d, \Omega)$.

À proximité d'une source radioactive, si celle-ci est considérée comme ponctuelle et en émettant l'hypothèse que le rayonnement ne s'atténue pas entre la source et le point d'intérêt, ces deux grandeurs opérationnelles sont exprimées suivant les équations 2.15 et 2.16 :

$$H^*10 = \dot{h}_{10} \times \frac{At}{r^2} \quad (2.15)$$

$$H^*(0,07, \Omega) = \dot{h}_{0,07} \times \frac{At}{10r^2} \quad (2.16)$$

où A est l'activité de la source considérée, r la distance entre la source et le point d'intérêt (en mètres), et t la durée d'exposition. $\dot{h}_{10}$ est la constante de débit d'équivalent de dose ambiant et $\dot{h}_{0,07}$ la constante de débit d'équivalent de dose directionnel à 0,1 m de distance de la source. Ces deux constantes sont déterminées expérimenta-

8. International Commission on Radiation Units and measurement, dont le rôle sera précisé dans le paragraphe sur la législation.

9. 76,2% d'oxygène, 11,1% de carbone, 10,1% d'hydrogène, et 2,6% d'azote pour une densité de 1 g.cm⁻³.

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

lement et fournies dans des tables pour des distances données à la source, notamment en $mSv.h^{-1}.GBq^{-1}$ [IRA 2010].

S'il n'est pas important de retenir tous ces termes et leur définition, il faut cependant retenir deux informations simples mais majeures des équations 2.15 et 2.16 : la dose reçue augmente avec la durée d'exposition et diminue selon l'inverse du carré de la distance à la source. Ce comportement est à la base des techniques de réduction des doses en radioprotection.

Effets biologiques des radiations

Il existe, comme nous l'avons brièvement mentionné, deux catégories d'effets biologiques des rayonnements ionisants : les effets déterministes, qui apparaissent à court terme suite à de fortes expositions et présentent des seuils d'apparition, et les effets stochastiques, qui peuvent apparaître pour toute exposition et sur des durées bien plus importantes (parfois au delà de la dizaine d'années). La Figure 2.5 résume les différents mécanismes d'altération de l'ADN et leurs conséquences.

Les effets déterministes résultent de la mort d'un grand nombre de cellules qui ne peuvent être réparées suite aux dommages subis à cause d'une forte exposition aux rayonnements ionisants (le seuil minimal est de 0,5 Sv, ce qui constitue une dose importante). Ils sont bien connus et identifiables par des symptômes qui leurs sont propres, sont reliés à des doses seuils à partir desquelles il est inévitable de voir une pathologie donnée se développer. Leur délai d'apparition est court : de l'ordre de quelques jours ou éventuellement du mois.

Le Tableau A.4 donné en annexe récapitule les différents effets biologiques déterministes locaux et globaux dus aux radiations, ainsi que les seuils d'apparition correspondants. La Figure 2.6 illustre les effets d'une exposition globale. Des seuils sont en effet déterminés pour des expositions locales de certains organes (yeux, peau, gonades et chez l'embryon pour les femmes enceintes). Ces données proviennent de données d'exposition dues à des accidents industriels ainsi que des effets de l'usage dramatique de la bombe atomique au Japon à Hiroshima et Nagasaki lors de la seconde guerre mondiale.

Les effets stochastiques résultent quant à eux de la survie de cellules dont la molécule d'ADN est réparée de façon défectueuse, ce qui entraîne des mutations. Si une mutation donnée concerne le génome d'une ou plusieurs cellules du corps, cela peut conduire à un cancer. Une mutation affectant les cellules reproductrices peut être transmise à la descendance au travers du patrimoine génétique (des effets d'une telle transmission n'ont cependant pas été constatés sur les populations japonaises de Hiroshima et Nagasaki après deux générations). Les caractéristiques des effets stochastiques peuvent être résumées en quatre points :

- ils ne sont pas spécifiques à un type de rayonnement ionisant donné ;
- ils n'apparaîtront que chez certains individus exposés ;

2.2. Quelques bases de physique nucléaire et de radioprotection

Effets déterministes	Effets stochastiques
Fortes doses (> 500 mSv)	Dès les doses faibles
Existence de seuils	Pas de seuil connu
Précoces (quelques heures ou jours)	Tardifs (Plusieurs années)
La gravité dépend de la dose	La fréquence dépend de la dose

Tableau 2.1 – Bilan comparatif des caractéristiques des effets biologiques déterministes et stochastiques d’une exposition à des rayonnements ionisants

- leur probabilité d’apparition augmente avec la dose reçue (le modèle couramment adopté est linéaire sans seuil)¹⁰ ;
- leur gravité est indépendante de la dose reçue.

Pour conclure cette section sur les effets biologiques, nous résumons les caractéristiques des effets déterministes et stochastiques dans le Tableau 2.1. Plus d’informations, notamment chiffrées, sur la dosimétrie et les effets des rayonnements ionisants sont données en annexe A pour le lecteur intéressé par ce sujet qu’il ne s’agit pas ici d’explorer en profondeur. Nous allons cependant laisser la théorie de côté pour la fin de ce chapitre et nous intéresser à nouveau aux interventions. En effet, si cette présentation plus théorique de la physique nucléaire et les rayonnements ionisants nous en a un peu éloignés, c’était pour mieux saisir les spécificités du risque radiologique et la nécessité de protection qui en découle. Car lorsque l’exposition aux rayonnements ionisants est répétée régulièrement et a lieu dans le cadre d’activités professionnelles, cette compréhension du phénomène et cette nécessité de protection deviennent des obligations.

10. Ce modèle a été choisi suite à l’extrapolation à des faibles doses des données d’irradiation des populations de Hiroshima et Nagasaki. C’est le modèle le plus pessimiste qui a été retenu par mesure de précaution. Cependant, il s’agit d’un sujet qui fait toujours (fortement) débat dans la communauté scientifique, certains pensant même que de faibles doses de radiations peuvent être bénéfiques à l’organisme. Il s’agit du concept d’hormèse, qui est cependant non démontré et marginal dans la physique nucléaire actuellement [Tubiana 2005, Pollycove 2008, Tubiana 2009].

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

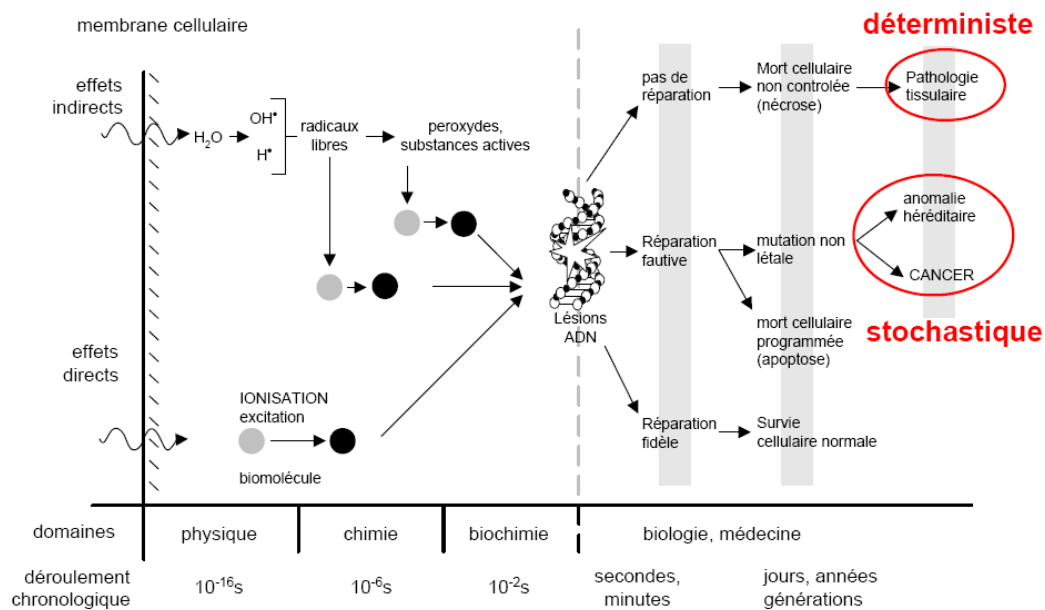


Figure 2.5 – Résumé des mécanismes d'altération de l'ADN par les rayonnements ionisants ainsi que des conséquences déterministes et stochastiques qui en résultent.
Source : [IRA 2011]

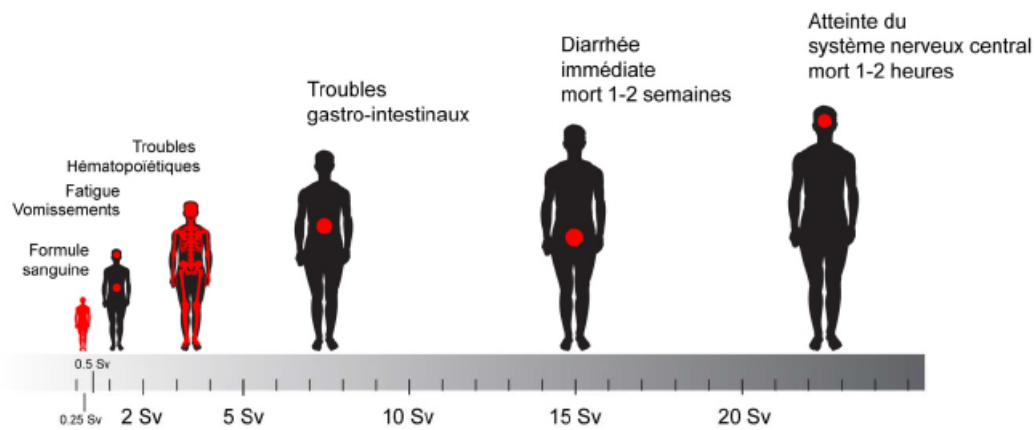


Figure 2.6 – Différentes pathologies (données avec leur seuil d'apparition) résultant d'une exposition globale et homogène d'un organisme aux rayonnements ionisants.
Source : [IRA 2011]

2.3. Le principe ALARA : optimisation des interventions en milieux ionisants

2.3 Le principe ALARA : optimisation des interventions en milieux ionisants

De par la gravité des effets sur le court comme sur le long terme ainsi que leur caractère potentiellement irréversible, il est nécessaire de protéger les travailleurs exposés aux radiations, tout comme le public. Nous l'avons constaté dans la section précédente, nous recevons chaque année une certaine dose de radiations dans de nombreuses activités de notre vie quotidienne : examens médicaux en tête, mais également vols en avion et exposition naturelle à l'enveloppe terrestre qui contient des éléments radioactifs comme l'uranium-138, le thorium-232 et le radon-220. Les doses supplémentaires, reçues dans le cadre des activités professionnelles constituent donc un risque pour les travailleurs, risque qu'il est important de contrôler au maximum.

2.3.1 Radioprotection et législation

Les doses doivent être “JOLi”

Une dose reçue dans le cadre professionnel doit être “*jolie*”. Ou plutôt JOLi comme l'indique l'acronyme de ce titre de section, qui est un moyen mnémotechnique simple et efficace pour se souvenir des trois piliers sur lesquels repose la radioprotection. Ces principes sont recommandés par les différents organismes internationaux s'intéressant à la radioactivité, et à la base des lois des différents états. Ils préconisent qu'une dose reçue dans le cadre professionnel doit être :

- Justifiée : une pratique entraînant la prise d'une dose de radiation doit contrebalancer par ses apports les détriments qu'elle implique. Autrement dit, l'exposition volontaire d'un humain à des rayonnements ionisants doit être plus bénéfique pour l'organisation et le public que le détriment sanitaire radio-induit causé si rien n'était fait.
- Optimisée : en se basant sur le modèle linéaire sans seuil de la relation dose reçue - effets indésirables, il faut s'assurer que la dose reçue est la plus basse possible en tenant compte des facteurs sociaux et économiques. Cette optimisation est typiquement implémentée selon l'approche ALARA sur laquelle nous allons revenir (cf section 2.3.2).
- Limitée : des maxima de dose reçue doivent être légalement implémentés. Pour les effets déterministes, ils doivent être inférieurs aux seuils d'apparition, et pour les effets stochastiques, il faut qu'ils soient définis selon des risques considérés comme “acceptables”, une notion que nous allons préciser par la suite.

Les principaux organismes internationaux mentionnés précédemment sont par exemple la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) ou ICRP en anglais, la CIUR, acronyme français désignant *the International Commission on Radiation Units and measurement (ICRU)* ou encore l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA). La CIPR émet de nombreuses publications, sous forme

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

de recommandations qui sont à la base des législations des états. L'ICRU est quant à elle chargée de la définition des grandeurs et des unités de radioprotection. L'AIEA, connue pour son rôle dans le monde entier dans la lutte contre la prolifération des armes nucléaires a également édité des normes sur les conditions de protection des humains face à l'exposition aux rayonnements ionisants.

Nous pouvons également noter les instances européennes, avec l'existence de l'Euratom, qui effectue des missions de recherche, de développement, mais aussi de normalisation pour la sécurité et la protection sanitaire des travailleurs et du public. Ces missions s'effectuent à l'échelle européenne et impliquent également du travail collaboratif entre les états, comme par exemple le projet ITER. De plus, chaque pays possède sa propre réglementation en matière d'exposition humaine aux radiations.

Quelques exemples de limitation

La limitation des doses reçues par le personnel exposé aux rayonnements ionisants doit prendre une forme légale comme nous l'avons précédemment mentionné. C'est d'ailleurs cette contrainte qui pèse le plus dans des installations telles que celles du CERN, car en réalité les doses reçues y sont très faibles pour la très large majorité du personnel. Cependant, les quelques travailleurs les plus exposés sont tenus de respecter des quotas sur la dose reçue sous peine de ne plus pouvoir accéder aux installations pendant une période plus ou moins prolongée. Ces quotas dépendent du pays ou de l'organisation dans laquelle la personne exerce son métier.

La CIPR a émis en 1990 dans sa publication numéro 60 [ICRP 1990] des recommandations de doses. Elle préconise une dose efficace de 20 mSv/an en moyenne pendant une période de cinq ans pour les travailleurs, et 1 mSv/an en moyenne pendant cinq ans pour le public. Rappelons que le seuil d'apparition des effets déterministes est de 50 mSv pour une seule exposition. Nous nous situons donc bien en deçà. La CIPR émet également des recommandations pour les doses locales (pour les yeux, la peau, les mains, etc.), et un récapitulatif est donné en annexe A. Il faut noter que la CIPR met régulièrement à jour ses recommandations, et elle l'a notamment fait en 2007 avec sa publication numéro 103 [ICRP 2007]. Cependant, la plupart des états se basent encore actuellement sur des publications antérieures (la numéro 60 pour la Suisse [IRA 2010, chapitre 12], la France [Jimonet 2009, chapitre 9, p 238] et l'Allemagne [Tübingen 2013]).

Le CERN étant de son côté une organisation internationale, il dispose de ses propres documents réglementaires (qui consistent souvent en la transcription de ceux des deux états hôtes avec prise en compte des "pratiques les plus avancées"). En ce qui concerne la radioprotection, les règles en vigueur au CERN suivent un document appelé Code de sécurité F [CERN 2006]. Les limites établies y sont égales voire inférieures aux réglementations internationales et à celles des états hôtes (France et Suisse). Pour la dose efficace, on retrouve la limite de 1 mSv sur 12 mois consécutifs pour les membres du public (notamment les nombreux visiteurs des différents sites) ainsi que les travailleurs dont le travail ne nécessite pas d'exposition aux rayonnements ionisants.

2.3. Le principe ALARA : optimisation des interventions en milieux ionisants

Dose annuelle (mSv)	Nombre de personnes concernées				
	(2005)	(2006)	(2007)	(2008)	(2009)
0.0	3074	4192	5131	5143	5042
0.1 - 0.9	1522	1738	898	1020	1219
1.0 - 1.9	53	37	33	40	39
2.0 - 2.9	9	17	2	3	13
3.0 - 3.9	3	4	1	1	2
4.0 - 4.9	4	2	1	1	0
5.0 - 5.9	1	0	0	0	0
>6	0	0	0	0	0

Tableau 2.2 – Distribution des doses personnelles annuelles au CERN entre 2005 et 2009. Nous pouvons constater que la dose seuil de 6 mSv sur 12 mois des personnels de catégorie B n’est jamais atteinte. Source : [Vincke 2011].

Pour les membres du personnel dont le travail justifie une exposition, deux niveaux sont définis :

- Catégorie A : la limite est de 20 mSv sur 12 mois consécutifs.
- Catégorie B : la limite est de $\frac{3}{10}$ de la limite maximale autorisée de 20 mSv, soit 6 mSv sur une période de 12 mois consécutifs.

Dans les deux catégories, on retrouve également des limites spécifiques de dose équivalente pour le cristallin (150 mSv) et la peau, les mains et les pieds (500 mSv). Des doses supérieures peuvent être acceptées pour des situations d’urgence : 50 mSv sur 12 mois, voire 250 mSv si ces tâches impliquent le sauvetage de vies humaines. En pratique, la dose annuelle de tous les travailleurs du CERN ne dépasse pas les 5 mSv pour les cas les plus extrêmes (voir Tableau 2.2).

Maintenant que nous avons vu les bases du principe de limitation, nous allons nous intéresser aux aspects opérationnels de la radioprotection, avec les deux autres grands principes que sont la justification et l’optimisation. S’il n’y a pas beaucoup à dire sur la justification tant elle est évidente, l’optimisation est au cœur de la planification d’interventions en milieux ionisants. Au CERN, à GSI et dans la totalité des installations scientifiques présentant des rayonnements ionisants, elle s’effectue selon une approche nommée “ALARA”.

2.3.2 L’approche ALARA : “As Low As Reasonably Achievable”

Aussi bas qu’il est raisonnablement réalisable, ou aussi bas que possible (l’acronyme ALARP est parfois également rencontré). C’est ainsi que nous pouvons traduire le plus fidèlement l’acronyme ALARA. Nous l’avons vu au début de ce chapitre, il faut se méfier du mot “*optimisation*” dans un contexte à objectifs et à critères multiples. Cependant, si l’approche ALARA est bien considérée comme une opti-

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

misation par les professionnels de la radioprotection¹¹, nous allons pouvoir vérifier qu'elle porte en elle une approche multicritère. En effet, optimiser une dose reçue ne se traduit pas par l'optimisation d'une seule grandeur. Et l'approche ALARA porte également dans son nom la notion même de compromis avec le mot *raisonnable* : réduire la dose, oui, mais pas à n'importe quel coût.

Pour définir l'optimisation d'une intervention en environnement émettant des rayonnements ionisants, citons le Code de sécurité F du CERN. Une intervention sera dite optimisée au sens de la méthode ALARA lorsque :

- diverses mesures appropriées ont été évaluées et comparées les unes aux autres du point de vue de la radioprotection ;
- le processus de décision ayant conduit à la solution choisie est argumenté ;
- le risque de défaillance a été pris en considération ;
- le nécessaire a été fait pour faire face aux conséquences à long terme pour la matière activée (réutilisation ou élimination).

Nous voyons bien par cette définition que l'approche ALARA n'est pas une optimisation au sens mathématique du terme, ne serait-ce que pour remplir le premier objectif mentionné ci-dessus. Il s'agit plutôt d'une approche d'optimisation sous contraintes qui considère plusieurs alternatives, à adopter ou non, en se basant sur des critères multiples, le tout dans un contexte très dépendant de l'intervention donnée : sa localisation, le degré d'activation des matériaux, les débits de doses et les doses reçues que l'on juge acceptables, le nombre de personnes potentiellement exposées (pouvant être des personnels de l'organisation, mais aussi des employés d'entreprises extérieures sous contrat) et les coûts acceptables à mettre en œuvre sont autant de facteurs qui ne permettent pas d'effectuer une optimisation automatisée et mathématique sur le seul critère temporel. L'intervention de l'humain dans le processus de planification est dès lors nécessaire.

Donnons simplement l'exemple du premier point : choisir la ou les mesures de réduction de la dose reçue. Réduire une dose de radiations¹² peut se faire selon trois mécanismes que nous avons mentionnés lors de la description des différents rayonnements ionisants et des unités de dosimétrie :

- diminution de la *durée d'exposition* : préparation méticuleuse préalable (exercices de répétition, préparation de tout le matériel nécessaire, etc.), prise en compte des retours d'expérience, partage de la dose entre plusieurs personnes en partageant le temps d'exposition ;
- augmentation de la *distance* à la source : travailler avec des pinces pour saisir les sources, utiliser des moyens d'intervention télé-opérés ou automatisés, emporter les éléments sur lesquels on doit travailler à distance des sources s'ils ne sont pas eux-mêmes activés, etc ;
- se protéger derrière un écran de protection fixe ou mobile, en adaptant le choix du matériau selon le type et l'énergie du rayonnement ionisant.

11. Dans les documents de la CIPR, les deux termes sont considérés comme synonymes [Bonnal 2006b].

12. Nous nous focaliserons ici sur l'exposition externe qui est le cas rencontré en fonctionnement normal dans les installations scientifiques produisant des rayonnements ionisants.

2.3. Le principe ALARA : optimisation des interventions en milieux ionisants

Si l'on considère ces trois axes utilisables pour réduire la dose, on se rend rapidement compte qu'ils peuvent être contradictoires : se passer d'écran de protection peut permettre de réduire le temps d'exposition, mais le débit de dose auquel on s'expose peut alors être bien plus important.

Détailler tous les aspects de l'approche ALARA nous prendrait bien plus de temps et de place que nous pouvons nous le permettre dans cette thèse. Le document [Bonnal 2006b] définit avec précision tous les aspects de cette méthode et son utilisation au CERN que nous allons maintenant brièvement décrire.

2.3.3 ALARA au CERN

La mise en œuvre de l'approche ALARA au CERN est systématique pour toute intervention impliquant une exposition du personnel aux rayonnements ionisants. Il s'agit d'un travail collaboratif entre le groupe de radioprotection (RP) et les autres départements et éventuellement avec toute entreprise extérieure intervenant sur les sites du CERN.

L'objectif de cette implémentation est d'optimiser la coordination entre les différentes entités, les procédures de travail, les outils de manipulation et les matériaux utilisés dès la phase de conception des installations afin de diminuer les doses reçues lors de futures interventions humaines. La mise en œuvre de l'approche ALARA dès la phase de conception des installations ou des interventions passe par plusieurs actions qui sont soit concrètes et opérationnelles (analyse de différents scénarii en se basant sur différentes options de radioprotection, utilisation des retours d'expérience sur des tâches ou des installations similaires, etc.) soit que l'on peut plutôt qualifier de préventives ou stratégiques (choix de matériaux spécifiques selon leur exposition aux faisceaux, objectifs dosimétriques optimisés) car elles ont lieu très en amont de la planification des interventions.

Les procédures à adopter varient selon les doses ou les débits de doses anticipés. Trois niveaux ALARA sont définis¹³, en fonction des conditions dosimétriques, et pour chacun, un Dossier d'Intervention en Milieu Radioactif (DIMR) du niveau adapté doit être réalisé. Il sert en quelque sorte de permis de travail pour les tâches envisagées, et contient les informations relatives à la dosimétrie anticipée et effective :

- Niveau I : risque radiologique bas, procédures légères. Exemples : dosimétrie personnelle (passive et opérationnelle), analyse radiologique de base, retour d'expérience.
- Niveau II : risque radiologique moyen, les procédures nécessitent une optimisation plus poussée. En plus du niveau I : une cartographie dosimétrique est demandée. Il est de surcroît recommandé de procéder à des analyses multicritères et de réaliser une documentation descriptive, justificative et d'exploitation.
- Niveau III : risque radiologique important. Une optimisation importante est requise et la procédure est suivie par un comité ALARA qui doit prendre les décisions (validation, refus etc.). Les différentes analyses et documentations

13. Les différents débits de doses, doses collectives et niveaux de contamination utilisés pour définir ces niveaux ALARA sont fournis en annexe A, Figure A.1.

recommandées au niveau II sont exigées, et des calculs de champs de radiations à l'aide de codes simples voire plus élaborés doivent être réalisés.

Notre objectif, en mentionnant rapidement ces procédures est de montrer qu'il existe déjà des mécanismes adaptés à la planification d'intervention en milieux radioactifs au CERN (et dans d'autres laboratoires similaires) et en donner une rapide description sans toutefois entrer dans les détails.

Cela nous permet ainsi de compléter la description du contexte dans lequel ce travail de thèse se situe : la démarche ALARA en constitue les fondements, puisqu'il s'agit ni plus ni moins de travailler sur des méthodes d'optimisation de dose reçue dès la phase de conception de l'intervention. Pour les lecteurs intéressés par le sujet, les documents [Bonnal 2006a] et [Vincke 2011] fournissent tous les détails des exigences pour chaque niveau ALARA, et un tableau récapitulatif est fourni en Tableau 2.3.

2.4 Simulation des champs de radiations par les codes de calcul Monte Carlo

2.4.1 Estimation des champs de radiations

Nous avons pu constater qu'une part importante de la planification d'interventions dans des milieux présentant des rayonnements ionisants se base sur la connaissance (même partielle) des champs de radiations auxquels les travailleurs seront exposés. Cette connaissance des sources et de leur activité ainsi que des débits de doses qu'elles entraînent est indispensable à la détermination des différentes options de radioprotection à envisager. Cependant, nous n'avons jusqu'à présent pas encore abordé une question d'importance, à savoir : comment obtenir ces informations ? C'est ce à quoi nous allons répondre pour clore ce chapitre 2.

Il existe trois modes opératoires utilisés au CERN, à GSI et dans les installations similaires pour acquérir des données sur un champ de radiations, chacun d'entre eux possédant ses avantages et ses inconvénients :

- la mesure manuelle des radiations au moyen d'un détecteur mobile, pouvant à terme être remplacée par la mesure télé-opérée ;
- la mesure à distance avec des détecteurs fixes implantés dans les installations ;
- la simulation des champs de radiations à l'aide de codes de calcul.

Commençons par la mesure manuelle. C'est la méthode qui permet d'obtenir le meilleur compromis entre véracité des valeurs et précision des mesures. Elle consiste en l'envoi d'un agent en radioprotection pour effectuer une mesure précisément dans la zone voulue (en supposant qu'elle est accessible). L'agent peut effectuer plusieurs mesures ponctuelles, avec une granularité ajustable (une mesure tous les 10 m, tous les 50 m etc.). En outre, le technicien dispose d'une certaine flexibilité et peut attacher plus d'attention à certains équipements particulièrement activés (par exemple les points chauds comme les collimateurs). L'inconvénient majeur de cette méthode est évidemment qu'une dose de radiations est reçue pour acquérir ces données. La précision des mesures peut également laisser à désirer : à moins que la personne qui

2.4. Simulation des champs de radiations par les codes de calcul Monte Carlo

Type d'intervention		répétitives / génériques			ponctuels / unitaires		
Niveau de risque		I	II	III	I	II	III
Dosimétrie individuelle		●	●	●	●	●	●
Dosimétrie opérationnelle avec alarme		●	●	●	●	●	●
Dossier de sécurité	Docts. descriptifs		○	○			○
	Docts. justificatifs		○	●			●
	Docts. d'exploitation		○	○			○
Analyse de risques radiologiques		●	●	●	●	●	●
Calculs radiologiques / codes simples				●			●
Calculs radiologiques / codes élaborés				●			●
Justification par analyses multi-critères			○	●		○	○
Prise en compte du retour d'expérience		●	●	●	●	●	●
Dossier d'intervention en milieu radioactif	DIMR de niveau I	●			●		
	DIMR de niveau II		●			●	
	DIMR de niveau III			●			●
Cartographie dosimétrique		○	●	●	○	●	●
Relevé de décisions du comité ALARA				●			○
Fiche d'écart / Retour d'expérience		○	○	○	○	○	○

Tableau 2.3 – Dispositions et livrables exigés (marques noires) et recommandés (marques blanches) lors de l'estimation du risque radiologique lié à une future intervention au CERN. Source : [Bonnal 2006a].

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

effectue les mesures n'adopte une granularité très fine (de l'ordre du mètre), ce qui peut résulter en une dose importante, la description du champ de radiations obtenue n'est que partielle, et il est toujours possible d'omettre un point chaud.

Le remplacement d'un technicien par des moyens robotisés ou télé-opérés de mesure des radiations est également envisageable, avec comme bénéfices la possibilité de réduire la granularité des mesures et de supprimer la dose reçue par le technicien, surtout dans les zones à débits de dose élevés. Cependant, cela demande d'importants moyens de développement pour obtenir des équipements fiables, maintenables, disponibles et résistants aux radiations (celles-ci peuvent en effet perturber le fonctionnement des composants électroniques embarqués tout comme elles endommagent les cellules vivantes). De plus, dans des installations dédiées à la recherche en évolution permanente, les moyens télé-opérés ne peuvent pas toujours accéder aussi aisément aux installations qu'un humain ¹⁴.

La mesure à distance consiste à disposer des détecteurs dans les zones d'intérêt pour surveiller le champ de radiations ambiant. Elle est utilisée en particulier dans les zones à forts débits de doses, et permet d'obtenir régulièrement des données sur les conditions de radiations présentes. Comme pour les mesures manuelles, la mesure passive à distance possède l'inconvénient d'une granularité des mesures trop grande et donc un manque de précision dans la forme globale du champ de radiations. Plusieurs détecteurs différents sont utilisés pour cette mesure [Vincke 2011]. Cependant, ils ne se substituent pas à la dosimétrie personnelle requise par l'approche ALARA lors de l'exposition du personnel.

La dernière méthode que nous allons aborder est aussi celle qui est la plus utilisée dans ce travail de thèse : il s'agit de la simulation à l'aide de codes de calcul Monte Carlo. Il existe de nombreux codes pour simuler le transport de particules élémentaires ainsi que leurs interactions avec la matière. Parmi les codes couramment utilisés, citons GEANT4 [Agostinelli 2003, Allison 2006], MCNP [Team 2008], MARS [Mokhov 1995, Mokhov 2005], ou encore FLUKA [Fasso 2005, Battistoni 2007]. Ce dernier est un code de transport généraliste, adapté à de nombreux types de particules et une large gamme d'énergies et notamment à ceux et celles rencontrés dans les installations du CERN ou de GSI. Il a été étalonné de façon importante pour une utilisation en radioprotection pour des applications variées [Brugger 2005a, Brugger 2005b, Brugger 2006] ce qui en fait un outil fiable pour étudier la radioprotection. C'est notamment le code Monte Carlo de prédilection du CERN ou encore de GSI en matière de radioprotection.

L'utilisation de FLUKA permet de simuler l'irradiation d'une géométrie (un modèle en trois dimensions de l'installation à laquelle on s'intéresse) par un faisceau de particules de nature et d'énergie ajustables. Le résultat obtenu (cf Figure 2.7) est un (voire plusieurs) champ(s) scalaire(s) en trois dimensions dans la ou les grandeurs souhaitées. On peut en effet en simuler un nombre important à l'aide de FLUKA, de la dose absorbée en gray au débit de dose équivalente (typiquement en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$

14. Nous nous trouvons ici typiquement dans un cas d'illustration de l'approche ALARA : compte tenu des coûts et des limitations possibles pour un équipement robotisé ainsi que des doses considérées, ne serait-il pas acceptable d'envoyer un technicien ?

2.4. Simulation des champs de radiations par les codes de calcul Monte Carlo

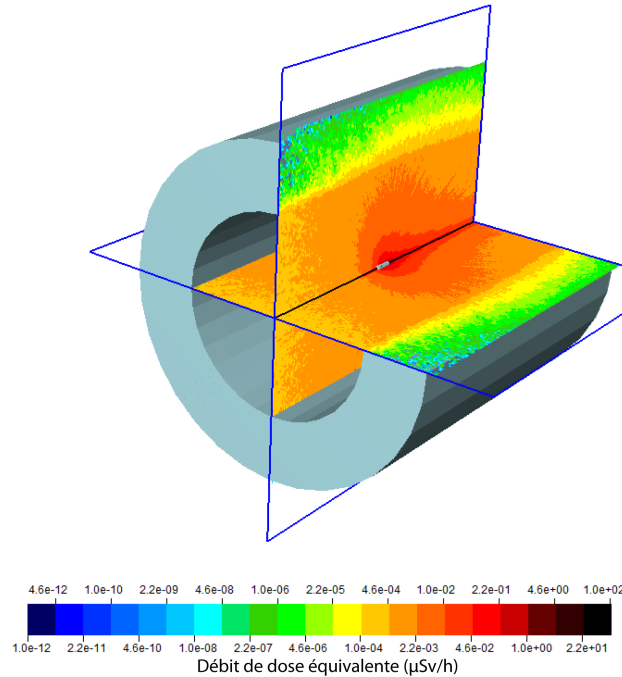


Figure 2.7 – Exemple simple d'utilisation de FLUKA. Débit de dose équivalente (en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$) suite à l'irradiation d'une cible cylindrique en fer par un faisceau de protons de moment cinétique 450 GeV/c entouré d'un blindage de béton. Visualisation à l'aide du logiciel SimpleGeo.

même si l'unité S.I. est le Sv.s^{-1}) en passant par le flux de particules intégré sur le temps (appelé fluence). En radioprotection, on va essentiellement s'intéresser aux doses absorbées et aux doses équivalentes et pour la planification d'intervention, la grandeur simulée majoritairement est le débit de dose équivalente $\dot{H}_T$.

Par comparaison avec les mesures *in situ* manuelles ou à distance utilisant des détecteurs, on constate que la simulation a un apport non négligeable : le champ de radiations obtenu est presque continu¹⁵, et sa forme (variations, maxima et minima, etc.) sera exacte si la géométrie est fidèle à la réalité. Les inconvénients sont liés au fait qu'il ne s'agit que de simulation. On se trouve alors déconnecté du terrain, et si la forme du champ simulé est fiable, les valeurs ne le sont pas. En effet, FLUKA simule les grandeurs à un instant donné, soit la valeur instantanée lors de l'irradiation, soit des valeurs de champ discrètes pour des durées de refroidissement définies. Il est ainsi souvent nécessaire de réajuster les valeurs de la simulation pour se replacer au bon instant sur la courbe de décroissance, et toute simulation doit, pour être utile en termes de planification, être validée à l'aide de mesures sur le terrain, typiquement à l'aide des détecteurs fixes implantés dans les installations.

15. Presque seulement, car il est en réalité basé sur un maillage, qui peut être de l'ordre de quelques centimètres voire de quelques millimètres sur des géométries de taille réduite.

2.4.2 Utilisation de FLUKA et exemple de la zone TCC2 au CERN

Le fichier de données

Les données issues de FLUKA sont au cœur de ce travail de thèse, et ce pour deux raisons principales. Tout d’abord, lorsqu’un ensemble de tâches classées ALARA niveau III est envisagé, les estimations dosimétriques sont effectuées à l’avance, bien avant qu’il soit possible de connaître les conditions radiologiques qui seront effectives lors de l’intervention. Cela est rendu nécessaire par la démarche ALARA : il faut à l’avance envisager toutes les options de radioprotection possibles et choisir la plus adaptée en termes de doses reçues (doses individuelles et dose collective) et de coût. Ainsi, notre travail de planification collaborative se situe très en amont de la réalisation et ne peut bénéficier que d’estimations de doses. Et en termes d’estimations, ce sont les cartographies fournies par les codes de calculs qui offrent le plus de possibilités de par leur très fine granularité.

Notre second intérêt dans l’utilisation de FLUKA vient de la possibilité que ce code offre pour l’optimisation des tâches individuelles d’une intervention en termes de doses reçues, comme nous allons le montrer après une brève description de son utilisation.

Une simulation FLUKA se base sur un seul fichier de données (*input file*) qui contient toutes les informations nécessaires¹⁶. Pour illustrer, un exemple de ce fichier de données est présenté en Figure 2.8. Il s’agit d’un exemple encore plus simple que celui ayant permis de produire la Figure 2.7, car la cible (ici en cuivre) n’est pas entourée de blindage. Cet exemple a en revanche l’avantage d’être très court et de pouvoir être affiché entièrement dans une fenêtre, ce qui en fait une bonne illustration. On peut y retrouver :

- la nature et l’énergie du faisceau de particules incidentes (cartes¹⁷ *BEAM* et *BEAMPOS*) ;
- la géométrie exposée en deux parties. D’abord les corps (*bodies*) qui sont des éléments géométriques (plans, cylindres, parallélépipèdes, etc.) puis les régions obtenues à partir d’eux par intersections, unions et soustractions ;
- l’assignation des matériaux aux différentes régions (cartes *ASSIGNMA*) ;
- les approximations et informations physiques comme les seuils de transports ou de création de particules¹⁸ (cartes *DISCARD*, *EMF*, *EMFCUT*) ;
- les détecteurs utilisés qui définissent les grandeurs à simuler (cartes *USRBIN* pour les doses absorbées et doses équivalentes, *USRBDX* pour les fluences) ainsi que leur maillage (on peut ainsi ne mesurer une grandeur que sur une partie de la géométrie) ;

16. Certaines fonctionnalités spéciales peuvent cependant requérir l’utilisation de routines externes en Fortran voire en C. C’est le cas par exemple de l’ajout de champs magnétiques. Il s’agit cependant de fonctionnalités avancées qui ne seront pas détaillées dans cette thèse.

17. Terme désignant les commandes utilisées pour programmer pour FLUKA.

18. Les seuils sont les valeurs d’énergies en dessous desquelles une particule appartenant à une cascade ne sera pas prise en compte pour le transport dans le milieu ou pour la création d’une particule fille.

2.4. Simulation des champs de radiations par les codes de calcul Monte Carlo

```

input.inp - /home/flupix/Desktop/fluka_work/2011_11_24/
File Edit Search Preferences Shell Macro Windows Help
[
TITLE
First Geometry
DEFAULTS
BEAM          400.0      0.0      PRECISIO
BEAMPOS       0.0      0.0      -50.      0.0      PROTON
* -----*
GEOBEGIN
0 0 First Geometry COMBNAME
SPH BLKH      0.0 0.0 0.0 9999.0
RPP AIR       -1000. 1000. -1000. 1000. -1000. 1000.
* Copper target
RCC TRGT      0.0 0.0 -25. 0.0 0.0 50. 3.5
END
* Creating regions
BLKHOLE       5 +BLKH -AIR
AIR           5 +AIR -TRGT
TARGET        5 +TRGT
END
GEOEND
* -----*
* Assigning materials to regions
ASSIGNMA      BLKHOLE BLKHOLE
ASSIGNMA      AIR      AIR
ASSIGNMA      COPPER   TARGET
* -----*
DISCARD       NEUTRIE ANEUTRIE
DISCARD       -MUON+   MUON-
EMF
EMFCUT        -100E-5  50E-5      0.0  COPPER @LASTMAT      PROD-CUT
EMFCUT        -100E-5  50E-5      0.0  BLKHOLE @LASTREG
* -----*
* Two USRBIN for received dose and dose equivalent
USRBIN        10.      DOSE      -50.      5.0      5.0      30.0dose
USRBIN        -5.0     -5.0      -30.0     200.0     200.0     200.0&
USRBIN        10.      DOSE-EQ    -50.      200.0     200.0     200.0dose eq
USRBIN        -200.0    -200.0    -200.0     200.0     200.0     200.0&
* -----*
* Measuring fluence for protons neutrons and pion+-
USRTRACK      -1.      PROTON     -54.      AIR      1.0      200.0ProtFlu
USRTRACK      1.E-14
USRTRACK      -1.      NEUTRON     -54.      AIR      1.0      200.0NeutFlu
USRTRACK      1.E-14
USRTRACK      -1.      PIONS+-    -54.      AIR      1.0      200.0PionFlu
USRTRACK      1.E-14
* -----*
RANDOMIZ
START         2.E5
STOP

```

Figure 2.8 – Fichier de données FLUKA. On peut y repérer les différents éléments importants comme la définition du faisceau et de la géométrie, l'assignation des matériaux et le choix des grandeurs à simuler.

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

- le nombre d'événements à simuler (carte *START*) : ici 2×10^5 particules primaires sont dans le faisceau. Chacune est envoyée sur la cible et donne naissance à une cascade de particules secondaires, puis tertiaires et ainsi de suite qui sont propagées dans la matière jusqu'à arriver en dessous des seuils de transport et ou de création définis ci-dessus. Un nombre important de particules primaires garantit des statistiques fiables.

Nous pouvons également constater que le format de ce fichier n'est pas flexible. Chaque ligne correspond à une commande basée sur du Fortran77 appelée *card* (carte en français) qui comprend sept champs (numériques ou chaînes de 8 caractères maximum). Leur alignement sur le fichier doit être respecté.

Fort heureusement, des logiciels sont disponibles depuis quelques années pour simplifier la création des fichiers et notamment des géométries (les plus complexes pouvant atteindre plusieurs milliers de lignes de code). Le plus utilisé et soutenu par la communauté FLUKA est FLAIR [Vlachoudis 2012, Vlachoudis 2009], qui permet à la fois la création de la géométrie (malheureusement uniquement en deux dimensions) mais également du fichier de données entier ainsi que le lancement de la simulation et le traitement des résultats. Un autre outil, SimpleGeo [Theis 2009, Theis 2006], dont un aperçu est fourni en Figure 2.7, est disponible et a l'avantage de permettre une représentation en trois dimensions de la géométrie. Il permet également de travailler à partir de fichiers provenant de la CAO et réciproquement d'exporter les géométries dans ces formats.

Utilisation sur un cas pratique : la zone TCC2 au CERN

Nous allons à présent illustrer la simulation avec le code de calcul dans un cas pratique : la préparation des interventions de maintenance et de consolidation dans la zone TCC2 au CERN. Située dans la zone de cibles au nord du SPS (Super Proton Synchrotron, cf. section 1.2.2), il s'agit d'une des zones les plus radioactives du CERN car les faisceaux de protons y sont envoyés sur des cibles métalliques afin de produire des faisceaux secondaires qui vont par la suite être utilisés pour des expériences dans la zone expérimentale Nord. Et de par la forte activation générée, la physique sur cibles a, pour des énergies équivalentes, des conséquences radiologiques bien supérieures à celles des collisions comme dans le LHC.

La zone TCC2 se présente comme illustrée en Figure 2.9. On peut y distinguer trois lignes de faisceaux qui se situent dans le prolongement respectif des trois cibles T2, T4 et T6 (entourées en rouge sur la Figure 2.9). Sur chacune de ces lignes se trouve un dispositif appelé TAX¹⁹ (en bleu sur la Figure 2.9). Sans entrer dans les détails, ces derniers sont des éléments de collimation et d'atténuation du faisceau. Ils sont montés sur moteurs et percés de plusieurs trous selon des angles précis [CERN EN-Department 2012]. Il est possible de faire passer les champs secondaires dans ces trous pour orienter les lignes de faisceaux dans les directions souhaitées, ou au contraire de les disposer en mode *dump* pour intercepter les faisceaux. En termes de

19. TAX pour Target Attenuator of the eXperimental areas

2.4. Simulation des champs de radiations par les codes de calcul Monte Carlo

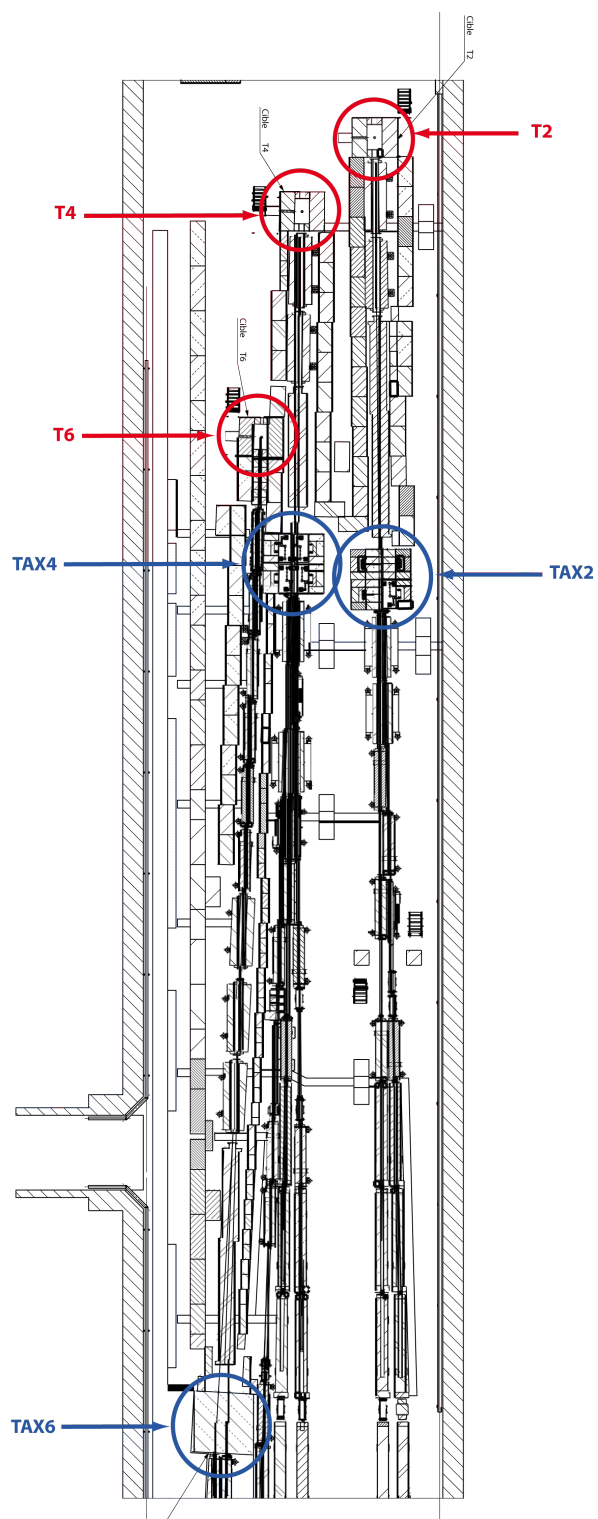


Figure 2.9 – Plan détaillé de la zone TCC2 avec les trois lignes de faisceaux L2, L4 et L6, les trois cibles T2, T4 et T6 et les trois TAX.

Chapitre 2. Interventions humaines en environnements présentant des risques : cas des rayonnements ionisants

débites de dose, les cibles et les TAX sont les éléments les plus activés, suivis par les aimants des lignes de faisceaux.

Les estimations des doses équivalentes reçues par le personnel ont donc été réalisées à partir de simulations FLUKA. De la réplique de la géométrie à partir de modèles CAO et de documents techniques jusqu'aux simulations, près d'un an s'est écoulé car il s'agit là déjà d'un travail fortement collaboratif :

- le bâtiment et le blindage ont été réalisés sous SimpleGeo à partir d'un modèle CAO ;
- les lignes de faisceaux ont été modélisées par le groupe STI (Sources, Target and Interactions) du département d'ingénierie sous le logiciel FLAIR et à partir de plans détaillés en format PDF ;
- la fusion des deux géométries a été effectuée sous chaque logiciel, afin d'obtenir une version optimisée pour chacun. Cette tâche a été assez lourde, compte tenu des différents systèmes d'axes adoptés dans chaque géométrie ainsi que des différentes régions à fusionner (cf. Figure 2.10).

C'est seulement une fois les géométries établies, fusionnées et entièrement vérifiées qu'il a été possible de procéder aux simulations. Celles-ci ont été effectuées pour chaque ligne de faisceau séparément car FLUKA ne peut prendre en compte qu'une seule source de faisceau à la fois, et selon deux scénarii pour chacune, avec le TAX en place et sans le TAX en place, donc sans le débit de dose qu'il génère. Ces six simulations ont été réalisées avec la même séquence d'irradiation : chaque année, le faisceau est arrêté en novembre et reprend aux alentours de mars. Cette opération a été effectuée pendant trente-six ans, qui ont été considérés comme une irradiation moyenne continue jusqu'en 2011, opération et arrêts compris dans un débit moyen de particules. L'année 2012 a quant à elle été prise en compte de façon plus détaillée, avec les six mois d'arrêt fin 2011 puis les six derniers mois d'irradiation jusqu'en novembre 2012. Une période d'un an de refroidissement a ensuite été ajoutée, car les interventions devaient commencer en novembre 2013, et c'étaient donc les débits de dose à cette date qui étaient intéressants.

Les résultats fusionnés des trois lignes de faisceau pour le scénario sans les TAX en place sont montrés en Figure 2.11. À partir de ces cartographies, des estimations de doses reçues pour certaines tâches spécifiques ont pu être effectuées [TDC2/TCC2 Working Group 2013] avant d'être confirmées par des mesures manuelles. Par exemple, le démontage et la maintenance des TAX ont été estimés à 11505 μSv à répartir sur 20 personnes.

Ces résultats ne sont cependant qu'une première étape. Pour toute tâche envisagée dans la zone, il faut alors estimer les doses reçues lors de l'exécution, et chercher à l'optimiser dès la phase de planification, ce qui constitue une tâche complexe et difficilement automatisable, car des interventions humaines sont nécessaires d'un bout à l'autre du travail. Ceci nous ramène donc à notre problème de planification, et à la conclusion de ce chapitre 2.

2.4. Simulation des champs de radiations par les codes de calcul Monte Carlo

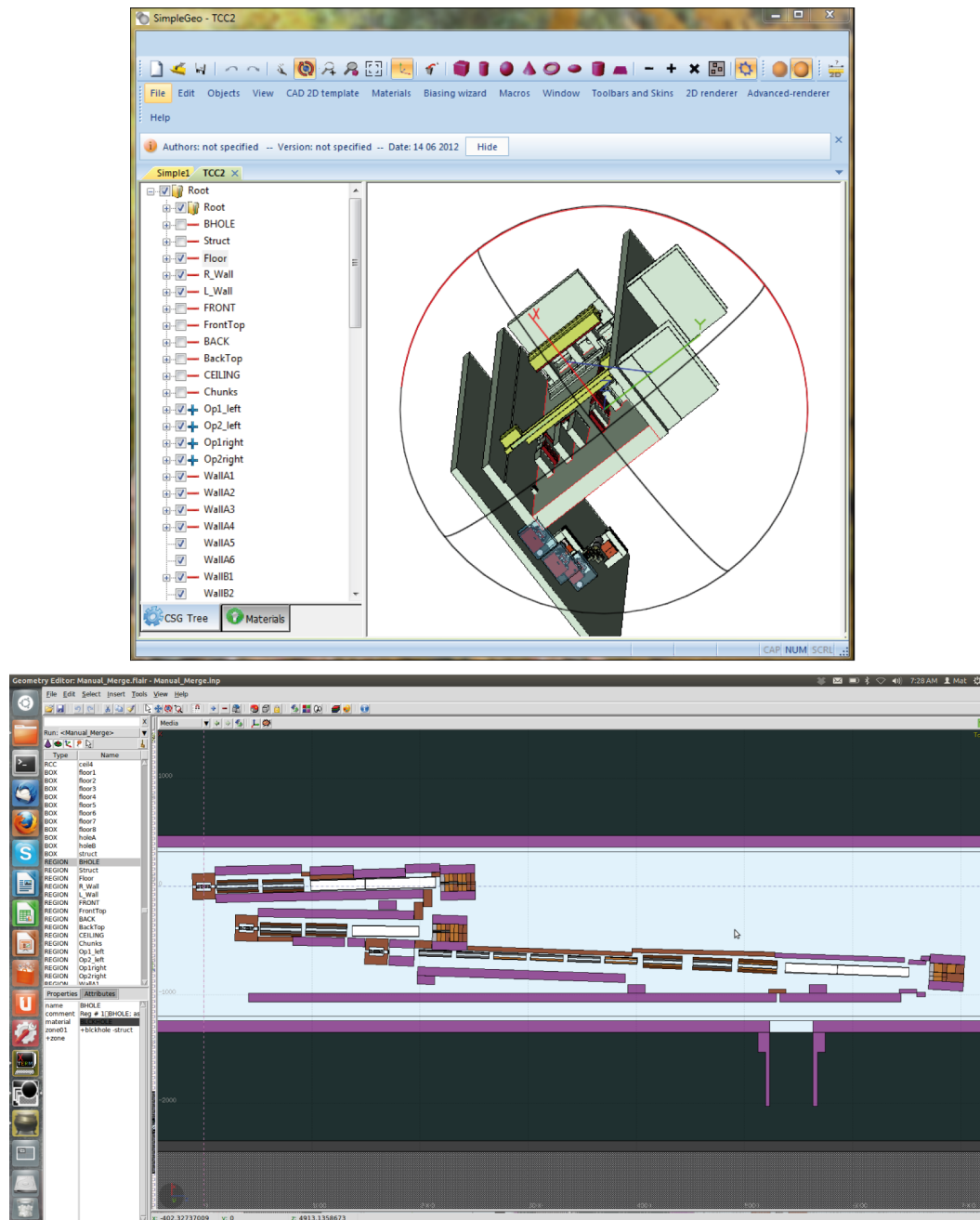


Figure 2.10 – Fusion des deux géométries de la zone TCC2 (bâtiment et blindage avec lignes de faisceaux). Au-dessus : les deux géométries dans SimpleGeo au début de la fusion, avec systèmes d'axes différents et régions définies en doubles comme par exemple l'air autour des cibles. En dessous : géométries fusionnées sous FLAIR en fin de travail.

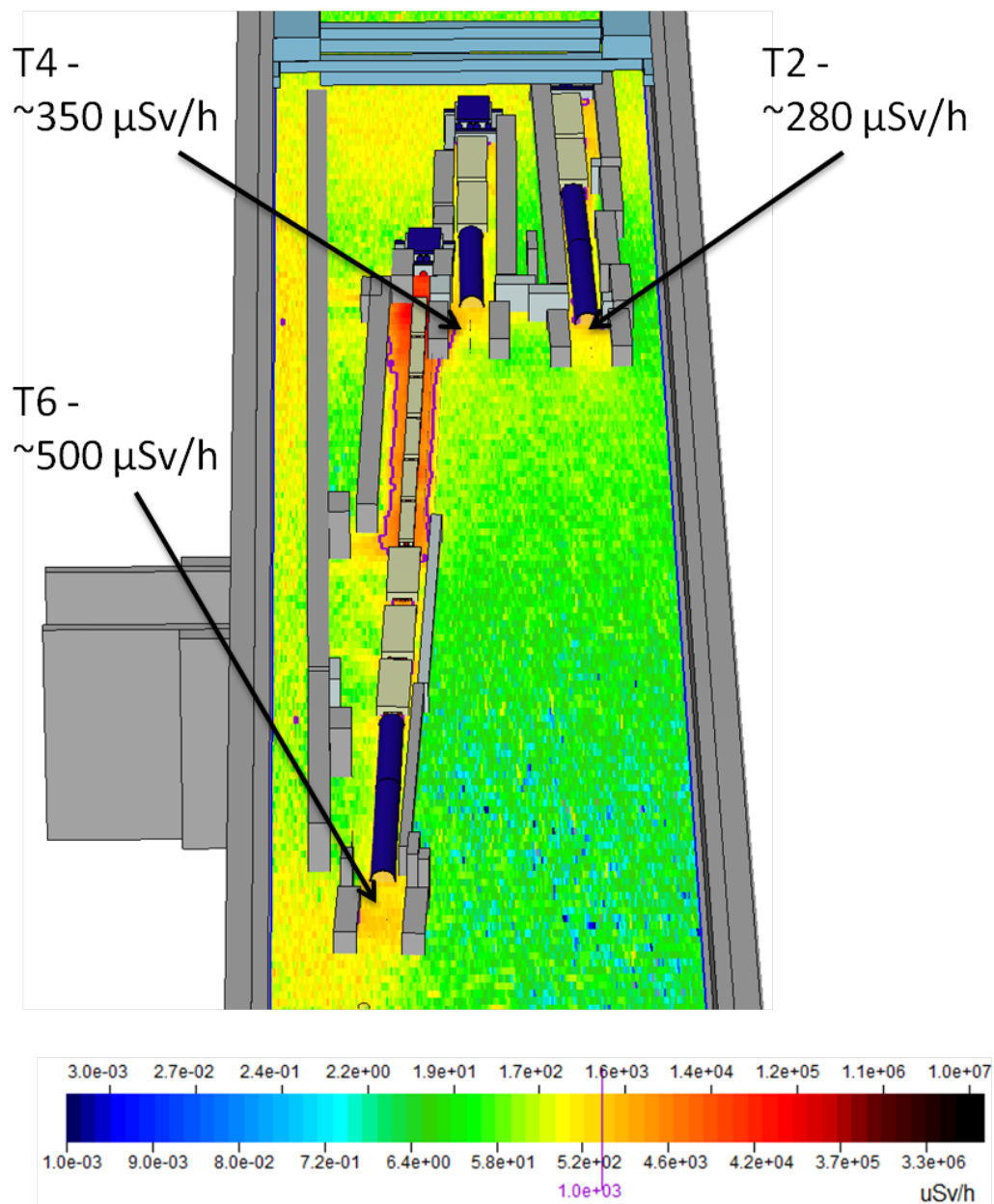


Figure 2.11 – Résultats des simulations de débits de dose fusionnés pour les trois lignes de faisceau de TCC2, dans le cas où les TAX sont démontés. On peut constater que des débits importants sont observés, allant jusqu'à environ $500 \mu\text{Sv/h}^{-1}$ au niveau du TAX6.

2.5. Conclusions sur les interventions en milieux présentant des rayonnements ionisants

2.5 Conclusions sur les interventions en milieux présentant des rayonnements ionisants

Nous avons traité de nombreux sujets dans ce chapitre. Nous y avons décrit les interventions en milieux présentant des risques d'un point de vue général, avant de nous pencher plus spécifiquement sur le risque d'exposition aux rayonnements ionisants dans des installations scientifiques.

Nous avons ensuite présenté les spécificités de l'exposition aux radiations, en remontant jusqu'aux définitions et aux phénomènes de base de la radioactivité, et à la description physique des rayonnements ionisants (différentes particules et ondes électromagnétiques, interactions avec la matière, ionisation et effets biologiques). Ces définitions nous ont permis de décrire ensuite les mesures opérationnelles à prendre pour traiter le risque radiologique, en définissant les grandeurs à considérer en dosimétrie (dose absorbée, dose équivalente, débits de dose équivalente ou absorbée etc.) et les procédures mises en œuvre dans le monde professionnel dans le cadre notamment de l'approche ALARA.

Finalement, nous avons mentionné comment mesurer ou prédire les grandeurs dosimétriques dans le but d'estimer les doses reçues lors d'interventions et procéder à un travail d'optimisation qui va à présent nous occuper. Ces mesures peuvent être effectuées sur le terrain ou à distance avec des détecteurs, mais en nous situant dans le cadre de la planification, très en amont d'une éventuelle intervention, ces données ne sont pas disponibles. La simulation permet en revanche de pallier ce problème et de fournir des champs de radiation avec une grande précision, avant de comparer ses valeurs avec les conditions réelles et d'effectuer une remise à l'échelle le moment venu.

Mais à partir de ces simulations ou de ces mesures, comment estimer une dose ? Comment procéder à l'optimisation de chaque tâche individuellement et de l'intervention dans sa totalité (du point de vue de la dose collective) ? Cette question serait suffisamment riche pour remplir au moins deux thèses de doctorat.

En effet, l'optimisation d'une tâche individuelle, séparée de son contexte, relève de procédures opérationnelles comme l'optimisation des trajectoires suivies lors d'une intervention ou les manipulations à effectuer sur la zone d'intervention. Elle peut être pratiquée dans une zone précisément définie, à partir d'une unique simulation FLUKA si les outils adéquats sont développés. Il s'agit donc de travailler sur des méthodes d'optimisation d'intervention interactives, où celui qui maîtrise les procédures et la géométrie des installations (typiquement, un technicien) est impliqué. De bonnes solutions pour cela sont des applications de visualisation en trois dimensions et en volume, qui donnent la possibilité de visualiser la géométrie mais également les cartographies de débits de doses en transparence [Fabry 2013, Fabry 2014]. Thomas Fabry a développé ces problématiques dans sa thèse, et la Figure 2.12 illustre l'utilisation de son application *Radifs* sur le cas fictif d'une optimisation de trajectoire dans TCC2.

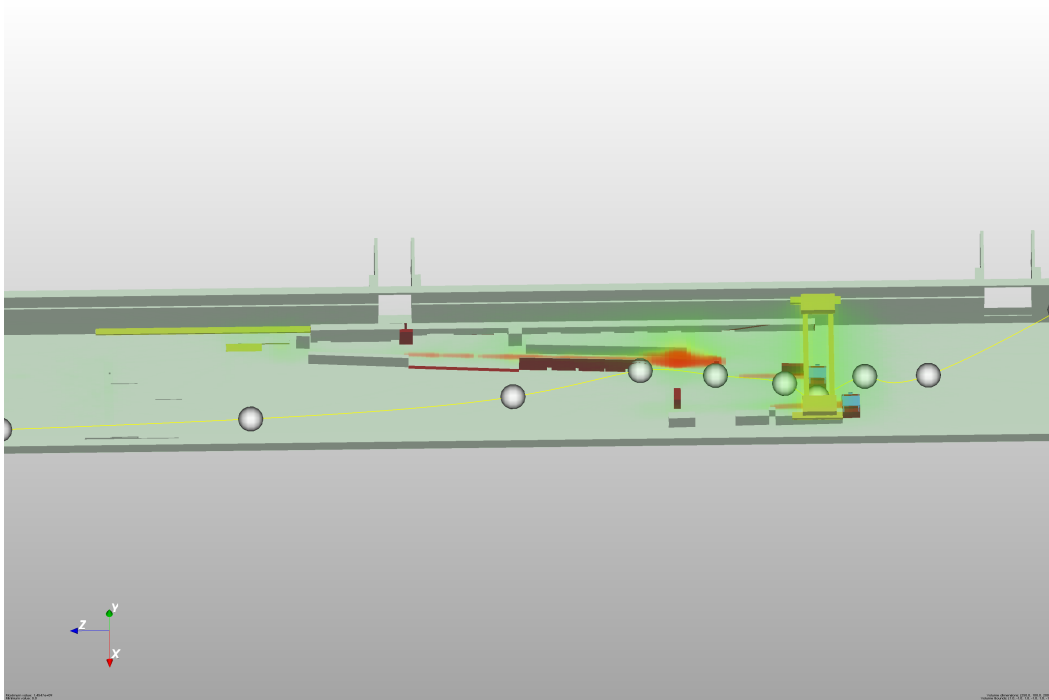


Figure 2.12 – Optimisation interactive de trajectoire à partir d’une simulation FLUKA dans la zone TCC2. Image obtenue à partir du logiciel Radijs, développé par Th. Fabry dans le cadre du projet européen PURESAFE auquel cette thèse appartient également.

Une fois chaque tâche optimisée individuellement, il s’agit d’optimiser l’intervention dans sa globalité, en tenant compte de toutes les tâches à effectuer et des contraintes que cela implique. Ces contraintes peuvent être des contraintes potentielles (ordre d’enchaînement des activités) ou logistiques (contraintes de ressources, phases de transport, etc.). Elles dépendent des différentes ressources humaines, matérielles et spatiales disponibles. Une intervention dont chaque tâche a été individuellement optimisée en termes de dose reçue peut résulter en une dose collective non optimale si la planification globale est en défaut. Citons par exemple des phases d’attente non planifiées dans les installations présentant des rayonnements ionisants, en cas de non disponibilité d’une zone de travail ou d’acheminement d’équipement en retard.

Il est donc temps de refermer ce deuxième chapitre pour traiter en profondeur les aspects collaboratifs de la planification. En effet, si l’optimisation individuelle de chaque tâche nécessite la présence de l’humain en interaction avec le système de planification, l’optimisation globale par la planification des interventions du point de vue de la dose de radiation reçue est aussi une entreprise interactive, qui doit se dérouler de façon collaborative entre tous les acteurs impliqués.

Vers une planification d'intervention collaborative

Sommaire

3.1 Planifier en collaboration	53
3.1.1 Définissons l'environnement collaboratif de planification	54
3.1.2 La complexité omniprésente	57
3.2 Un bref historique de la planification et de la modélisation de processus	59
3.2.1 Du qualitatif à l'analytique	59
3.2.2 Échéancement et ordonnancement	61
3.2.3 Planification en intelligence artificielle	63
3.2.4 Méthodes de modélisation de processus	69
3.3 Le choix des méthodes	73
3.3.1 Modèle ontologique et choix des critères	74
3.3.2 Notre échantillon complet	81
3.3.3 Un choix mettant la complexité en valeur	83
3.4 Conclusions sur le choix des méthodes	89

3.1 Planifier en collaboration

Commençons par formaliser la notion d'environnement collaboratif, que nous avons déjà bien abordée avec l'exemple du CERN dans le chapitre d'introduction. Dans cette section, nous allons définir ce que nous entendons par collaboration, ou travail collaboratif. Il s'agira donc ici de définir ces mots que nous avons utilisés à de nombreuses reprises depuis le début de ce travail, et d'en décrire les implications et les défis en termes de management, et plus particulièrement de planification, pour enfin sélectionner des méthodes adéquates et développer nos solutions pour rendre collaborative l'action même de planifier. Il s'agit donc de bien situer le contexte des recherches effectuées. Ensuite, ces définitions nous accompagneront tout au long de ce chapitre, et seront sous-jacentes jusque dans les choix qui y sont effectués, notamment la sélection de méthodes de planification de projet, ou celle d'un modèle temporel pour représenter les dépendances entre activités.

3.1.1 Définissons l'environnement collaboratif de planification

Une définition similaire a été énoncée en anglais dans [Baudin 2013a], et nous allons la reprendre, l'approfondir, et analyser ce qu'elle implique, à la fois dans le choix des mots que nous y intégrons et dans les concepts auxquels elle fait appel.

Définition

Le verbe collaborer nous vient directement du latin *collaborare* et ce presque sans aucune modification. Ce verbe, lui même issu de deux mots à savoir l'adverbe *cum* (avec) et le verbe *laborare* (travailler) signifie donc littéralement travailler avec quelqu'un. Travailler avec l'autre donc, et ce pour l'aider dans ses tâches ou pour développer ensemble des œuvres communes.

La collaboration implique donc un travail collectif. Une mise en commun des travaux individuels qui est bénéfique à l'ensemble des participants. De multiples définitions sont également collectées par Wood [Wood 1991]. Cependant comme l'identifie Bertrand Rose dans sa thèse [Rose 2004], toute activité collective n'est pas nécessairement une collaboration. Les activités collectives peuvent être caractérisées par différents degrés, de la communication à la coopération en passant par la coordination. On peut comprendre dans ces différents termes un degré croissant d'implication et d'intrication entre les différents participants d'un projet et entre leurs activités :

- La communication est un échange d'informations et de connaissances.
- La coordination est un agencement des activités, un ensemble de règles de fonctionnement en vue d'un travail collectif.
- La distinction entre coopération et collaboration est plus délicate à faire, et Rose y consacre plus d'explications. Dans les deux cas, le degré d'implication des participants est élevé, et la différence se situe au niveau de la division des tâches, avec plus d'indépendance pour une coopération tandis que la collaboration va développer une coordination et une synchronisation plus importantes, avec notamment la création de structures dédiées et une plus forte mise en commun de ressources.

La collaboration est au cœur de la conception de produits. L'évolution de cette discipline pendant la fin du XX^e siècle est due notamment à une forte concurrence et à la pression économique des consommateurs, toujours plus désireux d'innovations à un rythme toujours plus soutenu et aux meilleurs prix. Les processus de conception se sont complexifiés et ont donné une importance de plus en plus grande à la transversalité entre les métiers, ainsi qu'aux facteurs de l'humain et du collectif.

L'étude de la collaboration, notamment en conception, est au centre d'une littérature fournie dont on ne peut donner qu'un aperçu très limité dans ce travail, d'autant que nous comptons nous intéresser plus à la conception d'interventions en milieux radioactifs qu'à la conception de nouveaux produits. C'est pour cela que nous avons porté notre intérêt sur des publications dressant pour nous un état des lieux le plus exhaustif possible comme [Patel 2012] qui présente l'intérêt de déterminer

3.1. Planifier en collaboration

les facteurs de collaboration, nombreux, variés, pas toujours clairement identifiés, et d'en effectuer une classification.

Vers une planification collaborative

Revenons à présent à notre définition. Pour la suite de ce travail, une collaboration sera donc l'association de plusieurs entités, chacune possédant un rôle qui lui est propre, afin de travailler conjointement à la réalisation d'au moins un objectif commun.

C'est afin de rester le plus général possible que nous avons choisi le terme "*entités*" pour désigner les parties prenantes de la collaboration, que nous désignerons par la suite par le mot "collaborateurs". Par entité, nous entendons qu'un collaborateur peut être de multiples natures : un être humain, bien sûr, mais également un ordinateur ou un robot. Par exemple il existe en intelligence artificielle ce que l'on appelle des systèmes multi-agents où plusieurs ordinateurs collaborent pour déterminer un plan [Ferber 1996, Allen 2002a], ou encore des applications de planification collaborative entre l'humain et l'ordinateur [Gervasio 1998, Allen 2002b].

Il nous faut également insister sur le rôle propre que nous associons à chaque collaborateur. De plus, une collaboration est selon nous nécessairement pluridisciplinaire. Une simple juxtaposition de rôles identiques et indépendants dédiés à une même tâche qui se répèterait ou serait effectuée parallèlement ne peut faire l'affaire : d'après les définitions précédentes, nous nous trouverions alors plutôt dans le domaine de la coopération. En effet, il n'y a dans ce genre de situation pas d'échange indispensable entre les acteurs, qui n'ont pas besoin les uns des autres pour mener leurs propres tâches à bien. Nous nous intéresserons plutôt à l'interaction, voire à l'interdépendance de multiples collaborateurs évoluant dans des disciplines différentes, ce qui implique alors la mise en place de certaines formes de communication et de coordination entre ces acteurs.

Lorsqu'ils travaillent indépendamment, ceux-ci disposent de leur propres éléments de langage. Ils possèdent des termes techniques qui leur sont propres, ainsi que des habitudes et des méthodes de travail bien spécifiques au domaine qu'ils pratiquent quotidiennement. Une bonne compréhension entre collaborateurs est cependant nécessaire pour qu'une collaboration soit couronnée de succès. On assiste donc, dans le cas d'une collaboration pluridisciplinaire, à la création d'interfaces où les différents collaborateurs interagissent et doivent établir des repères communs afin de travailler ensemble [Nicquevert 2013b]. Le management des interfaces est un sujet sur lequel on peut écrire des ouvrages entiers, et le lecteur curieux peut se référer à [Nicquevert 2013a], qui traite ce sujet en profondeur. En ce qui nous concerne, nous allons nous concentrer sur ce que nous pourrions appeler l'interface temporelle entre les participants d'un projet.

Détaillons les rôles des collaborateurs impliqués dans la planification d'intervention en milieux présentant des risques, et notamment le risque radiologique comme au CERN :

- Les surintendants de zone sont les personnes chargées de coordonner les interventions à effectuer dans une zone donnée. Ils sont en charge de valider (ou de rejeter) les propositions d'interventions faites par les équipes d'intervention. Une intervention donnée dépend donc d'un coordinateur unique.
- Les équipes d'intervention sont les personnes chargées d'effectuer les interventions, c'est-à-dire d'intervenir directement sur les équipements pour en assurer le fonctionnement ou la maintenance. Sachant que les équipements sont définis selon les différentes disciplines de l'ingénierie (radiofréquences, aimants, cryogénie, systèmes de vide, alimentation et conversion en puissance électrique, etc.), plusieurs équipes d'intervention peuvent être concernées par une même intervention.
- Les experts en sécurité et en radioprotection supervisent les différents aspects liés à la sécurité et la sûreté des installations durant les interventions. Ce sont eux qui évaluent les dangers et les risques (notamment les doses de radiations anticipées) et valident les interventions en ce qui concerne ces aspects pendant la planification.
- Les équipes logistiques sont les personnes qui ont la responsabilité et les moyens d'assister si nécessaire les équipes d'intervention pour le transport d'équipements lourds ou radioactifs d'un point à un autre.

Ces quatre rôles mettent en évidence deux niveaux de hiérarchie : les niveaux opérationnel (équipes d'intervention, équipes logistiques) et tactique (surintendants de zones, experts en sécurité). Il faut aussi considérer un cinquième rôle, qui est lui aussi situé au niveau tactique. Il concerne les coordinateurs du système de planification, qui doivent superviser la planification de toutes les interventions sur le site, de toutes natures et pour toutes les localisations. En cas de conflit non résolu, ce sont eux qui choisissent la meilleure solution possible. Si l'on veut faire apparaître le niveau stratégique, il faut remonter au niveau des projets et macro-activités d'exploitation des installations qui englobent les interventions. Ce sont les responsables de l'organisation CERN qui agissent à ce niveau. Cependant, ils ne participent que peu à la planification des interventions, et leur intérêt se situe plus dans l'existence et l'efficacité d'une planification collaborative des projets.

En effet, comme pour les interventions au niveau opérationnel, tout projet est sujet à la planification, dès sa conception et ce jusqu'à sa réalisation et à son démantèlement. Effectuer la planification au sein d'un environnement collaboratif pluridisciplinaire revient à gérer une interface temporelle entre les différents collaborateurs concernés, en tenant compte des liens qui existent entre les tâches de chacun, et en s'assurant que chacune de leurs contraintes soit connue et, autant que possible, prise en compte. Il en résulte une complexité importante se traduisant par des dépendances ou contraintes temporelles entre les tâches notamment dues à la limitation des ressources et aux souhaits de chacun.

Ces contraintes sont générées par le biais de deux mécanismes. Tout d'abord, l'interaction de plusieurs collaborateurs placés idéalement sur un pied d'égalité lors de la soumission de leurs contraintes respectives. Ensuite, et notamment dans des projets de développement, les trois niveaux hiérarchiques opérationnel, tactique voire

3.1. Planifier en collaboration

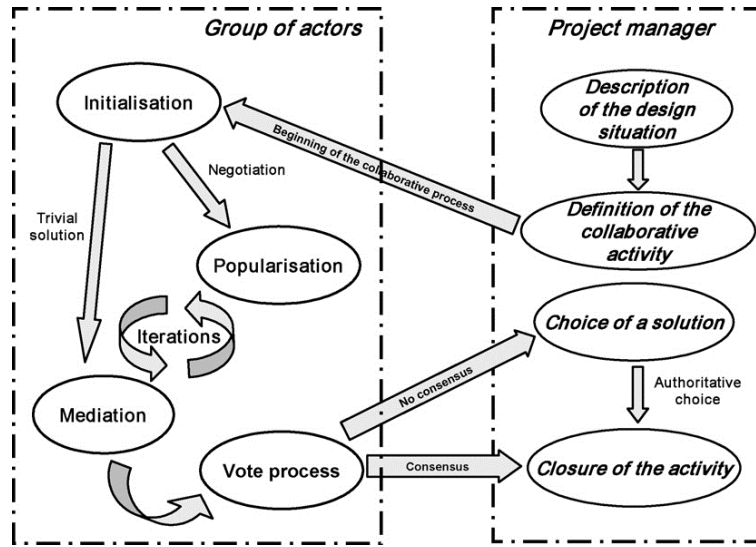


Figure 3.1 – Processus collaboratif de planification tel que décrit par Robin et al. [Robin 2007]. Il s’agit d’un processus itératif, où les niveaux opérationnel et tactique interagissent et modifient le plan de façon non linéaire. La planification est ainsi sujette à des boucles, des choix et des compromis. Un processus non collaboratif peut se limiter au côté droit de la figure, ou, à la limite, ne comporter qu’un seul passage du côté opérationnel, avec éventuellement un choix autoritaire en cas d’absence de consensus.

stratégique interagissent et la réalisation du processus ou du projet complexe entraîne simultanément la révision de sa planification [Nicquevert 2013a, Chapitre 16]. La planification collaborative est donc non linéaire : ces deux mécanismes conduisent en effet à la formation de boucles et à des retours d’informations comme illustré en Figure 3.1.

Pour prendre en compte cette complexité, nous allons travailler avec des méthodes résolument ancrées dans la systémique, en n’hésitant pas à sortir des sentiers battus, et à remettre en question certains des principes les plus établis au sein du rationalisme scientifique [Le Moigne 1977, chapitre 1].

3.1.2 La complexité omniprésente

Le CERN est en lui même un environnement complexe. Comme décrit par Bertrand Nicquevert [Nicquevert 2013a, chapitre 2], il présente différentes facettes de la complexité que sont les complexités scientifique, technologique, organisationnelle ainsi qu’historique et géopolitique. En termes de systémique, ces quatre aspects correspondent respectivement à la finalité, à la fonction, à la structure et au comportement du système CERN. Nous n’allons cependant pas entrer dans les détails de l’analyse de cette complexité, tout en restant bien conscients de sa présence au CERN, et même de son omniprésence. En revanche, il est important d’en considérer

les implications pour la suite de cette thèse, qui vont d'ailleurs être au cœur des méthodes proposées. Parmi ces nombreuses implications, qu'il est possible de découvrir très précisément et de façon extensive dans le travail de Nicquevert, celles qui vont nous intéresser sont les dépendances temporelles entre les tâches à planifier.

En effet, un système complexe implique un certain degré d'intrication entre ses éléments, et l'analyse que l'on peut en faire ne peut se limiter à une simple décomposition élémentaire. Cette décomposition en éléments distincts est ce que l'on peut obtenir en conception de produits et en planification avec un Product Breakdown Structure (PBS) ou un Work Breakdown Structure (WBS) [Bachy 1997]. Cette démarche correspond au deuxième principe énoncé par René Descartes dans le *Discours de la méthode*, à savoir le principe d'analyse, ou réductionniste comme Le Moigne le désigne [Le Moigne 1977, chapitre 1]. Pour citer exactement Descartes, il s'agit "*de diviser chacune des difficultés que j'examinerais en autant de parcelles qu'il se pourrait et qu'il serait requis pour les mieux résoudre.*"

Décomposer un système ou une séquence d'activités en éléments séparés réduits à leur plus simple nature n'est pas suffisant pour analyser un système complexe. Cela revient à séparer les différents constituants plus qu'à les intégrer, et à négliger les interactions et les relations existant entre eux. Cet oubli est regrettable, car cette simplification à l'extrême appauvrit le problème, et ne donnera qu'une analyse simplifiée et éloignée de la réalité. Un système ainsi décomposé est dénaturé, et l'observateur non initié ne possède aucune information sur son fonctionnement. C'est le reproche que l'on peut faire à une démarche rationaliste : à trop chercher à expliciter, elle tombe dans la simplification à outrance.

En réalité, Descartes n'a pas oublié ces relations entre éléments d'un système. Son troisième précepte y fait d'ailleurs référence et force même un peu trop le trait puisqu'il invite à rechercher ou du moins à supposer des relations entre éléments qui ne semblent a priori pas connectés : "*Le troisième, de conduire par ordre mes pensées en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusqu'à la connaissance des plus composés, et supposant même de l'ordre entre ceux qui ne se précèdent point naturellement les uns les autres.*" C'est notamment à cause de cette tendance à tout vouloir relier, à envisager l'existence de règles immuables et déterminées que les penseurs de la systémique, à commencer par Le Moigne, voient dans ce troisième principe un échec du rationalisme.

Il faut bien insister sur le fait que, dans les ouvrages de Le Moigne, c'est le rationalisme qui est dénoncé, et non la rationalité. Il est possible de considérer un problème de façon objective, cohérente et de l'analyser dans sa complexité en étant parfaitement rationnel, mais sans tomber dans un excès de rationalisme. Cette différence est par exemple bien illustrée par Alain Schärliig dans son ouvrage sur la décision multicritère [Schärliig 1985, chapitre 2]. Un excès de rationalisme consiste par exemple à vouloir tout réduire à une expression mathématique aussi claire et objective qu'une démonstration d'un théorème de géométrie. En appliquant ce type de raisonnement à un problème complexe, on risque de l'appauvrir en l'isolant de son contexte et en négligeant les relations qui existent entre ses divers éléments.

3.2. Un bref historique de la planification et de la modélisation de processus

Cette démarche est par conséquent à exclure lorsque l'on s'intéresse à des problèmes *réels*, par opposition à des problèmes théoriques (ce que nous allons illustrer dès le chapitre suivant). Mais si Descartes est montré du doigt par Le Moigne, c'est en réalité la lecture et l'interprétation qui a été faite de ses écrits *a posteriori* en les transposant notamment du domaine de la pensée à celui de la pratique. Autrement dit, il est tout à fait possible de résoudre un problème théorique en étant rationaliste, mais pour faire face au réel nous nous contenterons par la suite de rester rationnels.

3.2 Un bref historique de la planification et de la modélisation de processus

Plus qu'un réel historique, cette section s'attache essentiellement à dresser un inventaire des méthodes de planification de projet et de modélisation de processus, avant de les étudier plus en profondeur et de déterminer lesquelles s'adaptent le mieux à notre contexte de recherche. Bien entendu, il nous a semblé important d'intégrer cet inventaire au sein d'un court historique, afin de situer chaque méthode présentée dans son contexte et de présenter les objectifs liés à son utilisation afin d'en rechercher la compatibilité avec notre environnement de planification.

3.2.1 Du qualitatif à l'analytique

La planification, qu'elle soit de projet ou plus généralement d'activités n'a fait son apparition en tant que discipline académique ou scientifique que récemment. On peut situer cet événement à la toute fin du XIX^e siècle, voire au début du XX^e avec les travaux de Henry Lawrence Gantt [Bonnal 2015]. Outre le célèbre diagramme qui porte son nom et qu'il n'a réellement mis en œuvre qu'au cours des deux dernières années de sa vie, sa contribution à la planification est fondatrice car c'est lui qui a placé le temps au cœur du processus d'enregistrement du travail, à la place d'objectifs quantitatifs de production.

Même en y ajoutant de l'information, le diagramme de Gantt n'est pas une méthode de planification de projet que l'on peut qualifier d'analytique, car elle s'attache essentiellement à communiquer visuellement sur le déroulement du projet représenté. D'autres méthodes visuelles de planification de projet ont vu le jour, soit parallèlement aux travaux de Gantt avec l'Harmonygraph de Karol Adamiecki, très similaire au diagramme de Gantt mais orienté de haut en bas, ou un peu plus tardivement avec la méthode *Line of Balance* (traduite en français par "ligne d'équilibre") au début des années 1940, qui visait à établir des échanciers prévisionnels de fabrication pour des tâches répétitives, comme dans les usines de la Goodyear Tire & Rubber Company où elle a été développée [Bonnal 2015].

Les premières méthodes de planification dites analytiques sont quant à elles apparues après la seconde guerre mondiale. Les publications majeures les décrivant datent en effet de la fin des années 1950 et du début des années 1960. La méthode la plus notable fut la méthode du chemin critique, connue également sous son nom an-

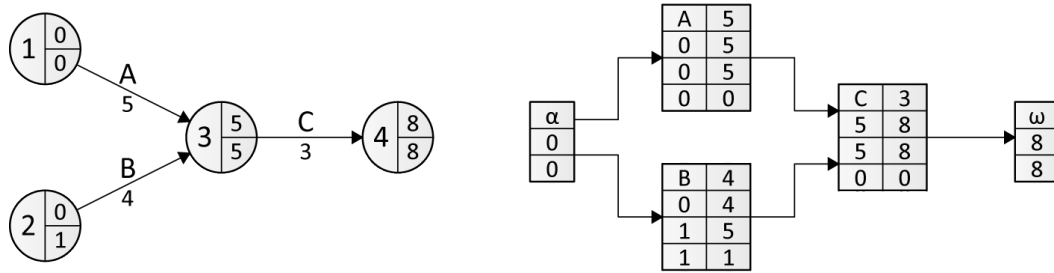


Figure 3.2 – Réseau CPM en potentiel-étapes (à gauche) et PDM en potentiel-tâches (à droite)

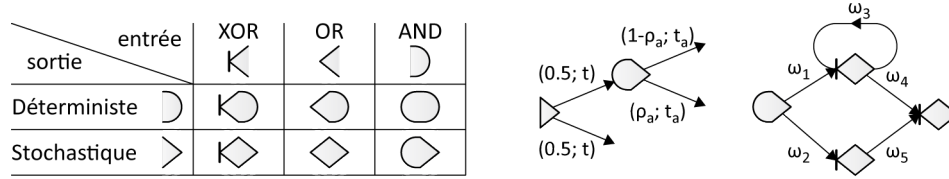
glais Critical Path Method (CPM) [Kelley 1959]. Elle introduisit la prise en compte des dates au plus tôt et au plus tard, les liens de précédence entre tâches (les premières contraintes temporelles) ainsi que la notion de chemin critique, des concepts qui sont à la base de toute méthode de planification de projet.

CPM a par la suite cédé la place à la méthode des précédences ou *Precedence Diagramming Method (PDM)* [Fondahl 1962, Crandall 1973] qui a pris sa place dans les applications de planification informatisées dont elle est encore à la base actuellement, en 2014. Cette méthode constitue alors un apport majeur à la planification, avec ce qu’Elmaghraby désigne par le terme de “dépendances temporelles généralisées” [Elmaghraby 1995]. En effet, comme pour construire un réseau de tâches selon la méthode CPM, on commence par construire la matrice des dépendances entre les tâches. Cependant, là où CPM ne traitait qu’une seule dépendance temporelle (à savoir la séquence Fin-Début), PDM introduit trois dépendances supplémentaires permettant de prendre en compte des activités avec recouvrement et non plus uniquement séquentielles : Début-Fin, Début-Début et Fin-Fin. Nous reviendrons plus en détail sur ces quatre types de dépendances dans la section 4.1.1 lors de leur comparaison avec les contraintes temporelles de l’algèbre d’intervalles d’Allen.

Développée parallèlement à CPM, la méthode de Program Evaluation and Review Technique (PERT) fut la première à prendre en compte les phénomènes probabilistes en introduisant une distribution temporelle pour les durées des activités [Malcolm 1959]. Cette utilisation des distributions probabilistes s’est amplifiée dans les années 1970 et 1980. En effet, si la durée d’une tâche au cours d’un projet ou d’un processus peut être incertaine, il en va de même pour son succès notamment s’il s’agit d’un projet de recherche ou de développement ainsi que certaines autres caractéristiques. Certaines tâches peuvent déboucher sur plusieurs issues possibles selon le ou les résultats produits (de façon inclusive ou exclusive), et des décisions peuvent également être nécessaires au cours de la réalisation d’un projet. Pour prendre en compte ces phénomènes, des techniques se basant sur des relations logiques plus complexes entre les activités sont apparues dans la seconde moitié des années 1960

3.2. Un bref historique de la planification et de la modélisation de processus

a) Formalisme de GERT



b) Formalisme de VERT

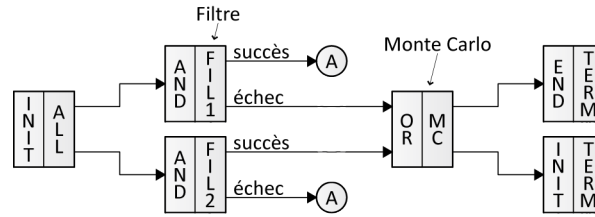


Figure 3.3 – Illustration de réseaux d’activités généralisés avec les formalismes graphiques des méthodes GERT (dessus) et VERT (dessous).

et dans les années 1970 : les réseaux d’activités généralisés [Elmaghraby 1964, Elmaghraby 1977].

Parmi ces méthodes, la plus connue est Graphical Evaluation and Review Technique (GERT), développée par Pritsker (cf. [Pritsker 1966a], [Pritsker 1966b] et [Whitehouse 1969]), ainsi que les multiples méthodes qu’elle a engendrées, Q-GERT étant la plus notable [Bonnal 2015]. Nous pouvons également citer des approches comme la *Decision Box* d’Eisner qui s’adapte particulièrement aux projets de recherche [Eisner 1962] ou encore Venture Evaluation and Review Technique (VERT) qui offre une logique très étendue avec un large choix de distributions stochastiques, concernant les durées, les coûts, mais aussi les risques, ce qui fait la particularité de cette méthode [Moeller 1978, Moeller 1981]. L’arrivée de ces méthodes a donné lieu au développement de nouveaux formalismes graphiques pour encoder les différentes informations supplémentaires, comme illustré en Figure 3.3.

3.2.2 Échéancement et ordonnancement

Ce qu’attendent les participants d’un projet ou d’une intervention à l’issue de la planification, c’est une séquence d’activités échéancées, c’est-à-dire que chacune d’entre elles est associée à une date de début et une date de fin définies. Cependant, pour arriver à ce résultat il nous faut passer par la satisfaction de trois prérequis :

- la décomposition du projet ou de l’intervention en activités élémentaires ;
- l’ordonnancement de ces activités ;
- l’estimation de la durée de chacune.

Les méthodes que nous avons évoquées jusqu'ici possèdent comme objectifs communs de déterminer l'enchaînement des tâches dans une séquence d'activités et, pour chacune, de déterminer ses dates respectives de début et de fin, avant d'en déduire, ou au moins d'en estimer, la durée globale de la séquence. Cela implique de connaître les liens de précédence entre les activités, c'est-à-dire de savoir quelles activités dépendent des résultats des autres et ne peuvent commencer avant leur achèvement : ces contraintes sont appelées contraintes potentielles. Cependant, la planification implique un second type de contraintes qu'il est important de prendre en compte : les contraintes logistiques, également appelées contraintes de ressources. La prise en compte de ces deux types de contraintes constitue ce que nous appelons dans ce travail l'ordonnancement.

En anglais, le terme planification se traduit par les deux termes *planning and scheduling*²⁰. Et comme nous venons de le découvrir, ces deux termes désignent deux tâches distinctes. C'est afin de garder à l'esprit cette subtilité que nous utilisons dans ce travail une traduction de cette traduction, et employons les termes d'échéancement et d'ordonnancement : l'ordonnancement est un raisonnement relatif, qui permet de positionner les activités les unes par rapport aux autres dans la séquence, et l'échéancement consiste en l'instanciation de la séquence, avec des dates et des durées déterminées.

Des méthodes comme CPM, PDM, PERT ou encore les approches généralisées comme GERT prennent largement en compte les contraintes potentielles. Cependant, la gestion des contraintes logistiques en est absente. La planification de projet sous contraintes de ressources²¹ ainsi que le *Job-Shop Planning and Scheduling*, destiné notamment aux activités répétitives (production sur des machines, planification d'un aéroport) ont fait l'objet de milliers de publications, et constituent au sein de la planification les domaines les plus féconds d'un point de vue académique [Brucker 1999, Schwindt 2005, Pinedo 2008].

Le principe du RC-PSP est d'effectuer dans un premier temps un échéancement à l'aide d'une des méthodes précédemment citées, typiquement CPM ou PDM, puis de procéder à un nivellement des ressources. L'attribution de ressources limitées à une séquence de tâches est un problème complexe, auquel il est souvent compliqué de trouver une solution exacte. En effet, il s'agit de considérer toutes les combinaisons possibles pour une situation donnée, et ce nombre croît exponentiellement avec la quantité de ressources. Le problème qui en résulte ne peut donc pas être résolu en un temps de calcul polynomial, et les méthodes les plus développées se basent par conséquent sur des heuristiques pour obtenir des solutions approchées. Pierre Bonnal, déjà cité dans la section précédente décrit succinctement quelques-unes des méthodes les plus couramment utilisées parmi lesquelles nous pouvons retrouver par exemple l'établissement de règles de priorité ou l'utilisation d'algorithmes génétiques.

20. L'anglicisme *cédule* est d'ailleurs utilisé au Québec pour désigner un emploi du temps.

21. Resource Constrained Planning and Scheduling Problem (RC-PSP) en anglais

3.2. Un bref historique de la planification et de la modélisation de processus

Nous n'allons cependant pas élaborer davantage notre description de ces méthodes. Elles sont en effet au centre de la recherche opérationnelle, et font notamment partie des méthodes d'optimisation dont nous avons traité en début de chapitre. Elles sont isolables de leur contexte de planification et assez peu tournées vers la collaboration. Cependant, il nous fallait les mentionner car tout problème de planification dans un environnement réel se doit de prendre en compte les ressources, et les solutions que nous envisagerons par la suite ne font pas exception. C'est en revanche sur la notion d'optimisation que nous chercherons à nous différencier. Enfin, les méthodes de type RC-PSP sont également à rapprocher de la planification en intelligence artificielle, notamment avec l'utilisation d'heuristiques et la nécessité de prendre en compte les ressources. Et comme nous l'avons constaté lors du chapitre 2, l'intelligence artificielle fait partie des méthodes à considérer lorsqu'il s'agit de développer l'interactivité et la collaboration entre humains et systèmes de planification.

3.2.3 Planification en intelligence artificielle

Parallèlement à la planification de projets ou de programmes, l'étude de la planification s'est en effet développée dans cet autre domaine académique qu'est l'intelligence artificielle. Les techniques résultant de ces développements sont relativement éloignées de celles que nous avons énumérées jusqu'ici. Elles cherchent en effet à répondre à des problématiques différentes, et à traiter des problèmes d'une toute autre nature. Il en résulte une abondante littérature, accessible dans tout manuel d'intelligence artificielle comme par exemple [Russel 2010, Chapitre 11], ainsi que de nombreux articles académiques, notamment de revue : [Hendler 1990, Smith 2000, Wilkins 2001, Nau 2007].

En intelligence artificielle, la détermination de dates et de durées n'est pas au cœur du travail effectué pour planifier. L'objectif est d'établir un plan, qui détaille les étapes permettant de passer d'une description de l'état initial dans lequel se trouve l'environnement de planification à l'état désiré, ou objectif du problème. Pour cela, on utilise une série d'actions possibles appelées opérateurs. Le calcul d'un plan peut se faire suivant de nombreuses techniques que nous allons rapidement évoquer. Les algorithmes utilisés sont mis en œuvre dans des applications logicielles appelées des planificateurs.

Les développements les plus notables de la planification en intelligence artificielle ont eu lieu entre 1970 et 2000. Dans Hendler et al., ils sont catégorisés selon cinq axes principaux :

- la stratégie d'exploration ;
- la planification d'objectifs imbriqués ;
- la représentation des opérateurs ;
- la planification et l'exécution ;
- l'apprentissage et la mémoire.

Stratégie d'exploration

Initialement, les éléments du plan étaient représentés par les différents états successifs occupés au cours du temps par le système étudié. On dit alors que l'espace de recherche est appelé un espace d'états, espace dans lequel la recherche de l'objectif s'effectue à l'aide d'heuristiques. Le premier système de planification majeur, STRIPS [Fikes 1971] en fut l'illustration.

Après 1975, les systèmes de planification ont plus généralement adopté des espaces de plans, c'est-à-dire que chaque étape du plan est un plan partiel, à affiner jusqu'à obtenir le plan final, uniquement constitué d'activités élémentaires prêtes à être effectuées. Ce fut le cas notamment de NOAH, Warplan (1974) ou Nonlin [Tate 1977] au milieu et à la fin des années 1970. La recherche dans des espaces de plans a dominé le domaine pendant près de vingt ans, jusqu'à l'avènement de la planification par graphe, plus rapide d'exécution.

Graphplan est la première et la plus connue des méthodes de planification par graphe [Blum 1997]. Contrairement à l'exploration d'arbres ou de tableaux d'états et de plans, le planificateur considère un espace de propositions décrivant l'environnement de planification et d'actions pouvant le modifier. La planification par graphe consiste à lister ces propositions et actions pour chaque étape de la planification, en commençant par l'état initial et ce jusqu'à ce que toutes les propositions requises pour la réalisation de l'état final soient vérifiées. On obtient ainsi une analyse du nombre d'étapes nécessaires à la réalisation de chaque proposition. Une recherche arrière est ensuite effectuée pour reconstituer le ou les plans adaptés à partir de la dernière étape.

Comme décrit dans [Russel 2010, Chapitre 11] et [Smith 2000], une autre approche populaire de la planification dans les années 1990 fut la planification par "satisfaisabilité", désignée par résolution de problème SAT en français²². Comme pour la planification par graphe, elle consiste à convertir le problème de planification en un ensemble de propositions, puis à planifier en cherchant à maximiser une fonction dite de satisfaction qui porte sur la durée estimée du plan.

Ces diverses approches de recherche ont connu des périodes de domination, d'abandon voire de retour en grâce comme la recherche dans les espaces d'états dans le courant des années 1990. Aujourd'hui, le type de problème de planification auquel un utilisateur est confronté influe sur le choix de la méthode à mettre en action.

Planification d'objectifs imbriqués

Les premiers planificateurs fournissaient uniquement ce que l'on appelle un ordre total. Pour cela, ils décomposaient l'objectif final de la planification en sous-objectifs, réalisaient un plan partiel pour chacun d'eux, puis reconstituaient un plan global, linéaire, en mettant ces plans partiels dans une séquence.

22. Terme issu de l'anglais "*satisfiability problem solving*".

3.2. Un bref historique de la planification et de la modélisation de processus

Cependant, certains sous-objectifs peuvent être liés de façon complexe les uns aux autres. Un exemple simple est donné dans [Sacerdoti 1975] pour le planificateur NOAH. Si nous voulons peindre le plafond d’une pièce ainsi que l’échelle que l’on veut utiliser, l’objectif est “peindre le plafond et l’échelle”. Il est possible de diviser cet objectif en deux sous-objectifs secondaires distincts “peindre l’échelle” et “peindre le plafond”. Cependant, effectuer le second après le premier abîmera la peinture de l’échelle : nos deux sous-objectifs sont imbriqués. La Figure 3.4 reprend cet exemple et illustre la méthode utilisée pour traiter le problème.

Pour cela, il faut faire appel à un ordonnancement partiel du plan, en ajoutant une contrainte temporelle entre les deux sous-objectifs. L’échelle ne doit être peinte qu’une fois la pièce terminée. NOAH fut ainsi le premier planificateur qualifié de non-linéaire. Pour des raisons d’exactitude, il est qualifié dans Hendler et al. de premier planificateur à ordre partiel (POP) [Hendler 1990]. Il a été suivi de plusieurs systèmes comme Nonlin (cité précédemment) ou Deviser [Vere 1983] et d’une façon générale de tous les planificateurs à ordre partiel apparus dans les années 1980.

Les planificateurs par graphes, essentiellement basés sur la notion de prise en compte des contraintes ne sont pas en reste pour prendre ces relations en compte : en effet, pour chaque étape dans la planification, les incompatibilités entre actions et propositions sont détectées. On parlera de propositions “*mutex*” (pour mutuellement exclusives) si, pour faire simple, elles se contredisent (pour les propositions) ou ont des effets incompatibles en termes de résultats ou de préconditions (pour les actions).

Représentation des opérateurs

Avec le planificateur STRIPS, Fikes et Nilsson ont introduit en 1971 la notation éponyme qui a profondément marqué la planification en intelligence artificielle puisqu’elle est en quelque sorte devenue la notation universelle pour représenter les opérateurs [Fikes 1971]. Le principe de cette notation est simple : l’objectif étant de passer d’un état initial à un état final souhaité, un opérateur est une action qui permet de modifier l’état de l’environnement de planification afin de se rapprocher du but en y ajoutant ou supprimant des prédicats, qui sont les éléments de base pour décrire les états. Chaque opérateur possède donc une liste de pré-conditions qui doivent être vérifiées avant de pouvoir être appliqué, et son action se traduira par l’ajout de ses effets sur l’environnement sous forme de deux listes : une liste d’ajouts et une liste de suppressions. Une illustration simple est donnée en Figure 3.5.

Comme indiqué dans [Russel 2010], STRIPS a été déclinée sous de très nombreuses variantes cherchant à y inclure plus d’informations au fur et à mesure que les planificateurs se complexifiaient (usage de ressources, contraintes temporelles, etc.) ce qui a rendu les éventuelles comparaisons difficiles. Des évolutions notables peuvent cependant être citées avec l’introduction de l’Action Description Language (ADL) en 1986 par Pednault permettant notamment d’exprimer des prédicats négatifs et conditionnels. Introduit en 1998, le Problem Domain Description Language (PDDL) est aujourd’hui utilisé pour exprimer les opérateurs de type STRIPS, ADL ou toute autre représentation dans une syntaxe unifiée et décomposable par un ordinateur.

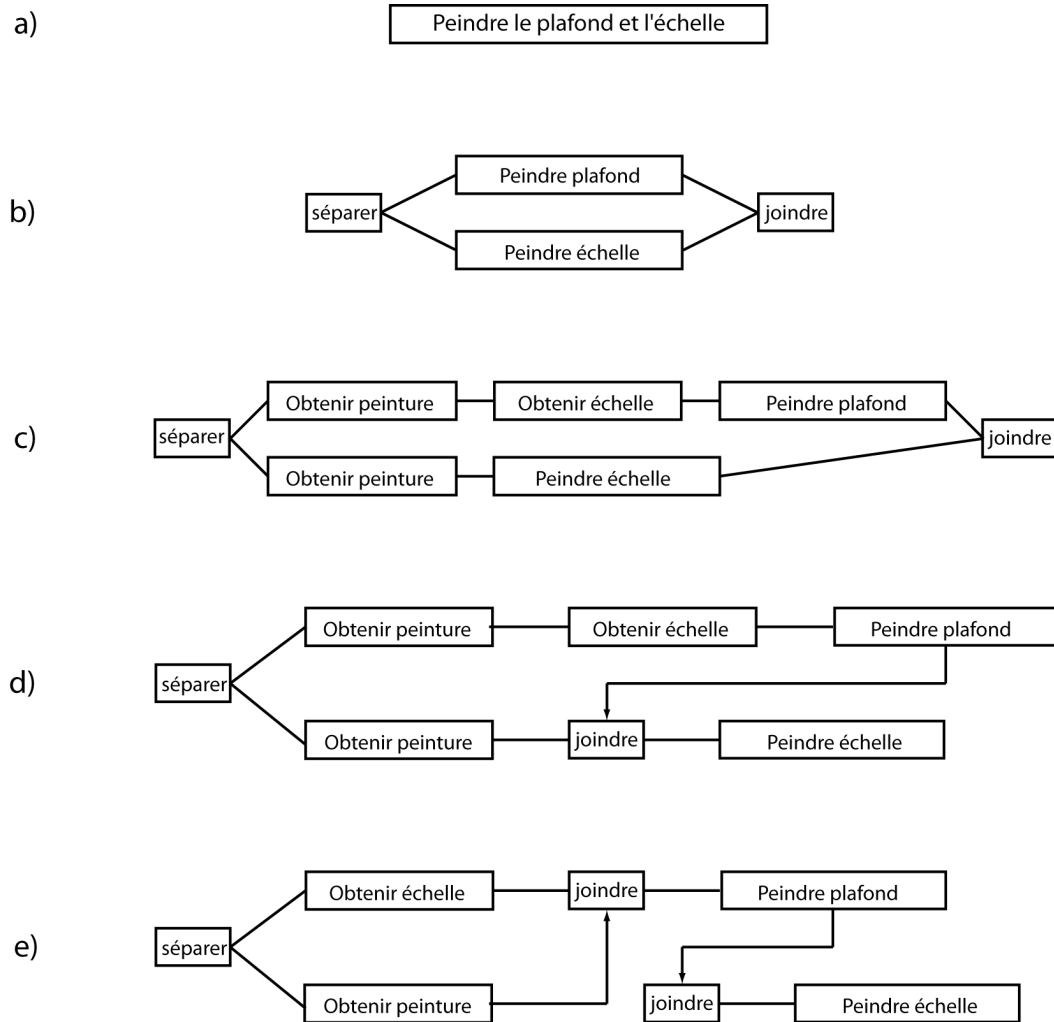


Figure 3.4 – Deux objectifs imbriqués sont donnés en (a). Ils sont séparés en deux tâches distinctes (b), puis deux plans indépendants sont alors générés pour les effectuer (c). Une contrainte temporelle est ensuite introduite afin de les positionner l’un par rapport à l’autre (d) de façon à ce qu’ils soient tous deux réalisés. Enfin, le sous-objectif commun aux deux plans (“obtenir peinture”) est fusionné pour éliminer la redondance (e). Figure adaptée de [Hendler 1990].

3.2. Un bref historique de la planification et de la modélisation de processus

Préconditions :	SUR_TABLE(X) MAIN_VIDE()
Liste de suppressions :	SUR_TABLE(X) MAIN_VIDE()
Liste d'ajouts :	TENIR(X)

Figure 3.5 – Opérateur STRIPS décrivant l'action de ramasser un objet X préalablement posé sur une table. Le fait de ramasser l'objet supprime de l'environnement les deux prédicats "SUR_TABLE(X)" et "MAIN_VIDE()" et y ajoute le nouveau prédicat "TENIR(X)".

Planification et exécution

La description que nous avons faite jusqu'à présent de la planification en intelligence artificielle présente l'environnement de planification comme connu, et le planificateur le connaît en totalité. En réalité, et nous l'avons vu notamment dans le chapitre précédent avec la planification en milieux présentant des risques, des événements extérieurs ou l'évolution de cet environnement d'une façon imprévue peuvent rendre un plan caduque. C'est en partant de ce constat que certains chercheurs ont travaillé sur le concept de révision de plan : une fois le plan établi, son exécution doit être suivie et en cas de divergence entre le plan et la réalité, il faut retravailler le plan pour poursuivre les tâches à effectuer avec succès.

Comme les précédentes, cette problématique a été traitée dès les débuts de la planification en intelligence artificielle avec le planificateur STRIPS, qui était capable de faire face à des modifications de l'environnement dans lequel se déplaçait le robot qu'il contrôlait. Plusieurs approches ont été développées notamment dans les années 1980 pour procéder à la révision [Hendler 1990] :

- anticiper les événements et échecs potentiels et effectuer une planification prévisionnelle au cas où ils se produisent (par exemple : attente au feu rouge avant de traverser une rue) ;
- procéder à une planification pas à pas alternant planification et exécution (très efficace pour prendre en compte les modifications de l'environnement, mais plus sensible aux problèmes d'objectifs imbriqués décrits précédemment) ;
- accélérer la réponse aux changements environnementaux en procédant à une planification rapide (on abandonne alors une part de complexité) ou en développant des mécanismes de détection et de révision de plan couplés ;
- améliorer la représentation du temps dans les planificateurs, et notamment implémenter les concepts de durée, d'événements simultanés et d'interaction entre événements.

Apprentissage et mémoire

Enfin, un dernier axe de recherche important (notre but n'est pas ici de tous les énumérer) consiste à utiliser les expériences passées et à ne pas commencer la

planification depuis le point de départ à chaque utilisation d'un planificateur. C'est notamment le concept de la planification par cas, que nous avons déjà rencontrée dans le chapitre 2 avec la planification d'intervention sur un incendie ou en cas d'incident impliquant des matières dangereuses [Avesani 2000, Gervasio 1998].

Le principe de cette approche est donc de choisir dans une base de données un plan déjà utilisé qui soit le plus proche possible du cas considéré (Avesani et al. traite notamment en détail de la procédure de recherche du scénario le plus proche avec le développement d'une métrique spécifique). Une fois ce plan sélectionné, il doit alors être modifié pour l'adapter aux circonstances présentes.

De nombreux systèmes incorporant des éléments de planification par cas ont été développés dès les années 1970, encore une fois avec STRIPS. Hendler et al. dresse un rapide panorama d'autres méthodes apparues notamment pendant les années 1970 et 1980.

Rapprocher planification et ordonnancement

Nous avons donc présenté les diverses problématiques liées à l'aspect "*planning*" de la planification en intelligence artificielle. Nous savons en revanche avec l'étude de la planification de projet qu'un plan ne peut être complet sans la prise en compte des ressources et des contraintes logistiques qui leur sont liées. Il en va de même en intelligence artificielle, et la distinction qui est faite entre planification et ordonnancement est même plus importante dans ce domaine [Smith 2000]. Comme en planification de projet, ce sont les termes de *planning and scheduling* qui sont utilisés. Mais en intelligence artificielle, le problème que nous avons nommé échéancement pour la planification de projet (*planning*) n'est aucunement lié à la définition de dates et de durées. Il s'agit ici de déterminer parmi un large choix d'actions (avec plusieurs niveaux hiérarchiques et des interactions complexes) la ou les séquences de tâches susceptibles de nous mener avec succès de l'état initial à l'objectif du problème. L'ordonnancement (*scheduling*) est quant à lui similaire à ce que nous avons vu dans la section précédente puisqu'il se préoccupe des contraintes entre tâches, et notamment des contraintes de ressources, et vise à optimiser la séquence de tâches en mettant en œuvre des métriques adaptées, en considérant les durées (et donc la représentation du temps).

Le problème d'ordonnancement en intelligence artificielle va donc essentiellement prendre la forme d'un problème de satisfaction de contraintes (sur lequel nous revenons dans le chapitre suivant 4.1.1). Les méthodes utilisées sont présentées en détail dans Smith et al., et consistent à optimiser l'assignation des ressources disponibles sans violer de contrainte temporelle. Dans ce sens, on se rapproche des RC-PSP présentés en planification de projet.

Cependant, comme préconisé par Smith et al., cette distinction n'a pas toujours lieu d'être et l'ordonnancement a trop souvent été négligé, ou réduit au cas particulier d'un problème de planification, qui consiste à définir un ordre possible (et pas toujours optimal) une fois que le choix des activités a été effectué. Cependant, certains problèmes, et c'est le cas du nôtre, ne peuvent être placés ni dans la case

3.2. Un bref historique de la planification et de la modélisation de processus

planning ni dans celle du *scheduling* car ils présentent des caractéristiques des deux catégories :

- des contraintes temporelles, des durées variables pour les activités, des ressources, des quantités métriques et un besoin d’optimisation ;
- un choix de tâches (ou de séquence de tâches) à effectuer et des liens parfois complexes entre elles.

Plusieurs approches de planification en intelligence artificielle permettent de réduire la différence entre planification et ordonnancement, en prenant en compte durées et contraintes temporelles. Les premières d’entre elles datent déjà des années 1980, comme Deviser [Vere 1983], ou l’algèbre d’intervalles d’Allen [Allen 1983a, Allen 1983b]. Cette tendance a été croissante tout au long de l’histoire de la planification en intelligence artificielle : en témoigne la tendance à incorporer les éléments de l’ordonnancement dans les outils de planification, avec par exemple la naissance des planificateurs à ordre partiel prenant en compte les contraintes temporelles ou les évolutions dans la représentation des opérateurs afin par exemple de pouvoir y incorporer les ressources.

3.2.4 Méthodes de modélisation de processus

Jusqu’à présent, dans ce chapitre, nous avons commencé par définir la collaboration, et en expliquer de façon abstraite les implications notamment en termes de planification, notre objectif étant à terme de proposer des solutions pour intégrer la première dans la seconde. Nous avons ensuite énuméré rapidement tout en essayant d’être complet les méthodes de planification, aussi bien dans le domaine du management de projet que de l’intelligence artificielle. Nous avons donc effectué un voyage depuis la représentation qualitative graphique vers les méthodes analytiques (ou de planification linéaire en intelligence artificielle), avant de nous lancer dans l’étude des nombreuses méthodes d’optimisation sous contraintes de ressources.

Cependant, nous avons précédemment mentionné que dans une collaboration, les rôles impliqués sont divers, et il en va de même pour les compétences de chaque collaborateur. C’est pour cette raison que nous allons à présent nous pencher sur les méthodes de modélisation des processus, pour la plupart graphiques et qualitatives comme l’étaient les premières méthodes de planification (par exemple le diagramme de Gantt). Sachant que dans une planification collaborative, les participants ne seront majoritairement pas des spécialistes de la planification, une représentation à la fois simple mais suffisamment complète de l’intervention est nécessaire pour expliciter les résultats obtenus à l’aide des diverses méthodes présentées précédemment. D’après Elmaghraby, la représentation et la modélisation afin de mieux visualiser et analyser un processus est même l’une des principales demandes des managers motivant l’utilisation de méthodes de planification utilisant des réseaux d’activités, aux côtés des aspects financiers, du management des contraintes de ressources et des incertitudes sur les durées d’activités [Elmaghraby 1995].

De nombreuses méthodes de modélisation de processus ont été développées au cours du XX^e siècle à l’instar des méthodes de planification que nous avons décrites

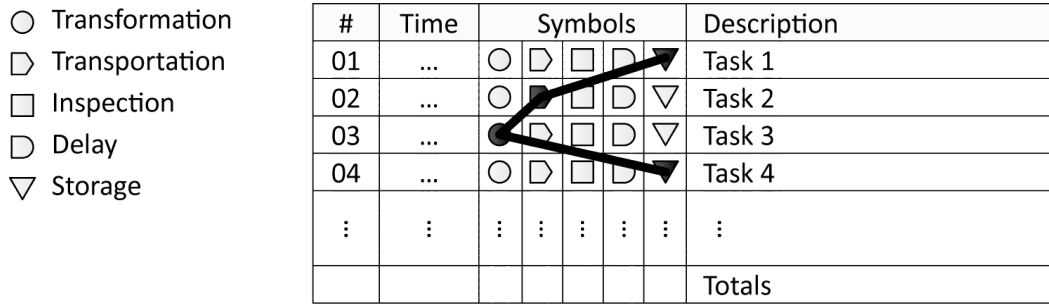


Figure 3.6 – Exemple de début de procédé modélisé avec un FPC, avec illustration des symboles utilisés pour représenter les différentes catégories de tâches.

précédemment. Les premiers diagrammes d'activités ou “*flowcharts*” sont en effet apparus dès les années 1920 avec les travaux de Frank Gilbreth qui introduisit le *Flow Process Chart (FPC)* auprès de la société américaine des ingénieurs en mécanique²³. C'est Allan Mogensen qui popularisa ensuite ses méthodes au cours des années 1930, avec notamment en 1932 la publication du livre *Common Sense Applied to Motion and Time Study* chez McGraw-Hill. Ben S. Graham, l'un des étudiants de Mogensen, a adapté le FPC à la modélisation de systèmes d'information vers la fin des années 1940.

Les symboles du FPC sont devenus des standards de l'ASME en 1947 [Graham 2003]. Ils formalisent les processus en distinguant cinq catégories de tâches (voir Figure 3.6) : les opérations, le transport, l'inspection, et enfin le stockage et le délai. Cette première tentative de formalisation de la représentation des processus a par la suite donné naissance à de nombreuses méthodes, qui se sont développées notamment au cours des années 1960 et 1970. Nous allons en citer un certain nombre, et tenter de lister leurs apports. Pour plus de détails, chaque méthode est présentée en annexe B. Un large nombre d'entre elles ainsi que certaines méthodes non décrites ici sont listées dans la thèse de M. Kreimeyer [Kreimeyer 2009].

Pour commencer, nous nous devons de mentionner les travaux sur l'étude et la modélisation des systèmes complexes de Jay Forrester, à l'origine au milieu des années 1950 de la méthode *Systems Dynamics* [Forrester 1961]. Ce fut la première méthode à prendre en compte les boucles de rétroaction internes aux systèmes et la modification dynamique de leurs comportements à l'aide notamment de délais quantifiés, ainsi que de réservoirs et de vannes pour stocker les entités modélisées et réguler leurs flux. La représentation de ces phénomènes qui nous intéresse tout particulièrement pour le développement de nos méthodes de planification collaborative.

Pour tenter de fournir un formalisme unifié aux multiples méthodes de représentation du *workflow* apparues dans les années 1960, l'*American National Standard*

23. American Society of Mechanical Engineers (ASME).

3.2. Un bref historique de la planification et de la modélisation de processus

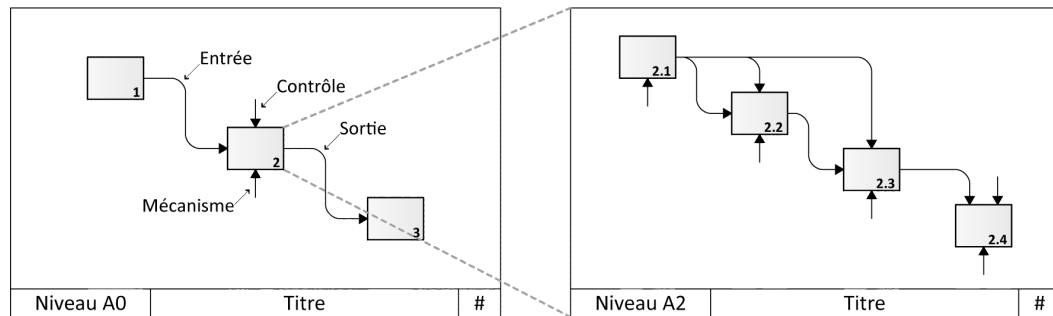


Figure 3.7 – Illustration d'un modèle effectué avec la méthode SADT.

Institute (ANSI) a ainsi publié plusieurs standards de symboles successifs. La méthode nommée ANSI Flowcharts [Chapin 1970] n'a finalement rencontré qu'un succès limité, mais démontre le fort intérêt existant alors pour la modélisation graphique des processus et le besoin de méthodes claires et utilisables par tous.

Les années 1970 ont ensuite vu le développement dans le domaine des technologies de l'information de méthodes d'analyse fonctionnelle, parmi lesquelles la Structured Analysis and Designed Technique (SADT) [Ross 1977b, Ross 1977a], les diverses Integration Definition (IDEF) [IDE 2010] et en particulier IDEF0 très proche du SADT. Une autre méthode utilisée en analyse fonctionnelle est le Functional Flow Block Diagram (FFBD) suivi du Enhanced Functional Flow Block Diagram (EFFBD), utilisé notamment dans les années 1960 par la NASA pour modéliser les missions d'exploration spatiales [NASA 2007]. Le principe derrière ces méthodes d'analyse fonctionnelle est la décomposition du système (ou du projet) en différents sous-systèmes (ou sous-projets) suivant le principe des PBS et WBS. Ces différents éléments fonctionnels sont ensuite logiquement reliés à l'aide de sémantiques propres à chaque méthode. Une analyse fonctionnelle s'effectue sur plusieurs niveaux de détail : à partir du niveau 0 (représentation globale du système ou du projet), chaque sous-élément peut être modélisé à son tour tant qu'il est lui-même décomposable.

L'analyse fonctionnelle telle que conduite dans le manuel d'ingénierie des systèmes de la NASA ne se limite pas au FFBD. Elle utilise en complément une méthode appelée *N2-Chart*, prononcé *N-squared chart*, soit diagramme N-carré en français. Il s'agit d'une représentation matricielle du système ou du procédé, où la diagonale représente les fonctions ou tâches de base, et l'intersection d'une ligne et d'une colonne est utilisée pour représenter les dépendances entre les différentes fonctions modélisées. Ce diagramme N2 présente ainsi avec sa représentation matricielle une certaine similarité avec la Design Structure Matrix (DSM) introduite au début des années 1980 et sur laquelle nous reviendrons en détails dans le chapitre suivant [Steward 1981]. Cependant, la ressemblance s'arrête là, car DSM a également pour objectif de simuler la séquence d'activités, alors que le diagramme N2 s'arrête aux dépendances entre fonctions modélisées.

Afin de modéliser des processus d'affaires mais également informatiques, une autre famille de méthodes est apparue dans les années 1960 : les réseaux de Petri. Cette modélisation se base sur une représentation binaire d'un processus ainsi que sur un formalisme mathématique établi [Murata 1989]. Basé sur la circulation de jetons dans un modèle (on parle alors de modèle exécutable), le réseau de Petri permet de modéliser des processus et de les simuler. Ce principe est à la base de nombreuses méthodes, à commencer par des réseaux de Petri plus élaborés comme les réseaux de Petri colorés [Jensen 1997] ou encore stochastiques. D'autres langages de modélisation plus récents (années 2000) s'en inspirent également, comme par exemple YAWL [Van der Aalst 2005, Russell 2007] et même le BPMN pour ce qui est de l'utilisation des jetons pour exécuter les modèles.

Certaines méthodes plus spécifiques peuvent présenter également un intérêt dans notre contexte. C'est le cas des méthodes de simulation de construction, qui tout en incluant une représentation graphique, sont utilisées pour la simulation de différentes grandeurs inhérentes aux projets de construction comme la mesure de la productivité, l'analyse de risques (à l'instar de VERT) ou encore la planification de l'utilisation des ressources. On y retrouve des systèmes de réservoirs de ressources ainsi que la circulation d'éléments dans le réseau d'activités dans un fonctionnement qui rappelle les jetons des réseaux de Petri. Développées dans les années 1970 et 1980 ces méthodes ont été appliquées avec succès dans certains projets industriels [Halpin 1999]. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer la méthode Cyclic Operations Network (CYCLONE) développée par Daniel Halpin [Halpin 1973, Sawhney 1998] qui a par la suite été à l'origine de plusieurs systèmes de simulation de construction.

Le Business Process Modelling and Notation (BPMN) mentionné précédemment est l'un des standards de modélisation de processus d'affaires (*business processes*) les plus récents. Développé dans les années 2000 (la version la plus récente date de 2011 [Object Management Group 2011]), on peut considérer qu'il hérite de méthodes comme le FPC pour la représentation des séquences d'activités ainsi que des réseaux de Petri pour les aspects exécutables des modèles. Il possède d'importantes capacités de modélisation en permettant la représentation des tâches, ainsi que de la logique qui les relie, à l'aide de branchements, ainsi que des entités (personnes, services, etc.) responsables de leur exécution grâce à un système de "voies" appelées *pools* et *lanes* en anglais et traduits par "pistes" et "corridors" (ou "couloirs") en français (cf illustration en Figure 3.8). BPMN avait été précédé dans les années 1990 par la méthode Event-driven Process Chain (EPC) de l'allemand Scheer [Dumas 2005] qui associe les activités à l'unité organisationnelle qui s'en charge. Certaines méthodes récentes en sont également très proches, comme les diagrammes d'activités de la version 2.0 du standard UML [OMG 2011].

Enfin, certaines méthodes de modélisation de processus d'affaires ont abandonné le formalisme graphique et reposent uniquement sur des standards XML ²⁴ [Aissi 2002, Green 2006]. Il s'agit de modèles qui fonctionnent uniquement par systèmes de balises XML et sont donc exécutables directement sur des ordinateurs et

24. Pour *extensible markup language*.

3.3. Le choix des méthodes

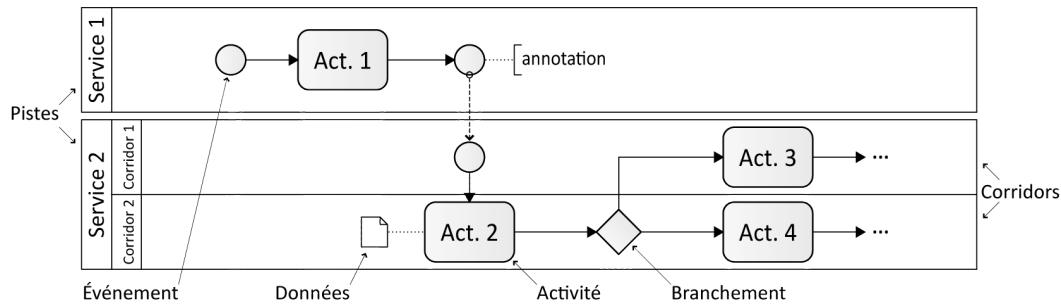


Figure 3.8 – Illustration simple de la modélisation de processus utilisant la méthode BPMN.

en particulier sur des plateformes *web* pour le travail collaboratif. Parmi les multiples méthodes existantes, nous pouvons nommer le Business Process Execution Language (BPEL), un standard essentiellement utilisé pour les services *web* et qui est notamment compatible avec le BPMN à l'aide de conversions [White 2005], ou encore le ebXML - Business Process Specification Schema (ebXML-BPSS) qui est l'une des méthodes les plus populaires pour modéliser les collaborations lors de processus d'affaires [UN/CEFACT and OASIS 2001].

Ceci conclut notre énumération chronologique des diverses méthodologies de planification et de modélisation des processus. L'intégralité des méthodes mentionnées dans cette section est illustrée et décrite plus en détails dans l'annexe B. Il est à présent temps de nous pencher sur le choix des méthodes que nous allons utiliser pour modéliser et planifier collaborativement les interventions dans des environnements émettant des rayonnements ionisants. Les méthodes candidates ne manquent pas, et nous avons ainsi choisi de développer notre nouvelle approche de la planification collaborative en nous basant sur une (ou plusieurs) de ces méthodes existantes. La section suivante s'attache donc à décrire ce choix qui, selon notre approche de la complexité décrite en début de chapitre, se veut résolument multicritère.

3.3 Le choix des méthodes

Cet inventaire de méthodes de planification et de modélisation de projets et de processus a été effectué au tout début de notre travail de thèse. La motivation derrière cette tâche était simple : étant donné l'abondance de méthodes dans le domaine, il n'y avait que peu de doute qu'au moins l'une d'entre elles correspondrait (ou pourrait être aisément adaptée) à notre contexte de planification collaborative.

Cependant, pour trouver cette méthode (ou ces méthodes), il nous a fallu passer par trois étapes que nous décrivons dans cette section :

- la modélisation formelle d'une intervention ;
- la définition de critères d'évaluation et de comparaison ;
- l'utilisation d'une méthode de sélection.

Les deux premières étapes font appel à une branche des sciences de l'information qui nous vient de la philosophie : l'ontologie. La troisième, comme nous l'avons à plusieurs reprises mentionné depuis le début de ce travail, a été réalisée à l'aide d'une méthode d'Aide à la Décision Multicritère (AMCD).

Cette section 3.3 décrit donc comment le choix de DSM a été effectué, et la raison pour laquelle nous avons été amenés à travailler sur son association avec l'algèbre d'intervalles d'Allen.

3.3.1 Modèle ontologique et choix des critères

Ontologie et ontologies

L'ontologie est à l'origine une branche de la métaphysique. Pour citer Aristote (*Métaphysique*, chapitre III), il s'agit d'une science qui étudie *l'Être en tant qu'être, et les attributs qui lui appartiennent essentiellement*. Son évolution au sein de la philosophie est rapidement évoquée par Nicquevert [Nicquevert 2013a, Chapitre 2, p. 47]. Cependant, c'est vers la fin du XX^e siècle que le terme a pris le sens qu'on va lui donner dans ce travail : en partant d'une acception philosophique anglo-saxonne qui décrit l'ontologie comme un ensemble de référents, on en est arrivé à utiliser l'ontologie en sciences de l'information, notamment en informatique, pour conceptualiser le domaine réel auquel on s'intéresse et en partager la compréhension. De nombreuses définitions de l'ontologie selon cette acception sont données par Rose [Rose 2004, Chapitre 3].

Une des définitions les plus connues d'une ontologie en sciences de l'information et en ingénierie de la connaissance est donnée par Thomas Gruber : une ontologie est une "spécification explicite d'une conceptualisation", c'est-à-dire une simplification abstraite de ce que l'on souhaite représenter ou modéliser afin d'en partager la connaissance [Gruber 1993]. En des termes plus simples, il s'agit de définir des termes communs à toutes les parties impliquées dans un travail effectué dans un domaine donné, ce qui revient à faciliter la communication entre les différents participants dans une situation de collaboration.

Dans ce contexte, on ne parle alors plus d'ontologie mais d'une ontologie ou même d'ontologies. Il en existe de plusieurs types, que l'on peut classer selon deux principales catégories (Rose effectue une classification plus fine, qui ne sera cependant pas nécessaire dans la suite de notre travail) :

- les ontologies de domaine, qui sont spécifiques au domaine qu'elles décrivent et possèdent souvent des éléments incompatibles ;
- les ontologies génériques ou ontologies de haut niveau qui s'appliquent à de nombreux domaines et manipulent des concepts généraux (le temps, les processus, etc.).

Une ontologie est constituée d'un ensemble d'éléments qui décrivent le domaine que l'on souhaite conceptualiser. Il s'agit donc des objets qui le constituent, mais également des relations et interactions qui existent entre eux. La description d'une

3.3. Le choix des méthodes

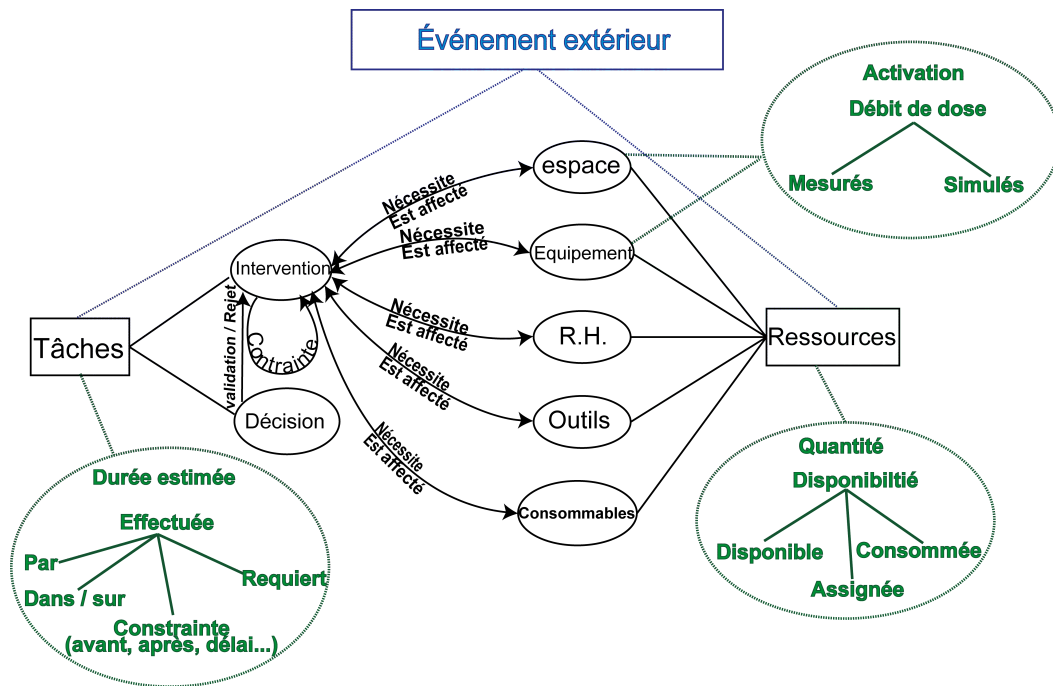


Figure 3.9 – Représentation ontologique d’une intervention en environnement émettant des rayonnements ionisants.

ontologie passe donc nécessairement par celle de ses constituants. Les constituants rencontrés dans la majorité des cas sinon tous sont :

- les individus ou objets, qui sont les constituants élémentaires du domaine décrit ;
- les classes, qui sont des ensembles d’objets possédant des attributs communs ;
- les attributs, qui décrivent les propriétés des objets et des classes ;
- les relations, qui décrivent les liens entre classes et objets ;
- les événements, qui modifient les attributs et les relations.

Cette formulation abstraite va donner des structures concrètes en termes de programmation notamment pour créer les structures de données. On voit ici apparaître les concepts de classes, d’instances et de méthodes que l’on retrouve dans la programmation orientée objet. Les ontologies sont ainsi présentes dans des domaines tels que l’intelligence artificielle, le génie logiciel ou encore l’informatique biomédicale.

Représentation ontologique d’une intervention

En se basant sur ces définitions, nous avons bâti un modèle ontologique simple, spécifique à un domaine donné : celui des interventions dans les installations scientifiques émettant des rayonnements ionisants. Elle est illustrée en Figure 3.9.

Il est possible d’y distinguer deux principales catégories d’éléments à représenter : les éléments physiques, qui sont les différentes ressources disponibles, et les élé-

ments intangibles que sont les interventions à réaliser. Les relations existant entre ressources et tâches sont les relations d'affectation. L'affectation d'une ressource humaine à une intervention donnée modifie son état, qui passe de disponible à indisponible, et une ressource spatiale comme un équipement ou un lieu donné peut être rendu inaccessible durant une intervention (en raison de l'espace souterrain limité ou des risques liés aux travaux réalisés). La disponibilité des outils ou des consommables est une problématique secondaire, et sera surtout liée à leur quantité disponible à une date donnée.

Les interventions sont assez compliquées à décrire ontologiquement, comme il sera possible de le voir un peu plus loin dans cette section, avec la mise en correspondance de ce modèle ontologique d'intervention et celui de Bunge, Wand et Weber qui nous servira de base de comparaison. En effet, les interventions ne sont pas des éléments physiques de notre domaine d'étude, mais plutôt des transformations car elles affectent l'état des ressources (leur disponibilité, leur quantité) et impliquent tout simplement des modifications physiques des équipements et des installations.

Comme nous l'avons expliqué brièvement dans le chapitre 1 (cf. section 1.2.3), nous souhaitons traiter dans cette thèse tous types d'interventions et donc établir un modèle le plus général possible. Dans les installations scientifiques émettant des rayonnements ionisants, il est possible d'identifier cinq catégories d'interventions :

- les interventions de maintenance préventive ;
- les interventions de maintenance corrective ;
- les inspections, notamment pour la radioprotection, la sécurité et la sûreté dans les installations ;
- les interventions dans le cadre de projets de consolidation d'équipements ;
- les interventions dans le cadre de projets d'amélioration d'équipements.

Les trois premières entrent dans la catégorie des opérations. Ce sont des interventions qui sont amenées à être répétées régulièrement, et sont habituellement programmées au cours d'arrêts techniques des machines relativement courts (de l'ordre de quelques jours à quelques semaines). Les deux dernières catégories concernent des interventions ayant lieu dans le cadre de projets. Ce sont des interventions uniques, souvent programmées à l'avance et de longue date pendant des arrêts techniques longs voire de longues périodes d'arrêts spécifiquement prévues pour la consolidation et l'amélioration d'équipements, comme le *Long Shutdown 1* d'environ deux ans (LS1) mentionné dans le chapitre 1. Mais quelle que soit la nature de l'intervention envisagée, le modèle établi est suffisamment général pour la prendre en compte. Les spécificités de la planification sont ensuite fournies par les acteurs qui en sont chargés notamment lorsqu'ils spécifient leurs contraintes.

Les interventions sont soumises à deux types d'événements supplémentaires qui vont agir sur leur réalisation, et donc indirectement sur les ressources : les décisions et les contraintes temporelles. La décision est l'événement qui décide de la réalisation d'une intervention donnée en validant le scénario choisi (ce qui déclenche l'affectation de ressources) ou, au contraire, qui rejette le projet d'intervention. La soumission de contraintes temporelles, mais également de contraintes liées au risque (notamment radiologique) dont nous traitons à présent depuis le chapitre précédent, est un

3.3. Le choix des méthodes

processus d'interaction entre interventions (ou entre les tâches qui les composent). C'est leur prise en compte, qui plus est au cœur d'un processus collaboratif, qui va entraîner les couplages entre tâches. Nous pouvons enfin noter que nous avons inclus les événements extérieurs dans le modèle. Cependant, dans la planification d'intervention, ils sont assez mal définis en termes de nature comme d'effets. Ils peuvent par exemple concerner l'ajout de nouvelles interventions de maintenance corrective non prévue qui vont entraîner de nouvelles contraintes temporelles entre interventions ainsi que de nouvelles affectations de ressources.

Ce modèle établi, il ne reste pour ainsi dire plus qu'à évaluer différentes méthodes de modélisation et de planification et à choisir les plus adaptées à ce modèle ontologique. Pour cela, des critères d'évaluation et de comparaison sont nécessaires.

Critères d'évaluation

Thomas Gruber, dont nous avons cité la définition d'une ontologie au sens des sciences de l'information, définit également cinq aspects fondamentaux d'une ontologie [Gruber 1995] :

- la clarté : toute définition d'un concept doit être objective, complète (nécessaire et suffisante), véhiculer le sens voulu et documentée en langage naturel ;
- la cohérence : les diverses définitions et ce qui en est inféré ne doivent pas entrer en contradiction ;
- l'extensibilité : possibilité d'ajouter des concepts sans modifier les bases ;
- la déformation d'encodage minimal : la spécification formelle d'un concept doit altérer au minimum son sens initial ;
- l'engagement ontologique minimal : la description d'un domaine doit être complète, ni plus, ni moins. Autrement dit, pour chaque élément du réel à représenter, il faut un unique concept ontologique.

Ces notions peuvent être utilisées comme consignes à suivre pour la création d'ontologies. En ce qui nous concerne, elles offrent la possibilité de créer des critères d'évaluation pour nos modèles de planification et de modélisation des interventions. Pour cela, nous nous basons sur une ontologie bien spécifique : l'ontologie de Bunge, Wand et Weber (BWW).

Cette ontologie a été développée par deux auteurs principaux, Yair Wand et Ron Weber [Wand 1993, Wand 1995]. Ils l'ont basée sur les travaux du philosophe et physicien argentin Mario Bunge [Bunge 1977, Bunge 1979], et ce pour trois raisons principales :

- ils la considèrent comme bien développée, car précisément formalisée et définie ;
- elle ne prend pas uniquement en compte les choses et les classes de choses, mais décrit également des agglomérations de choses sous forme de systèmes ;
- des résultats théoriques et pratiques intéressants ont été obtenus en l'utilisant.

La communauté académique des sciences de l'information s'intéressant aux ontologies leur a par la suite donné raison en utilisant ce modèle pour des évaluations de modèles d'information. C'est le cas dans de nombreuses publications qui s'at-

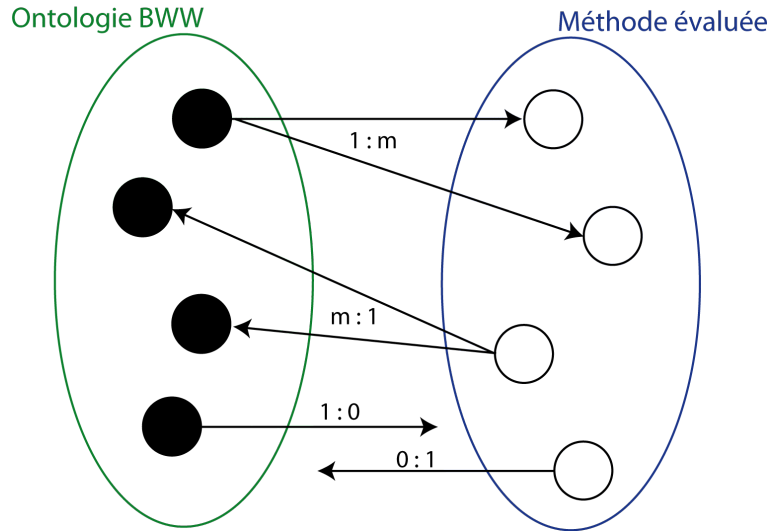


Figure 3.10 – Figure illustrant les différents défauts de correspondance entre l'ontologie BWW et le modèle de représentation évalué. Les cercles représentent les divers éléments appartenant soit à l'ontologie BWW (objets, classes, événements, transformations, etc.), soit à la méthode modélisée (activités, ressources, arcs, etc.). Cette figure est inspirée de [Recker 2009].

tachent notamment à évaluer et à comparer différentes méthodes de modélisation, la plupart d'entre elles appartenant d'ailleurs à notre échantillon [Keen 1996, Rosemann 2000, Green 2005, Recker 2005, Green 2006, Recker 2009].

L'ontologie BWW est en réalité composée de trois modèles différents censés évaluer les systèmes d'information. Le premier est le plus largement utilisé : c'est le *Representational Model* ou "modèle de représentation", sur lequel nous allons revenir par la suite. Les deux autres sont le modèle du *State Tracking* (suivi des états), qui sert à évaluer la capacité d'un modèle à suivre correctement les changements d'état du système étudié, et enfin le *Good Decomposition Model* ou "modèle de bonne décomposition", qui évalue comme son nom l'indique la bonne structure du système en sous-systèmes et tous autres éléments nécessaires à une décomposition claire et complète d'un système principal.

Le modèle de représentation a pour objectif de donner de l'information sur deux caractéristiques ontologiques d'un modèle : sa complétude et sa clarté. L'évaluation de ces caractéristiques se fait par *data mapping* ou en français "mise en correspondance des données". Le modèle BWW comporte un certain nombre d'éléments qui vont être comparés à ceux de la représentation analysée. Un modèle à la fois complet et clair devra posséder un et un seul élément pour chaque élément de l'ontologie BWW, ce qui revient à une correspondance (1 : 1) entre les éléments de l'ontologie et ceux de la représentation analysée. Les autres configurations débouchent sur des défauts de correspondance, comme illustré en figure Figure 3.10.

3.3. Le choix des méthodes

En ce qui concerne la complétude, on peut calculer un indice appelé degré d'incomplétude noté DoI qui est égal au rapport entre le nombre d'éléments du modèle BWW non représentés dans la grammaire étudiée (soit le nombre de correspondances 1 : 0) et le nombre total d'éléments du modèle BWW. Un degré de complétude peut être déduit facilement du DoI : $DoC = 1 - DoI$.

Trois autres indices peuvent également être calculés pour caractériser un manque de clarté du modèle étudié à l'aide de l'ontologie BWW. Il s'agit des degrés d'excès (DoE), de redondance (DoR) et de surcharge (DoO , venant du mot anglais *overload*). Ils se calculent selon les façons suivantes :

- DoE : rapport entre le nombre de correspondances (0 : 1) (nombre d'éléments de la grammaire étudiée ne correspondant à aucun élément du modèle BWW) et le nombre total d'éléments de la grammaire étudiée ;
- DoR : rapport entre le nombre de correspondances (1 : m) (nombre d'éléments de la grammaire étudiée correspondant à la même définition du modèle BWW) et le nombre total d'éléments de la grammaire étudiée ;
- DoO : rapport entre le nombre de correspondances (m : 1) (nombre d'éléments surchargés dans le modèle étudié correspondant à plusieurs définitions de l'ontologie BWW) et le nombre total d'éléments de la grammaire étudiée.

La clarté du modèle peut s'étudier simplement en considérant les indices inverses, comme pour les deux indices DoI et DoC .

Ces divers indices d'évaluation nous ont été par la suite utiles pour établir une comparaison chiffrée entre les méthodes de modélisation mentionnées précédemment. Mais ce qu'il faut retenir de cette section est l'information suivante : il est possible d'obtenir une évaluation quantitative sur plusieurs critères pour une méthode de modélisation donnée en partant de l'ontologie. En utilisant ce modèle d'évaluation, nous avons pu obtenir des critères les moins subjectifs possibles. Cependant, une certaine part de subjectivité subsiste malgré tout lorsqu'il s'agit d'établir les correspondances entre modèle BWW et méthodes de modélisation de notre échantillon.

Afin d'affiner un peu plus le cadre de travail, il est possible de constater que le modèle BWW est très exigeant et que la plupart des méthodes évaluées obtiennent des scores moyens voire faibles [Recker 2009]. Nous avons donc choisi de centrer la comparaison des méthodes de notre échantillon uniquement sur des critères importants pour les interventions au CERN (dans le sens décrit précédemment), et donc de ne baser l'évaluation que sur un sous-ensemble des éléments du modèle BWW.

Ce raisonnement consistant à créer une ontologie restreinte est notamment utilisé par Rosemann et Green [Rosemann 2000]. Sa justification est la suivante : le modèle BWW ne prenant en compte ni l'utilisateur, ni le but dans lequel il effectue son analyse, tous ses éléments ne sont pas nécessairement pertinents dans l'analyse. Une technique de modélisation peut très bien être déficitaire dans certains des aspects du modèle BWW pour lequel l'utilisateur n'a en réalité aucun intérêt et il serait alors dommage de pénaliser cette méthode selon ce critère.

Nous avons donc adapté ce processus d'élimination des critères superflus au cadre des interventions du CERN pour ne tenir compte que des éléments du modèle BWW dont notre analyse a réellement besoin. La Figure 3.9 vue précédemment donnait une

Chapitre 3. Vers une planification d'intervention collaborative

Ontologie BWW	Modèle ontologique d'intervention
Objet	X
Propriété	Quantité, disponibilité, informations radiologiques
Classe	Ressources (RH, installations, équipements, outils, consommables)
Genre	X
États	Quantité, disponible, affectée, consommée
Espace des états	Quantité, disponible, affectée, consommée
Loi d'état	Affectation
États possibles	Quantité disponible OU affectée OU consommée
États stables	Tous
États instables	X
Historique	X
Événement	Affectation, décision
Espace des événements	Affectation, spécification de contrainte, décision, événement extérieur
Espace des événements possibles	Affectation, spécification de contrainte, validation OU rejet, événement extérieur
Événements extérieurs	Événement extérieur
Événements internes	Affectation, spécification de contrainte, décision
Événements définis	Affectation, spécification de contrainte, décision
Événements indéfinis	Événement extérieur
Transformation	Intervention
Loi de transformation	Valider intervention
Action	Décision
Couplage	Affectation
Système	Intervention
Composition de système	X
Environnement de système	Ressources
Structure de système	X
Sous-système	Intervention
Décomposition de système	X
Niveau structurel	X
Éléments en excès	Propriétés des interventions : durée estimée, ressources nécessaires, contraintes temporelles

Tableau 3.1 – Liste des constituants de l'ontologie de Bunge, Wand et Weber. Les lignes grisées représentent les éléments effectivement utilisés dans notre ontologie de modélisation d'interventions.

3.3. Le choix des méthodes

représentation graphique de notre ontologie des interventions. Le Tableau 3.1 établit la correspondance entre celle-ci et le modèle BWB. Les lignes grisées correspondent aux éléments qui nous intéresseront par la suite. Autrement dit, tous les indices (*DoI*, *DoC*, *DoE*, *DoR* et *DoO*) calculés lors du travail d'analyse effectué le sont à présent non plus en comparaison avec le modèle BWB complet comme référence, mais avec l'ontologie réduite.

Afin de conclure cette section sur l'analyse ontologique, nous avons décidé d'ajouter aux indices précédemment définis un critère supplémentaire. En effet, il nous semble important de pouvoir donner de l'importance à des caractéristiques des méthodes de modélisations n'apparaissant pas dans le modèle BWB mais indispensables lorsqu'il s'agit de planifier collaborativement des interventions. Il s'agit de :

- la prise en compte de la décision ;
- la prise en compte de tâches simultanées ;
- la possibilité d'itération, de boucle, ou d'instances multiples pour une tâche ;
- la prise en compte d'événements stochastiques (une distribution temporelle pour la durée d'une tâche, une probabilité de succès ou d'échec, etc.).

Pour cela, nous avons effectué un classement des méthodes avec un "indice de branchement" calculé en fonction du nombre d'éléments qu'elles présentent traitant de ces problématiques. Celle qui en possède le plus (VERT) a obtenu la note de référence de 1.0, tandis que le score des autres méthodes a été calculé en pourcentage, en faisant le rapport du nombre d'éléments de branchement, bouclage ou prise en compte de la stochasticité qu'elles possèdent avec celui de VERT.

Tous ces critères ont été étudiés pour chacune des méthodes de l'échantillon afin d'obtenir pour chacune des évaluations quantitatives. Nous avons ensuite utilisé une AMCD²⁵ afin d'identifier les plus performantes d'entre elles pour modéliser les interventions en environnement radioactif et procéder à leur planification collaborative.

3.3.2 Notre échantillon complet

Si nous retournons brièvement vers la section 3.2, notre échantillon de méthodes comparées ne reprend pas la totalité des méthodes mentionnées dans notre historique. En effet, nous n'avons considéré que les méthodes débouchant sur une représentation graphique du projet ou du processus modélisé. Nous avons donc dans un premier temps laissé de côté les méthodes de planification en intelligence artificielle. L'objectif de cette démarche est de séparer tout aspect calculatoire lié à l'optimisation des interventions du formalisme graphique proposé à des collaborateurs qui ne se spécialisent pas nécessairement dans la planification.

En effet, avec plusieurs centaines voire milliers d'interventions à planifier par an, les systèmes de planification du CERN doivent fournir différents types d'informations aux utilisateurs selon leurs besoins. Certains utilisateurs n'ont besoin que d'une validation de leur projet d'intervention, avec des dates de réalisation au plus tôt ou au plus tard. S'ils sont concernés par plusieurs interventions, un emploi du temps représenté graphiquement avec les différentes dates, durées et ressources impliquées

25. Pour rappel, Aide Multi Critères à la Décision.

Méthodes	1-DoC	1-DoE	1-DoR	1-DoO	Banchements
CPM, PDM, RCPSP	47.37	100.0	40.0	90.0	6.67
PERT	47.37	100.0	40.0	90.0	13.33
GERT	36.84	85.71	71.43	85.71	53.33
VERT	42.11	88.89	66.67	88.89	100.0
Décision Box	52.63	100.0	33.33	83.33	20.0
CYCLONE	73.68	90.0	60.0	60.0	13.33
DSM	42.11	100.0	75.0	100.0	20.0
FPC	26.32	55.56	55.56	88.89	0.0
ANSI Flowcharts	47.37	53.57	60.71	92.86	26.67
System Dynamics	68.42	100.0	50.0	50.0	26.67
Petri Nets	57.89	100.0	71.43	57.14	60.0
YAWL2	47.37	100.0	16.67	79.17	53.33
SADT IDEF0	52.63	62.96	59.26	93.3	53.33
EFFBD	57.89	88.89	55.56	77.78	40.0
IDEF3	42.11	75.0	100.0	87.5	26.67
EPC	52.63	87.5	62.5	75.0	20.0
UML 2.0	84.21	93.75	31.25	75.0	46.67
BPMN	84.21	84.62	35.9	64.1	40.0
ebXML-BPSS	94.74	77.14	48.57	94.29	13.33

Tableau 3.2 – Tableau des différents formalismes de modélisation et de planification de projets ou de processus considérés pour notre méthodologie de planification collaborative d'interventions.

est suffisant. L'optimisation temporelle concerne plutôt les responsables du système de planification, ou les coordinateurs qui ont pour mission d'optimiser l'agencement des tâches à effectuer afin de maximiser les périodes d'opération des installations. De leur côté, les agents en radioprotection sont plus concernés par l'optimisation des doses reçues (nous avons notamment décrit l'approche ALARA en chapitre 2) et souhaitent être au courant des interventions les plus "dosantes", même lorsqu'il ne s'agit que de projets d'interventions.

De plus, ce nombre important d'interventions à planifier dans un contexte collaboratif peut impliquer de nombreux conflits d'affectation de ressources (ressources humaines, installations et équipements). L'utilisation de planification d'intelligence artificielle va donc venir assister les utilisateurs pour exprimer leurs contraintes temporelles et de ressources ainsi que pour détecter les conflits et si possible donner une certaine priorité à certaines interventions ou contraintes [Baudin 2012] et proposer des compromis : par exemple, les contraintes potentielles sont inhérentes à l'enchaînement des tâches au sein des projets ou des opérations, et bien moins flexibles que des contraintes logistiques.

La représentation graphique des interventions et la prise en compte des contraintes collaboratives sont donc deux aspects distincts des méthodes que nous développons

3.3. Le choix des méthodes

dans cette thèse. Cette section liste donc notre échantillon de méthodes de représentation graphique et de planification d'interventions. Il est donné dans le Tableau 3.2, avec pour chaque méthode les scores que nous lui avons attribués selon les différents critères mentionnés dans la section précédente.

Les valeurs obtenues sont le résultat d'un travail effectué par quatre individus au total. Chacun a effectué la correspondance entre les éléments de chaque méthode et l'ontologie de BWW réduite pour en déduire les différents indices. Les résultats ont ensuite été confrontés les uns aux autres afin d'obtenir une évaluation commune. Les évaluations de certaines de ces méthodes présentes dans des publications antérieures (notamment [Recker 2009] et les sources citées dedans) ont été reprises et comparées aux nôtres et les différences minimisées. L'objectif de cette démarche est d'obtenir une comparaison la plus objective possible. Cependant, comme il est précisé dans la plupart des publications de cette nature, il est impossible de supprimer totalement la subjectivité, ne serait-ce que dans l'interprétation des définitions de l'ontologie BWW utilisées pour effectuer la correspondance avec les méthodes de modélisation.

En ce qui nous concerne, nous avons choisi cette méthode de comparaison par l'ontologie en connaissance de cause, afin d'obtenir des critères de sélection. Malgré une certaine subjectivité, on peut voir dans le Tableau 3.2 que des méthodes très riches et complètes comme le BPMN vont en revanche souffrir d'un certain manque de clarté, à l'opposé de méthodes formellement plus simples comme DSM. L'analyse de ces résultats ne pouvait donc se faire que selon une approche multicritère.

Comme nous allons le décrire dans la section suivante, nous avons donc procédé à l'agrégation de ces critères par une méthode d'AMCD. Les meilleures candidates de l'échantillon devaient donc présenter un bon équilibre entre complétude, clarté ainsi que la capacité des méthodes à prendre en compte des interactions avancées entre tâches (ce que nous appelons “branchements” dans le Tableau 3.2, mais qui désigne toute séparation du flux de travail, et notamment les boucles et couplages, selon des logiques plus ou moins développées pouvant inclure la stochasticité).

3.3.3 Un choix mettant la complexité en valeur

ELECTRE I

L'aide à la décision multicritère (AMCD) est un domaine vaste dans lequel de très nombreuses méthodes ont été développées [Roy 1985, Schärli 1985, Vincke 1989, Schärli 1996]. Il n'est pas dans le propos de cette thèse de toutes les décrire. Cependant, la méthode ELECTRE I que nous avons utilisée pour analyser nos résultats d'évaluation est détaillée en annexe D, car nous n'en décrivons ici que le principe. Il s'agit d'une méthode établie par Bernard Roy à la fin des années 1960, qui est utilisée dans une approche dite “alpha”, c'est-à-dire que l'on cherche à déterminer au sein d'un échantillon l'ensemble des meilleurs éléments sans en établir un classement formel. Les autres approches ont des objectifs légèrement différents : l'approche bêta vise à distinguer plusieurs groupes au sein de l'échantillon, tandis que l'approche gamma permet d'établir un classement, de la meilleure option à la moins bonne.

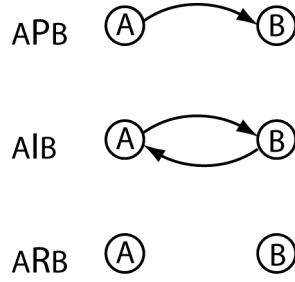


Figure 3.11 – Les trois relations du graphe de surclassement.

Nous avons donc choisi d'adopter l'approche alpha pour déterminer le sous-ensemble des méthodes de notre échantillon contenant les solutions les plus adaptées à notre contexte. Le choix définitif de DSM a ensuite été effectué sur quelques critères supplémentaires que nous aborderons en fin de section.

Sans entrer dans les calculs, le principe d'ELECTRE I est de définir des relations de dominance entre les différentes options considérées (donc ici entre les méthodes de planification et de modélisation de l'échantillon). Pour cela, il faut calculer pour chaque paire d'options (notons-les A et B) deux indices :

- la concordance C_{AB} , qui quantifie la domination de A sur B sur l'ensemble des critères ;
- la discordance D_{AB} , qui quantifie la domination de A par B sur le critère où A est la plus inférieure à B .

Pour des raisons de simplicité, il est courant de normaliser ces indices entre 0 et 1. Une forte domination de A sur B se traduira par une concordance proche de 1 et une discordance faible. Des seuils q_C et q_D sont ensuite introduits par l'utilisateur pour ces deux quantités, et trois relations peuvent en résulter (Figure D.2) :

- la préférence A est préférable à B si $C_{AB} > q_C$ et $D_{AB} < q_D$ (A surclasse B et B ne surclasse pas A) ;
- l'indifférence $C_{AB} > q_C$ et $D_{AB} < q_D$ mais également $C_{BA} > q_C$ et $D_{BA} < q_D$ (A et B se surclassent mutuellement) ;
- la non-comparabilité $C_{AB} < q_C$ ou $D_{AB} > q_D$ mais également $C_{BA} < q_C$ ou $D_{BA} > q_D$ (ni A , ni B ne surclasse l'autre).

Le résultat d'ELECTRE I apparaît donc sous la forme d'un graphe appelé *graphe de surclassement*. Le sous-ensemble de meilleures solutions est ce que l'on appelle, en théorie des graphes, le noyau (l'ensemble des nœuds n'étant soit jamais surclassés, soit jamais surclassés par un élément appartenant au noyau). Une relation de surclassement sera d'autant plus forte qu'elle est obtenue avec un haut seuil de concordance et un faible seuil de discordance. Il est donc intéressant de tester plusieurs valeurs de seuils q_C et q_D afin de tester la "solidité" de ces relations. Pour les détails sur les calculs des indices et du noyau du graphe, ainsi que sur leur signification précise, nous vous invitons à consulter l'annexe D.

3.3. Le choix des méthodes

Discordance \ Concordance	0.2	0.3	0.4	0.6	1.0
0.8	11	7	4	4	4
0.7	10	6	3	3	3
0.6	5	4	0	0	0
0.4	4	2	0	0	0
0.0	3	1	0	0	0

Tableau 3.3 – Nombre de méthodes dans le noyaux pour vingt-cinq différentes paires de valeurs pour les seuils q_C et q_D .

Discordance \ Concordance	0.2	0.3	0.4	0.6	1.0
0.8	5	1	1	1	1
0.7	3	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0	0
0.4	0	0	0	0	0
0.0	0	0	0	0	0

Tableau 3.4 – Nombre de méthodes non comparables au reste de l'échantillon pour les même vingt-cinq paires de valeurs pour les seuils q_C et q_D .

Nos résultats

Nous avons donc appliqué la méthode ELECTRE I à notre échantillon, en choisissant de tester cinq niveaux pour chaque seuil (concordance et discordance). Les tableaux 3.3 et 3.4 fournissent respectivement et pour chaque configuration le nombre de méthodes dans le noyau du graphe de surclassement ainsi que le nombre de méthodes incomparables au reste de l'échantillon. La Figure 3.12 présente quant à elle le diagramme de surclassement obtenu pour deux configurations testées : la plus stricte avec $q_C = 0.8$ et $q_D = 0.2$ et une configuration intermédiaire avec $q_C = 0.6$ et $q_D = 0.2$ autorisant un surclassement plus faible avec cependant un seuil de discordance toujours bas pour ne pas éliminer de méthodes sur une faiblesse relative pour un seul critère.

Comme le montrent les deux tableaux et la figure, les seuils stricts nous ont donné le noyau le plus important, mais contenant également le plus grand nombre de méthodes incomparables (cinq sur onze, illustré en haut de Figure 3.12). Il faut diminuer le seuil de concordance à 0.6 avec une discordance inchangée de 0.2 pour s'assurer que tous les membres du noyau surclassent au moins une méthode (cf. en bas de la Figure 3.12). Cette forte incomparabilité au sein de l'échantillon était prévisible : toutes ces méthodes ont été créées pour répondre à des besoins spécifiques alors absents des méthodes existantes (à part certaines qui sont assez proches comme par exemple SADT et le FFBD).

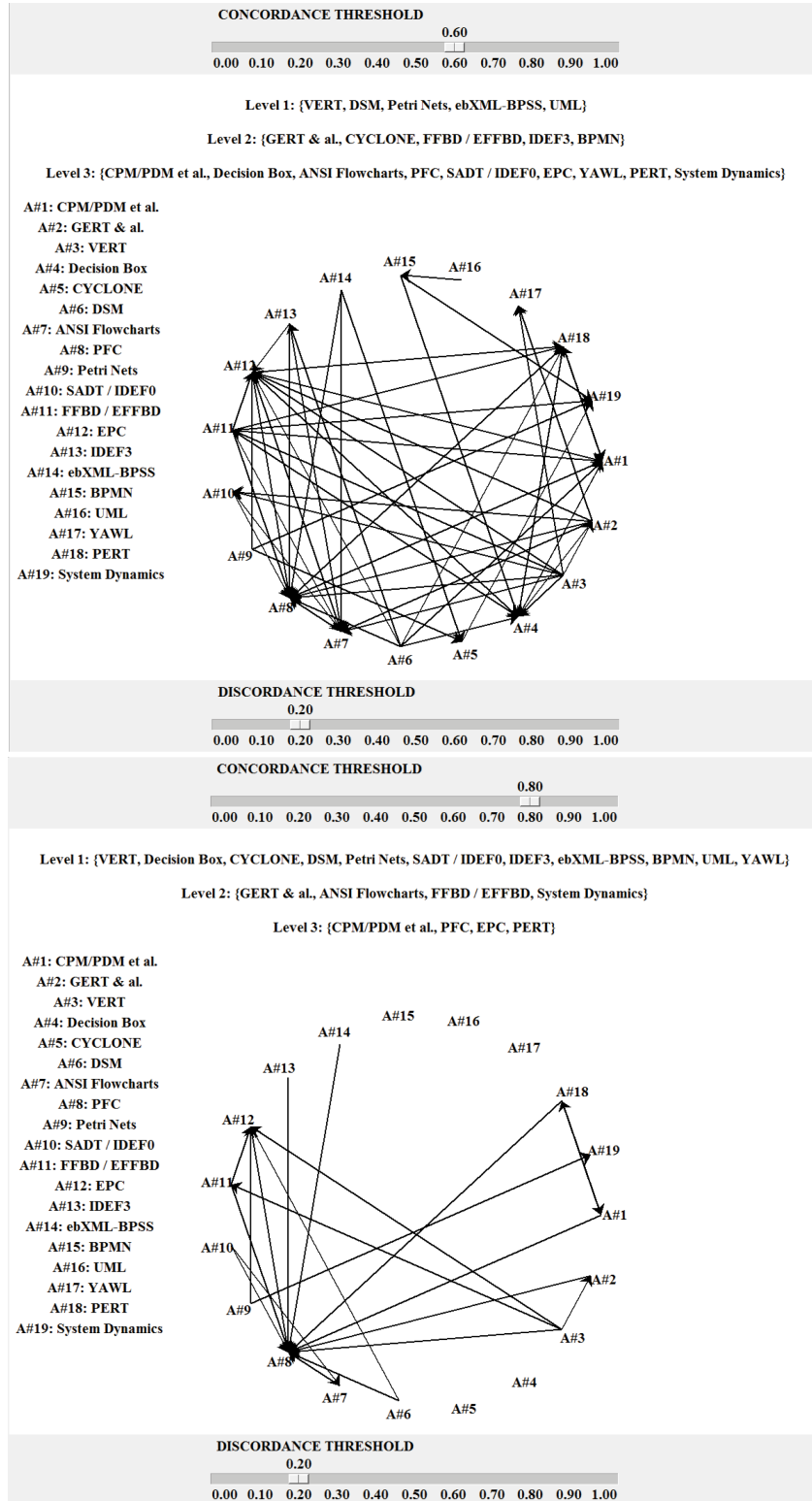


Figure 3.12 – Graphes de surclassement pour deux paires de valeurs de q_C et q_D . On constate qu'en acceptant des relations de surclassement plus faibles, on obtient plus d'arcs dans le graphe et un noyau plus retreint.

3.3. Le choix des méthodes

Cependant, en faisant varier les valeurs de q_C et q_D , certaines tendances se dégagent dans les relations de surclassement. Il est possible d'identifier un certain nombre de méthodes qui apparaissent régulièrement dans le noyau du graphe et constituent au final notre sous-ensemble "dominant". Le Tableau 3.5 résume pour huit combinaisons de valeurs de q_C et q_D quelles sont les méthodes que nous trouvons dans le noyau, combien de fois elles y apparaissent et également combien de fois elles y apparaissent sans être comparables au reste de l'échantillon. Les valeurs choisies sont $q_C = \{0.6, 0.7, 0.8\}$ et $q_D = \{0.4, 0.3, 0.2\}$, qui représentent les cases du Tableau 3.3 où le noyau comporte le plus de méthodes, tout en conservant les seuils les plus sélectifs possible. En revanche, nous avons choisi d'exclure la paire ($q_C = 0.8$, $q_D = 0.2$) qui présente une trop forte incomparabilité des méthodes, ce qui rend ce noyau peu représentatif des relations de surclassement.

Parmi ces dix méthodes, il est possible de remarquer que la *Decision Box* et YAWL2 n'apparaissent qu'une seule fois dans le noyau et ce par incomparabilité avec l'échantillon, ce qui fait d'elles les candidates les moins probables pour planifier ou modéliser les interventions dans notre contexte. Toutes les autres apparaissent au moins une fois en surclassant au moins une méthode. Mais en considérant ces dernières dans le tableau, il vient une question : pourquoi avoir opté pour DSM alors qu'elle n'apparaît ici qu'en sixième position parmi les méthodes restantes ? C'est parce que, comme nous l'avons précisé en section 3.3.2, nous n'avons comparé jusqu'ici que les capacités de modélisation graphique des interventions. Il faut à présent tenir compte des possibilités d'utilisation à des fins d'optimisation pour trancher.

Au sein des méthodes restantes, il est possible de distinguer trois catégories de méthodes :

- les méthodes analytiques et de simulation : VERT, Réseaux de Petri, DSM, CYCLONE ;
- les méthodes purement graphiques : SADT / IDEFØ, IDEF3, Diagrammes d'activités UML 2.0 ;
- une spécification exécutable : ebXML-BPSS.

Les deux dernières catégories nous intéressent clairement moins car choisir une de ces méthodes reviendrait à choisir soit un modèle purement graphique et ne comprenant pas d'informations temporelles ni de fonctionnalités de calcul, ou au contraire une spécification XML sans formalisme graphique. Or, dans notre analyse ontologique, les méthodes analytiques de la première catégorie ont fait aussi bien qu'elles pour la représentation et la modélisation, ce qui leur donne un avantage certain.

Pour départager ces quatre "finalistes", nous avons d'abord considéré l'aspect pratique d'utilisation compte tenu de notre contexte d'installations scientifiques émettant des rayonnements ionisants. Une méthode de simulation de construction comme CYCLONE présentait des intérêts certains d'un point de vue des travaux de constructions. Mais les projets et les interventions au CERN et autres installations similaires ne s'y limitent pas, loin de là, ce qui nécessiterait une adaptation importante. La grande force de VERT est sa capacité de simulation, notamment des

Méthodes de modélisation	Présence dans le noyau	Présence sans comparabilités
VERT	5	0
Petri Nets	5	0
ebXML-BPSS	5	0
UML activity diagram	5	2
SADT / IDEFØ	3	0
IDEF3	3	0
DSM	2	0
CYCLONE	2	1
Decision Box	1	1
YAWL2	1	1

Tableau 3.5 – Méthodes de modélisation apparaissant dans le noyau du graphe de surclassement pour les valeurs : $q_C = \{0.6, 0.7, 0.8\}$ et $q_D = \{0.4, 0.3, 0.2\}$, à l'exception de la paire ($q_C = 0.8$, $q_D = 0.2$) qui présente un noyau trop important dû à une forte incomparabilité des méthodes.

risques inhérents aux projets, avec l'utilisation d'une logique étendue et d'un large nombre de distributions stochastiques. Cependant, comme beaucoup de méthodes de réseaux d'activités généralisées, elle a le défaut d'être compliquée d'utilisation, et ne sera pas adaptée à une utilisation collaborative impliquant des acteurs pouvant être chercheurs en physique des particules comme techniciens en électrotechnique.

Les réseaux de Petri et DSM restent donc les deux choix les plus intéressants pour une utilisation dans le contexte de cette thèse. Leurs formalismes simples et leurs capacités avancées de simulation en font des candidats intéressants d'un point de vue représentatif d'une part, mais aussi d'un point de vue analytique d'autre part. Tous deux possèdent également plusieurs types d'extensions pour étendre leur logique (les réseaux de Petri colorés et stochastiques ou les DSM numériques et paramétrées) et prendre en compte divers événements et contraintes. DSM est toutefois une méthode de référence dans la conception de nouveaux produits, notamment pour ce qui est de la gestion des contraintes complexes entre tâches ou sous-systèmes comme par exemple les itérations et les couplages [Eppinger 2012]. Par ailleurs, les réseaux de Petri sont plus efficaces pour modéliser une logique et peuvent même être utilisés conjointement avec DSM dans ce but [Karniel 2009, Karniel 2011].

C'est cet aspect qui confère selon nous un avantage certain à DSM pour concevoir collaborativement des interventions dans un environnement complexe comme le CERN, GSI ou toute autre installation scientifique émettant des rayonnements ionisants. En effet, notre priorité est de prendre en compte la complexité générée par la collaboration dans le processus de planification et non de générer une logique pour le flux de travail.

3.4 Conclusions sur le choix des méthodes

Nous arrivons au terme de ce chapitre 3, et un bilan s'impose. Nous y avons formellement défini notre contexte collaboratif, et en avons dégagé plusieurs caractéristiques en ce qui concerne la planification d'interventions, notamment les contraintes complexes entre tâches et l'importance d'une communication efficace entre les différents acteurs qui proviennent de différents domaines et possèdent des compétences très diverses (et ne sont seulement qu'en minorité des experts en planification).

Nous avons ensuite énuméré au cours d'un historique un nombre important de méthodes de planification de projet, de modélisation de processus ainsi que de planification en intelligence artificielle. Ces dernières laissées de côté par souci de bien séparer formalisme graphique et traitement des contraintes collaboratives par l'intelligence artificielle, nous avons ensuite procédé à une analyse ontologique utilisant un modèle ontologique d'intervention ainsi que l'ontologie de Bunge, Wand et Weber comme référence. À l'issue de cette analyse, nous avons sélectionné DSM comme formalisme de représentation graphique et de planification pour nos interventions en milieux émettant des rayonnements ionisants.

Cependant, comme nous allons le voir dans le prochain chapitre, la DSM d'origine reste une représentation binaire des dépendances entre tâches, et n'est en tant que telle pas vraiment un outil collaboratif. Il est donc nécessaire d'y ajouter de l'information pour décrire le plus exactement possible les besoins des participants au processus de planification. Ce processus se doit de plus d'être dynamique (cf. 3.1) et implique la prise en compte de nouvelles contraintes et l'adaptation du plan de façon interactive à chaque ajout de tâche ou de contrainte. La présence de l'intelligence artificielle dans notre méthodologie pour traiter ces contraintes (qui sont nombreuses, puisque rappelons-le, plusieurs milliers d'interventions sont traitées par an au CERN, et chacune comporte plusieurs tâches) est donc nécessaire pour garantir ces phénomènes de propagation et favoriser la communication entre participants par l'intermédiaire d'un système de planification.

Le choix de la méthode n'a dans le cas de l'intelligence artificielle pas été aussi difficile que pour le formalisme graphique. Les algèbres temporelles qualitatives utilisant des intervalles comme base de la représentation temporelles sont des méthodes populaires pour la représentation des tâches et la gestion des contraintes (la plus référencée étant l'algèbre d'intervalles d'Allen). Elles ont de plus l'avantage de rapprocher ordonnancement et échéancement [Smith 2000] et ont déjà été utilisées pour modéliser des processus d'affaires et des flux de travail [Lu 2006, Dufour-Lussier 2012]. Notre nouvelle approche de la planification, visant à rendre collaborative l'action même de planifier, et que nous décrivons dans le chapitre suivant, est donc une fusion de l'algèbre d'intervalles d'Allen et de DSM.

La DSM collaborative, algorithmes et description

Sommaire

4.1 Traiter contraintes et couplages : combinaison de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen	91
4.1.1 L'algèbre d'intervalles d'Allen	92
4.1.2 DSM	98
4.2 Analyse du processus collaboratif de planification	103
4.2.1 Les différentes tâches envisagées	103
4.2.2 Optimisation des interventions	105
4.2.3 Prise en compte de la radioprotection	106
4.3 Fusion de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen	108
4.3.1 Structure des données	108
4.3.2 Collecte des contraintes et recherche de compromis	110
4.3.3 Construction de la DSM	116
4.3.4 Échéancement et choix des solutions	117
4.4 Bilan : processus collaboratif global et utilisation de la DSM Collaborative	119

4.1 Traiter contraintes et couplages : combinaison de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen

Nous entrons à présent dans la description de la nouvelle approche de planification collaborative que nous proposons dans cette thèse. Le chapitre 2 nous a permis de décrire notre environnement de planification en termes de risque radiologique, et le 3 s'intéressait à ses aspects collaboratifs pour effectuer le choix des méthodes utilisables dans un tel contexte.

Ce chapitre 4 a tout d'abord pour objet la description détaillée des deux méthodes qui sont utilisées dans notre approche de planification collaborative : l'algèbre d'intervalles d'Allen et DSM. Nous y décrivons ensuite le fonctionnement de notre méthode de "DSM collaborative" en suivant étape par étape le processus collaboratif de planification d'intervention. Nous analysons enfin l'utilisation qui peut en être faite pour optimiser les interventions en termes de radioprotection, notamment en

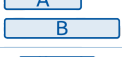
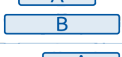
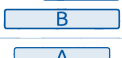
Relation	Interpretation	Gantt chart-like illustration
A b B B bi A	A takes place before B B takes place after A	
A m B B mi A	A meets B B is met by A	
A o B B oi A	A overlaps B B is overlapped by A	
A s B B si A	A starts with B B is started with A	
A d B B di A	A is during B B contains A	
A f B B fi A	A finishes with B B is finished by A	
A = B	A equals B	

Figure 4.1 – Les treize relations temporelles de l’algèbre d’intervalles d’Allen.

montrant comment la méthodologie proposée s’inscrit dans la démarche ALARA décrite au chapitre 2.

4.1.1 L’algèbre d’intervalles d’Allen

Formation de réseaux de contraintes temporelles

L’algèbre d’intervalles d’Allen est une représentation temporelle qui a été introduite au début des années 1980 par James Allen [Allen 1983a]. Cette méthode est l’une des plus populaires pour traiter les réseaux de contraintes temporelles. Les propriétés de tels réseaux ont été très étudiées dans les années 1980 et 1990, notamment concernant des problèmes de planification en intelligence artificielle. Plus récemment, leur utilisation s’est étendue à la modélisation des processus, et notamment des processus d’affaires [Lu 2006] et des flux opérationnels [Dufour-Lussier 2012].

Le principe de base de l’algèbre d’intervalles d’Allen est le suivant : le temps y est représenté comme une succession d’intervalles temporels, par contraste avec une représentation plus classique utilisant des dates ponctuelles. Il s’agit ensuite de préciser qualitativement les différentes relations temporelles liant ces intervalles à l’aide des treize relations qui forment l’algèbre afin d’établir une chronologie. Ces treize relations sont en réalité sept relations élémentaires et leurs inverses, sachant que l’égalité est sa propre inverse (cf. Figure 4.1).

Les informations fournies par ces treize relations permettent de définir ce que l’on appelle un réseau de contraintes temporelles, qui peut être résolu comme un problème de satisfaction de contraintes, ou *Constraint Satisfaction Problem (CSP)*. La solution d’un tel problème, lorsqu’elle existe, est ce qu’on appelle un ordre total des activités. Celui-ci ne contredit aucune des contraintes initiales, et correspond à un réseau de contraintes dans lequel il existe une et une seule relation temporelle

4.1. Traiter contraintes et couplages : combinaison de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen

pour toute paire d'intervalles du réseau, par opposition à un ordre partiel dans lequel on peut assigner à une même paire un nombre multiple de contraintes. Cet ordre total peut être considéré comme un processus exécutable, et dans notre cas, comme une intervention à simuler. Un CSP est défini formellement comme un triplet $N = (X, D, C)$ où :

- $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ est un ensemble de variables ;
- $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ est l'ensemble de leurs domaines respectifs ;
- $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ est l'ensemble des contraintes imposant des limitations sur les valeurs de l'une ou plusieurs d'entre elles.

Dans le cas d'un réseau de contraintes temporelles comme ceux obtenus à partir de l'algèbre d'Allen, cette définition correspond au triplet $N = (X, D, C)$ suivant :

- $X = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ est l'ensemble des n activités considérées, représentées sous forme d'intervalles temporels ;
- $D = \{(d_1, f_1), (d_2, f_2), \dots, (d_n, f_n)\}$ où (d_i, f_i) est la paire de points ordonnés dans le temps définissant le début et la fin de l'activité A_i (X et D ont donc nécessairement la même cardinalité) ;
- $C = \{C_{ij} \subseteq \{b, bi, m, mi, d, di, o, oi, s, si, f, fi, e\}\}$ représente l'ensemble des contraintes entre activités, avec $1 \leq i, j \leq n$.

Par conséquent, avant de pouvoir résoudre ce CSP, une première étape doit être réalisée dès l'initialisation du réseau de contraintes temporelles. Il s'agit de vérifier sa "consistance", c'est-à-dire de trouver l'ensemble minimal de contraintes tel qu'au moins une solution existe, ou alors de montrer la non-existence de solution. Le problème tel que présenté dans la littérature, par exemple dans [Vilain 1989, Lu 2006] est initialisé de la façon suivante : à chaque paire d'intervalles est associé un vecteur de relations temporelles. En l'absence d'information concernant une paire, il est considéré que chacune des treize relations peut être vraie et on lui associe donc le vecteur comprenant les treize relations. Ainsi, pour spécifier une relation temporelle, on réduit le nombre de relations possibles pour une paire d'intervalles. La validité des contraintes spécifiées est vérifiée à chaque nouvel ajout (que ce soit un nouvel intervalle dans le réseau ou une nouvelle contrainte sur une paire pré-existante) à l'aide d'un algorithme de propagation de contraintes. Cet algorithme, tel que décrit par Allen, est donné en Figure 4.2.

La propagation se fait en considérant une par une les nouvelles contraintes entre paires d'intervalles. Toutes les paires portant une nouvelle contrainte sont donc placées dans une file d'attente, et la propagation s'effectue tant que cette file n'est pas vide. Pour chaque paire (i, j) sortie de la file, on considère successivement chaque autre intervalle k du réseau. Si la nouvelle contrainte (i, j) entraîne une modification soit pour la paire (i, k) , soit pour la paire (k, j) , la contrainte modifiée est placée à son tour dans la file pour en tester les effets. La propagation peut cependant échouer : si la nouvelle contrainte pour la paire (i, j) entraîne un vecteur nul pour la paire (i, k) ou (k, j) , cela signifie que la nouvelle contrainte est en conflit avec les contraintes pré-existantes du réseau. Le réseau est alors dit "inconsistant", et il n'existe pas de solution pour les contraintes spécifiées. Pour poursuivre la planification, il faut alors revenir en arrière et modifier les ajouts de contraintes conflictuels, un point

Tant que (Queue non vide) :

```

Pour chaque vecteur  $\langle i, j \rangle$  dans Queue :
  Pour chaque intervalle  $k \neq j$  Comparable à  $i$  :
    Temp =  $\langle i, k \rangle \cap \text{Transitivité}(\langle i, j \rangle, \langle j, k \rangle)$ 
    Si Temp =  $\emptyset$ 
      Alors signaler conflit
    Sinon, si Temp  $\neq \langle i, k \rangle$  :
      Alors ajouter  $\langle i, k \rangle$  à Queue

  Pour chaque intervalle  $k \neq i$  Comparable à  $j$  :
    Temp =  $\langle k, j \rangle \cap \text{Transitivité}(\langle k, i \rangle, \langle i, j \rangle)$ 
    Si Temp =  $\emptyset$ 
      Alors signaler conflit
    Sinon, si Temp  $\neq \langle k, j \rangle$  :
      Alors ajouter  $\langle k, j \rangle$  à Queue

  Sortir  $\langle i, j \rangle$  de Queue

```

Figure 4.2 – Algorithme de propagation de contraintes.

qui a toute son importance dans un contexte collaboratif. Nous ne manquerons pas pas d’y revenir en détails lorsqu’il sera question de combiner l’algèbre d’intervalles d’Allen avec DSM et de travailler sur le compromis.

Cette vérification de la consistance des réseaux de contraintes temporelles ainsi que les algorithmes de propagation de contraintes ont fait l’objet de nombreuses publications (se référer par exemple à [Vilain 1989, van Beek 1989, van Beek 1990, Dechter 1991]). Il s’agit en effet d’un problème NP-complet, qui ne peut par conséquent se résoudre exactement qu’avec des algorithmes exponentiels en termes de mémoire et de temps de calcul. Ou plutôt, ce type de problème ne connaît à ce jour pas de solution de complexité polynomiale. Il existe cependant des algorithmes de complexité polynomiale permettant d’approcher la solution, et l’algorithme d’Allen en Figure 4.2 est en réalité l’un d’entre eux. Comme nous venons de le décrire, il permet la vérification de la consistance du réseau de contraintes pour des sous-réseaux de trois activités. La démonstration est faite dans que cet algorithme de propagation s’effectue avec une complexité de On^3 , où n est la taille du réseau de contraintes [Vilain 1989]. Cependant, vérifier complètement la consistance d’un réseau de contraintes temporelles ne peut se faire qu’en considérant les sous-réseaux de tailles supérieures, ce qui introduit un comportement exponentiel, avec une complexité de l’ordre de On^n .

Nous ne rentrerons pas plus avant dans les détails de ce problème, traité dans [van Beek 1989, van Beek 1990] avec des solutions approchées comme exactes. Nous sommes cependant conscient des limites de l’algèbre d’intervalles d’Allen en termes d’utilisation de mémoire et de temps. Ces limites sont cependant à modérer dans

4.1. Traiter contraintes et couplages : combinaison de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen

notre cas, comme indiqué par exemple dans [Vilain 1989]. En effet, la complexité algorithmique de cette algèbre n'en annule pas les intérêts, et des algorithmes pour trouver des solutions approchées demeurent tout à fait intéressants pour les cas suivants :

- Une utilisation pour des bases de données de taille réduite : une douzaine d'activités distinctes peut parfois être une description raisonnable pour une intervention. Des algorithmes calculant des solutions exactes peuvent même être utilisés, comme dans [Malik 1983] avec l'algorithme exponentiel *Simplex*.
- Une utilisation pour essentiellement lister les relations temporelles mais ne travailler que peu sur les inférences qui en découlent : c'est essentiellement de cette façon que nous travaillerons par la suite, car nous chercherons surtout à vérifier la validité d'un ensemble de contraintes fournies par les utilisateurs et à obtenir un réseau minimal plutôt que d'en calculer toutes les inférences résultantes. Dans ce cas, une solution approchée telle que celle d'Allen s'avère satisfaisante.
- Une utilisation restreinte de l'algèbre, avec des sous-algèbres qui sont, eux, utilisables avec des algorithmes de complexité polynomiale. Il en existe dix-huit au total [Krokhin 2003], et ils peuvent être construits par exemple comme dans [van Beek 1989], en utilisant un ensemble réduit de relations comme celles de l'algèbre de points temporels. Cette solution a cependant le défaut de considérer à nouveau des points temporels (les débuts et fins de nos intervalles temporels) mais, tout comme l'algèbre d'intervalles d'Allen, elle porte sur des informations qualitatives et donc relatives entre les activités.

Nous nous situons donc dans la seconde catégorie : avec l'utilisation d'une solution approchée pour analyser un ensemble de contraintes et en détecter les éventuelles incohérences. Et dans notre contexte de planification collaborative, la représentation de l'algèbre d'intervalles d'Allen possède de solides atouts.

Contraintes en planification collaborative

Il a déjà été question de travail collaboratif dans les chapitres précédents. Nous avons décrit la complexité intrinsèque aux collaborations, notamment en raison des diverses disciplines qui y sont présentes, de la multiplicité des rôles des différents participants, ainsi que des couplages existants entre les tâches à planifier. Et il se trouve que l'algèbre d'intervalles d'Allen s'adapte efficacement à de tels environnements. Dans [Baudin 2013a], nous avons en effet comparé son utilisation à celle de l'ensemble de contraintes traditionnel utilisé dans PDM (les contraintes de précédences généralisées ou GPRs [Elmaghraby 1995]) que l'on retrouve dans la majorité des applications logicielles utilisées aujourd'hui en planification. Il s'avère que si les deux méthodes sont en grande partie équivalentes en termes de capacités de représentation, l'algèbre d'Allen permet une description plus précise des contraintes temporelles et peut même compléter avantageusement les GPRs pour une utilisation conjointe en planification collaborative. Il faut également ajouter à cela l'atout que

représente pour le travail collaboratif la propagation de nouvelles contraintes dans un ensemble existant ainsi que la détection des conflits.

La correspondance entre les deux formalismes est facile à établir. Si l'on considère les quatre dépendances de PDM utilisées usuellement en management de projet, on constate qu'elles représentent l'union de plusieurs contraintes de l'algèbre d'Allen. Ces quatre dépendances sont :

- Fin-Début : B ne peut pas débiter avant que A ne se termine ;
- Début-Début : B ne peut pas débiter avant que A ne débute ;
- Fin-Fin : B ne peut pas se terminer avant que A ne se termine ;
- Début-Fin : B ne peut pas se terminer avant que A ne débute.

Elles peuvent être aisément traduites dans la représentation de l'algèbre d'intervalles d'Allen, comme indiqué dans le Tableau 4.1.

Contrainte PDM	Notation	Contrainte temporelle
Fin-Début	$A \text{ fd } B$	$A < b, m > B$
Début-Début	$A \text{ dd } B$	$A < b, m, o, di, s, si, fi, e > B$
Fin-Fin	$A \text{ ff } B$	$A < b, m, o, d, s, f, fi, e > B$
Début-Fin	$A \text{ df } B$	$A < b, m, mi, o, oi, d, di, s, si, f, fi, e > B$

Tableau 4.1 – Correspondance entre les dépendances de PDM et les contraintes de l'algèbre d'intervalles d'Allen.

À partir du Tableau 4.1, il est possible de remarquer rapidement qu'une conversion stricte des dépendances de PDM en contraintes de l'algèbre d'intervalles d'Allen est faisable, mais que l'inverse n'est pas entièrement possible. En effet, en combinant plusieurs de ces dépendances, il est possible de retrouver certaines des contraintes entre intervalles, comme indiqué sur la Figure 4.3. Cependant, s'il est possible de forcer la coïncidence des débuts ou de la fin de deux intervalles temporels, on constate dans les équations 4.1 et 4.2 que plusieurs contraintes de l'algèbre d'intervalles d'Allen sont conjointement obtenues. De même, la relation *during* (pendant) de l'algèbre d'intervalles d'Allen, utilisée pour exprimer qu'une tâche doit être contenue dans une autre, ne peut être obtenue dans PDM qu'en intersectant deux dépendances et ce de façon non exclusive car d'autres contraintes subsistent (voir équation 4.3).

$$A \text{ dd } B \cap B \text{ dd } A = A < s, si, e > B \quad (4.1)$$

$$A \text{ ff } B \cap B \text{ ff } A = A < f, fi, e > B \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} A \text{ ff } B \cap B \text{ dd } A &= A < d, f, e > B \\ A \text{ dd } B \cap B \text{ ff } A &= A < di, fi, e > B \end{aligned} \quad (4.3)$$

On peut également remarquer une autre propriété intéressante de l'algèbre d'intervalles d'Allen. Comme Smith et al. le présentent [Smith 2000], cette méthode

4.1. Traiter contraintes et couplages : combinaison de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen

Relations de l'algèbre d'intervalles d'Allen	Combinaisons PDM équivalentes
	
	
	
	
	

Figure 4.3 – Illustration des combinaisons de dépendances PDM permettant de retrouver les contraintes de l'algèbre d'intervalles d'Allen.

permet en effet de faire le lien entre les deux aspects de la planification mentionnés précédemment (cf. section 3.2.2), distingués dans le monde anglo-saxon par les termes *planning* et *scheduling*, et que nous avons choisi de traduire par ordonnancement et échéancement. Regrouper les deux différents types de contraintes qui en découlent (contraintes potentielles et contraintes logistiques) au sein d'un même système est essentiel pour un fonctionnement collaboratif tel que celui du CERN, qui implique simultanément des problématiques de planification et d'ordonnancement. En effet, les interventions en milieux soumis aux rayonnements ionisants y sont planifiées pendant les périodes d'arrêt des installations, qui sont soit de courts arrêts techniques soit de longues périodes de maintenance et d'amélioration. Et quelles que soient les durées de ces arrêts, il est inévitable de devoir effectuer des choix parmi les interventions à effectuer qui sont légion, car le nombre d'interventions réalisables en un arrêt est limité par le temps. Mais ce n'est pas tout : il l'est aussi par la logistique, à savoir l'espace réduit des installations souterraines, et par la disponibilité des ressources, humaines ou non.

Nous pouvons finalement indiquer que la façon dont les contraintes sont traitées dans l'algorithme de propagation cité en Figure 4.2 est particulièrement adaptée à un fonctionnement collaboratif. Elles y sont en effet considérées équitablement, quel que soit le rôle du collaborateur qui les a spécifiées et quel que soit l'ordre dans lequel elles sont entrées dans le réseau de contraintes temporelles. Bien sûr, un système de planification totalement collaboratif, sans modération ou coordination des différents acteurs, risque de tendre vers le chaos. Il semble irréaliste d'adopter cette démarche sans appliquer un certain degré de contrôle à un certain stade de la planification, en restreignant le nombre d'acteurs pouvant apporter des modifications à un plan. On peut également anticiper un besoin de compromis : lors du processus de planification

collaborative, des contraintes conflictuelles peuvent être entrées dans le réseau. En revanche, le traitement totalement équitable des contraintes par l'algorithme de propagation permet à chaque collaborateur d'exprimer exactement ses besoins et ses possibilités avec l'assurance qu'ils seront pris en compte dans le système dès les premiers stades de la planification.

En résumé, il est possible d'utiliser les systèmes de contraintes habituellement rencontrés en planification d'intelligence artificielle à des fins de planification de processus ou de projet. Le plus connu d'entre eux, l'algèbre d'intervalles d'Allen permet de compléter avantageusement le jeu de dépendances de PDM (les relations de précédences généralisées) très utilisé en management de projet, en favorisant un fonctionnement collaboratif et en faisant le lien entre la planification et l'ordonnancement [Smith 2000]. Il existe bien entendu d'autres systèmes de contraintes utilisés en intelligence artificielle comme l'algèbre de points temporels [Vilain 1989] ou bien, plus orientés vers l'échéancement que vers l'ordonnancement, la représentation STRIPS et ses successeurs, ou encore les diagrammes d'état. La popularité de l'algèbre d'intervalles d'Allen et l'importante littérature y faisant référence et décrivant les algorithmes utilisés en font cependant le candidat idéal pour une application à la planification collaborative d'interventions, sans compter la proximité dont elle fait preuve vis-à-vis des dépendances utilisées dans PDM comme nous avons pu le constater dans cette section. Nous allons maintenant décrire plus en détail DSM, la méthode de modélisation d'intervention que nous avons choisi d'utiliser et dans laquelle nous allons insérer les informations fournies par l'algèbre d'intervalles d'Allen.

4.1.2 DSM

Une méthode compacte pour modéliser les processus

The Design Structure Matrix, usuellement abrégée en DSM, est une méthode matricielle de modélisation de systèmes complexes. Elle est également utilisée en tant que *DSM d'activités* pour représenter des séquences de tâches qui composent des procédés et des projets. Elle a été introduite en 1983 par Donald Steward [Steward 1981], mais il faut attendre les années 1990 et notamment les travaux de Steven Eppinger (entre autres) pour en trouver de nombreuses utilisations par exemple pour modéliser des processus de conception [Gebala 1991, Eppinger 1997, Browning 1998, Ulrich 2003, Eppinger 2012]. En ce qui concerne ce travail de thèse et afin d'éviter toute ambiguïté et lourdeur de langage, nous allons par la suite uniquement nous intéresser à la DSM d'activités, utilisée à des fins de modélisation et de planification de processus et de projets.

En plus de sa compacité de représentation due à l'utilisation de matrices, la force principale de DSM est la façon dont elle permet de traiter les dépendances entre tâches ou sous-ensembles de tâches, et notamment les co-dépendances (ou couplages), avec introduction de boucles. Pour bien présenter cette caractéristique, il suffit de décrire la méthode DSM elle-même. Une DSM est donc une matrice

4.1. Traiter contraintes et couplages : combinaison de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen

carrée, dans laquelle chaque ligne et chaque colonne représente une des activités du processus ou du projet modélisé. Par la suite, elle sera notée A , et l'élément a_{ij} représentera l'élément matriciel sur la $j^{\text{ème}}$ colonne de la $i^{\text{ème}}$ ligne. Il s'agit d'une matrice binaire, telle que :

- un élément a_{ij} vide ou égal à zéro indique l'absence de dépendance entre deux tâches i et j ;
- un élément a_{ij} non nul indique un lien de dépendance en termes de flux d'information ou de ressources entre deux tâches i et j . Pour une DSM binaire de base on entend par élément non nul un "X" appelé "marque", ou encore un chiffre 1. Il existe d'autres types de DSM (par exemple des DSM numériques ou paramétrées) pouvant utiliser différentes valeurs pour une marque.

Il est important de préciser la convention utilisée dans la DSM. Nous allons durant toute la suite de ce travail utiliser la convention Input-on-Columns-Output-on-Rows (IOC-OOR). Cela indique que tout élément non nul situé sur la ligne d'une activité i représente une activité dont l'accomplissement préalable est nécessaire, donc une donnée. Réciproquement, les éléments non nuls situés sur la colonne de i représentent les activités qui nécessitent d'avoir obtenu le résultat de i avant de pouvoir être effectuées. Ainsi, si l'on considère la séquence d'activités en lisant la matrice de haut en bas et de gauche à droite, on peut remarquer que toute marque située sous la diagonale indique une situation de dépendance simple, avec un flux d'information en accord avec la séquence d'activités. En revanche, toute marque située au-dessus de la diagonale indique un retour d'information vers une tâche antérieure, voire un couplage ou une boucle dans les cas où les deux tâches se fournissent mutuellement de l'information. La Figure 4.4 représente les différentes relations possibles entre deux activités dans une DSM.

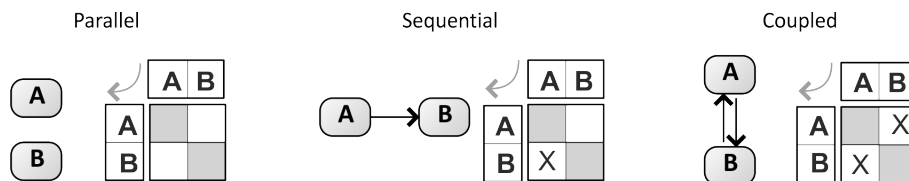


Figure 4.4 – Les différentes dépendances entre tâches dans DSM.

Une fois une DSM initialisée, c'est-à-dire une fois que les éléments a_{ij} non nuls ont tous été spécifiés, l'objectif de la résolution d'une DSM est d'éliminer autant que possible les marques au-dessus de la diagonale en optimisant la séquence d'activités afin d'obtenir une matrice par blocs triangulaire inférieure. En cas de boucles, il est impossible d'obtenir ce résultat, et un nombre minimal de marques demeure au-dessus de la diagonale, si possible à proximité de celle-ci.

Il faut noter que la convention inverse, qui est appelée en anglais Input-on-Rows-Output-on-Columns (IOR-OOC), est également occasionnellement utilisée. C'est le cas par exemple du site de la communauté de DSM [Lindemann 2009]. Cela aboutit à une transposition sans conséquence sur les algorithmes utilisés. L'objectif est alors

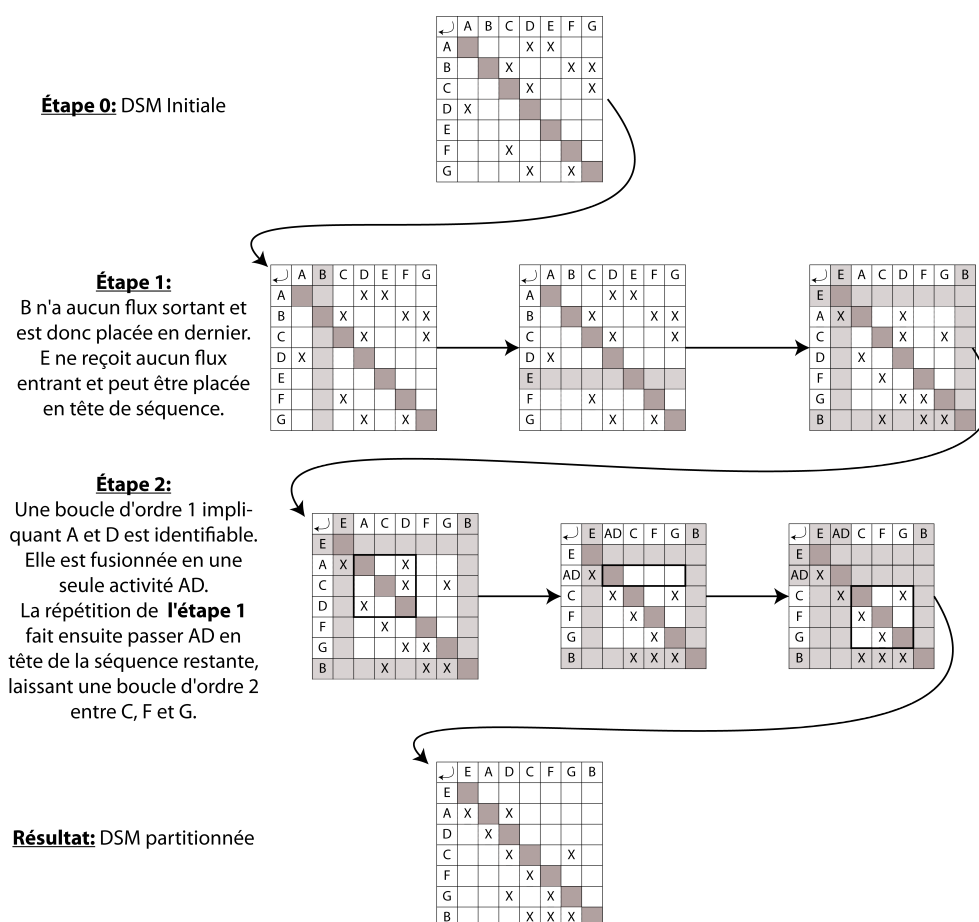


Figure 4.5 – Exemple de séquençage d'une DSM comprenant 7 activités.

d'obtenir une matrice par blocs triangulaire supérieure, où l'on cherchera à minimiser le nombre de marques en dessous de la diagonale.

Les algorithmes de DSM

L'algorithme utilisé pour obtenir une matrice par blocs triangulaire inférieure est appelé séquençage. Il s'agit d'un algorithme récursif, qui s'effectue en deux étapes comme indiqué sur la Figure 4.5.

- Étape 1 : placer les activités sans flux entrant en tête de séquence et celles sans flux sortant à la fin. Elles ne sont plus considérées par la suite.
- Étape 2 : identifier parmi les activités restantes une boucle s'il en existe, et fusionner les activités concernées.
- Appel récursif : répéter l'algorithme sur la matrice ainsi obtenue.

Le second algorithme principal de DSM est appelé *tearing* et s'applique si le séquençage n'a pas permis d'éliminer toutes les marques au-dessus de la diagonale, c'est-à-dire qu'il subsiste dans l'intervention un retour d'information pouvant en-

4.1. Traiter contraintes et couplages : combinaison de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen

traîner une boucle (et donc la répétition de tâches). Il n'existe pas de méthode précisément définie pour effectuer le *tearing*, qui consiste en réalité à effectuer une supposition afin d'établir l'ordre dans lequel les activités présentes au sein d'une même boucle vont être effectuées [Steward 1981]. Idéalement, un *tearing* performant doit fournir un nombre minimal d'itérations et donc une durée optimisée pour le projet ou processus modélisé.

Le choix des marques sur lesquelles effectuer prioritairement le *tearing* est crucial. Il s'effectue selon deux méthodes principales : en utilisant des diagrammes dits de *shunt* ou des heuristiques relativement simples [Steward 1981, Gebala 1991], dont l'objectif est de sélectionner les marques qui, une fois supprimées de la boucle considérée, permettent d'obtenir une matrice triangulaire inférieure. Les diagrammes de *shunt* consistent à identifier la boucle la plus longue possible (appelée circuit principal) ainsi que les boucles de dimensions inférieures s'il y a imbrication (ces boucles sont désignées en anglais par le terme *shunt*, que l'on peut ici traduire par court-circuit et donnent donc leur nom au diagramme). Il faut ensuite sélectionner les marques ayant l'impact le plus large sur le circuit principal, de façon à ce qu'aucune des boucles secondaires ne permette à celui-ci de se "reconnecter" après la suppression en effectuant un court-circuit sur la marque choisie.

Les heuristiques utilisées sont quant à elles très basiques : elles préconisent de planifier en priorité les activités bénéficiant du plus petit nombre de marques entrantes (sur la colonne). En cas d'égalité, il est conseillé à l'utilisateur de se tourner vers celle ayant le plus de marques sur sa ligne (un maximum d'informations sortantes). En cas de nouvelle indécision, il est préconisé de choisir la tâche possédant le plus d'étapes nécessaires pour parcourir la totalité de la boucle.

Ce choix, en pratique, doit porter sur les activités dont les variables sont bien connues et facilement anticipées, afin de minimiser la quantité de travail à refaire en cas de boucle. Une autre possibilité est de choisir les tâches pour lesquelles une erreur d'estimation sur une ou plusieurs variables n'aura que peu d'impact sur celles qu'elles précèdent. Une fois le choix de la marque effectué, l'algorithme comporte trois étapes :

- la marque choisie est supprimée de la boucle dans laquelle elle se trouve ;
- la boucle est réorganisée à l'aide d'un algorithme similaire au séquençage ;
- la marque est rétablie entre les deux activités qu'elle concerne.

Il faut cependant bien remarquer encore une fois que le *tearing* n'est pas une solution parfaite et absolue pour éliminer ou, à défaut, minimiser les itérations. Il s'agit d'effectuer une estimation de la valeur que va prendre une ou plusieurs variables après l'exécution d'une tâche afin que son utilisation dans les tâches suivantes produise une répétition minimale du travail en cas de boucle. Bien choisir son approximation ou son estimation implique donc une bonne connaissance de la structure et du contexte du processus ou du système modélisé. Il existe dans cette étape de *tearing* une certaine subjectivité à laquelle il n'est pas possible de se soustraire.

Les autres DSM

Tous les algorithmes décrits précédemment concernent la DSM la plus classique, à savoir la DSM binaire. Cependant, il faut reconnaître que si la DSM dans sa forme binaire est très efficace pour indiquer les dépendances, même complexes et comprenant des boucles et des interdépendances, elle manque d'expressivité pour décrire ces dépendances comme l'a souligné notre étude ontologique. Pour pallier ce déficit, il existe différents types de DSM qui permettent d'inclure une quantité d'information plus importante sur les relations entre activités. C'est le cas des DSM numériques et des DSM paramétrées.

Il est possible de remplacer la marque de la DSM binaire par une information chiffrée, qualitative ou quantitative. La DSM numérique prend ainsi en compte plusieurs niveaux de dépendance, numérotés par des entiers. Il est ensuite possible d'effectuer plusieurs simulations en imposant une valeur seuil au-dessus de laquelle la marque est conservée pour le traitement de la DSM et en dessous de laquelle elle ne sera pas prise en compte. Ceci nous permet de simuler plusieurs cas en choisissant les dépendances que l'on conserve avant d'effectuer les calculs décrits précédemment pour la DSM binaire. Cette méthode dite *importance rating* (que l'on pourrait traduire comme évaluation des dépendances), utilise une échelle d'évaluation qualitative de la force des dépendances, allant de 1 (forte) à 3 (faible). On aboutit à trois simulations différentes sur la DSM :

- seules les dépendances fortes de niveau 1 sont conservées ;
- seules les dépendances fortes et moyennes (1 et 2) sont conservées ;
- toutes les dépendances sont prises en compte.

Steward suggère, quant à lui, une échelle de “nombres de niveaux”, allant de 1 à 9 et indiquant l'ordre dans lequel les marques au-dessus de la diagonale doivent être soumises à l'algorithme de *tearing* décrit ci-dessus [Steward 1981]. Il s'agit de la méthode des *level numbers*, que l'on peut traduire par “méthode des niveaux”. Dans un premier temps, les marques ayant le nombre le plus haut sont supprimées, avant que la DSM soit réorganisée par séquençage. On effectue ensuite la même procédure pour les chiffres inférieurs jusqu'à se débarrasser de tout retour d'information ou de toute boucle.

D'autres utilisations d'une DSM numérique sont par exemple listées sur le site de la communauté DSM [Lindemann 2009]. Elles sont souvent spécifiques au problème considéré et aux méthodes d'analyse choisies. Elles se basent par exemple sur :

- la **force de la dépendance** : même principe que les méthodes précédentes, avec un indice variant de 0 à 1 ;
- le **volume d'information transféré** en bits ;
- la **variabilité de l'information échangée** : typiquement, la variance de l'information désirée récupérée d'expériences précédentes identiques ;
- la **probabilité de répétition** d'une tâche entraînée par l'accomplissement de celle dont elle dépend, une marque sous la diagonale pouvant être considérée comme de second ordre en cas de bouclage ;

4.2. Analyse du processus collaboratif de planification

- l'**impact d'une activité** représentant la fraction du travail effectué dans une tâche devant être répété en cas de retour sur celle-ci.

Dans tous ces cas, l'utilisateur de la DSM numérique vise à optimiser la durée globale du projet modélisé en minimisant la quantité d'information au-dessus de la diagonale, qu'il s'agisse du volume d'information, de la probabilité de répétition de certaines tâches ou de la proportion de travail à effectuer à nouveau en présence de boucles.

D'autres types d'informations peuvent enfin être inclus dans une DSM, qui sera alors dite paramétrée [Baudin 2012, Bonnal 2012]. Il peut s'agir d'informations représentées par des quantités chiffrées (par exemple un délai d'attente entre deux tâches), mais également tout type de notation souhaité par l'utilisateur, ce qui confère à DSM une importante flexibilité. Et c'est dans ce second cas que nous allons travailler par la suite, en utilisant les notations de l'algèbre d'intervalles d'Allen dans une DSM paramétrée. De même, il serait tout à fait possible de traiter la matrice des précédences de la méthode PDM comme une DSM paramétrée, car que ce soit pour PDM ou l'algèbre d'intervalles d'Allen, une étape de séquençage de DSM binaire reste toutefois nécessaire pour pouvoir effectuer les calculs d'optimisation. L'information supplémentaire est en revanche utilisée au moment d'extraire la solution optimisée pour la représenter par exemple sous forme de diagramme de Gantt.

4.2 Analyse du processus collaboratif de planification

Maintenant que nous avons décrit en détail l'algèbre d'intervalles d'Allen et la DSM, nous allons décrire comment leur fusion permet de proposer une méthodologie de planification particulièrement adaptée au travail collaboratif. Pour cela, nous allons dans un premier temps consacrer cette section à la description des tâches et besoins précis des collaborateurs durant le processus collaboratif de planification. Ensuite, dans la section suivante, nous suivrons de nouveau ce processus en considérant les structures de données et les algorithmes afin de montrer comment notre méthodologie répond aux différents besoins identifiés.

La méthode de planification présentée dans cette fin de chapitre 4 a été publiée à plusieurs reprises au cours de son développement durant le travail de thèse :

- au sein de la communauté académique travaillant sur DSM et ses applications [Baudin 2012, Baudin 2014] ;
- dans le cadre de l'ingénierie des systèmes appliquée à la télé-robotique dans les installations scientifiques complexes [Baudin 2013b] ;
- dans le domaine du management de projet [Baudin 2013a].

4.2.1 Les différentes tâches envisagées

Nous allons ici prendre comme contexte la planification d'interventions au CERN. Le cycle de vie d'une intervention est illustré en Figure 4.6 et décrit les différentes étapes principales rencontrées, de la naissance du projet d'intervention à sa clôture.

Ces différentes phases sont :

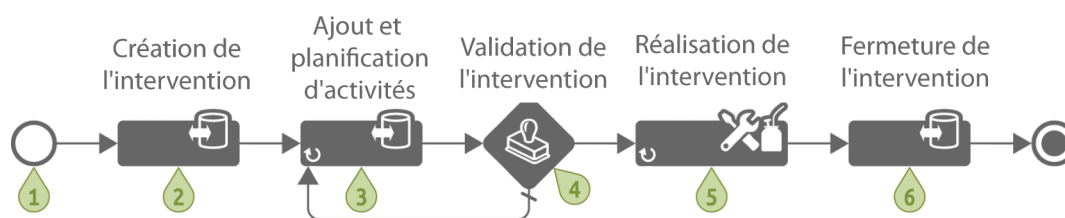


Figure 4.6 – Illustration du processus de planification d'intervention.

- 1) l'initialisation du projet d'intervention, pendant laquelle ses objectifs sont définis ;
- 2) la création de l'intervention dans la base de données du système de planification ;
- 3) l'ajout des tâches nécessaires (voire d'autres interventions) pour atteindre les divers objectifs, ainsi que des contraintes et des liens entre elles ;
- 4) la validation par les coordinateurs du système de planification et les agents de radioprotection, ainsi que l'établissement de dates fixes et d'autorisations d'accès ;
- 5) la réalisation effective de l'intervention ;
- 6) la clôture de l'intervention, avec en particulier les retours d'information et d'expérience pour la radioprotection.

Le processus collaboratif de planification concerne les phases 3 et 4. En effet, c'est en listant les différentes tâches et leurs dépendances qu'il est possible d'identifier les ressources qui seront impliquées, et d'estimer les durées et les doses de radiations reçues. Comme illustré en Figure 4.6, l'étape de validation (4) peut entraîner une révision du plan obtenu en phase 3 en cas d'absence de consensus sur les contraintes soumises par les utilisateurs ou si le scénario n'est pas suffisamment optimisé en termes de radioprotection.

Pendant, l'essentiel des interactions collaboratives auxquelles nous nous intéressons se déroulent durant la soumission des tâches et des contraintes, avant qu'un effort de modération et de validation ne soit effectué. C'est donc à cette phase 3 que nous allons consacrer notre attention, avec pour objectif d'obtenir une séquence d'activités (également appelée squelette) pour l'intervention en cours de planification.

Pour cela, nous pouvons envisager plusieurs actions possibles de la part des participants à la planification :

- l'ajout d'une nouvelle tâche ;
- l'ajout d'une nouvelle contrainte temporelle entre deux tâches ;
- l'acceptation ou le refus d'un compromis en cas de contraintes conflictuelles ;
- la communication avec d'autres acteurs : demande d'ajout de tâche, échange à propos d'un conflit de contraintes ;
- la communication avec les coordinateurs du système (pour validation ou en cas de conflit non résolu) ;

4.2. Analyse du processus collaboratif de planification

- la communication avec les agents de radioprotection.

Cette liste est non exhaustive, car il est possible d’imaginer un nombre important d’interactions entre les différents participants. Cependant, les trois premiers éléments de cette liste (ajout de tâche, ajout de contrainte et validation de compromis) forment les trois piliers d’un système automatisé sur lequel l’humain conserve malgré tout un certain contrôle. En effet, l’ajout de tâches et de contraintes est manuel (même si certaines simplifications peuvent être effectuées pour les tâches répétitives). Et certes, les éventuels compromis sont proposés par le système de planification à partir de calculs basés sur l’algèbre d’intervalles d’Allen, mais les décisions d’acceptation ou de rejet reviennent aux participants. Le formalisme de calcul doit servir de base commune pour une communication entre collaborateurs afin d’obtenir une, voire plusieurs séquences d’activités réalisables.

4.2.2 Optimisation des interventions

Cette séquence doit, dans la mesure du possible, être optimisée. La question à laquelle nous devons répondre est donc : quelles grandeurs optimiser ? Cette question a de l’importance, car sa réponse définit quelles sont les données que nous devons attacher aux activités dans la DSM. En effet, même une DSM binaire est systématiquement accompagnée de méta-données, notamment concernant les durées des activités, afin de pouvoir simuler au moins la durée du chemin critique.

Dans notre cas, les informations temporelles sont également indispensables, même si une grande précision n’est pas nécessaire. En effet, dans un premier temps, l’objectif est de construire un squelette pour l’intervention en cours de planification sans nécessairement se soucier de durées ou de dates exactes. Celles-ci peuvent être fixées de façon définitive lors de la validation de l’intervention par les coordinateurs, notamment lorsqu’il s’agit de donner les autorisations d’accès aux intervenants. En effet, l’optimisation en termes de durée va se faire essentiellement suivant deux axes : la comparaison de plusieurs scénarii comprenant différents jeux de contraintes et l’optimisation des tâches elles-mêmes. Sachant que nous travaillons ici à un niveau de planification élevé, nous nous intéressons au premier axe. Nous avons malgré tout besoin de quelques informations supplémentaires pour procéder à de l’optimisation temporelle des jeux de contraintes.

Car de même, certaines précisions peuvent être nécessaires lorsque les participants souhaitent définir clairement leurs contraintes, notamment lorsqu’il s’agit de spécifier des délais d’attente. En effet, du point de vue d’une DSM binaire, onze des treize contraintes de l’algèbre d’Allen aboutissent à un couplage des activités (cf. Tableau 4.2), ne serait-ce que pour assurer leur proximité au sein du plan final (on pense dans ce cas à l’enchaînement direct de deux tâches avec la relation “*meets*”). Par exemple, une contrainte “*before*” peut être accompagnée d’une demande de délai spécifique entre les tâches. Autrement, des valeurs par défaut peuvent être adoptées à des fins de simulations. Elles pourront ensuite être affinées au cours de la planification, ou pour de futures interventions suite à un retour d’expérience. Pour cela, des grandeurs que nous appellerons τ et δ peuvent être introduites pour traiter des

Relation	Interpretation	Gantt chart-like illustration		
A b B B bi A	A takes place before B B takes place after A		X	
A m B B mi A	A meets B B is met by A			X
A o B B oi A	A overlaps B B is overlapped by A			X
A s B B si A	A starts B B is started by A			X
A d B B di A	A is during B B contains A			X
A f B B fi A	A finishes B B is finished by A			X
A=B	A equals B			X

Tableau 4.2 – Correspondance entre algèbre d’intervalles d’Allen et DSM Binaire.

grandeurs quantitatives plutôt que qualitative si besoin est. De possibles valeurs par défaut sont données dans le Tableau 4.3.

4.2.3 Prise en compte de la radioprotection

Pour ce qui est de la radioprotection, il y a plusieurs façons d’inclure les données dans le modèle et de procéder à l’optimisation de l’intervention vis-à-vis des doses reçues. La première, et à la fois la plus simple, est d’attacher ces données directement à une activité, en effectuant sa simulation et en indiquant une dose globale qu’elle distribuera automatiquement à ses participants. Cette simulation se fait comme indiqué à la fin du chapitre 2 et en particulier dans la section 2.4, en se basant sur des simulations Monte Carlo effectuées avec le code de calcul FLUKA. Des applications logicielles (la plupart expérimentales) permettent de dessiner les trajectoires empruntées par les équipes d’intervention ainsi que les emplacements où elles passeront du temps pour travailler. En plus de permettre une estimation globale pour une tâche, ce type de simulation permet une optimisation spécifique de la dose reçue en améliorant les trajectoires et les procédures d’intervention en fonction des géométries des localisations d’intervention [Fabry 2013, Fabry 2014]. Pour ces raisons, elle est particulièrement adaptée aux situations dynamiques, notamment lorsqu’il s’agit de traverser des zones radioactives ou de se déplacer entre plusieurs stations de travail.

La seconde méthode est dépendante des informations temporelles décrites précédemment et s’applique en particulier aux situations statiques, lorsqu’une équipe d’intervention travaille à un emplacement donné ou se retrouve en attente durant un délai. Les données utilisées peuvent être de tous types : mesure manuelle, mesure automatisée ou simulation FLUKA du débit de dose en un emplacement donné.

4.2. Analyse du processus collaboratif de planification

Relation	Delays	Gantt chart-like illustration
A b B B bi A	$\tau > 1.0$ $\delta < -1.0$	
A m B B mi A	$\tau = \delta = 1.0$	
A o B B oi A	$0 < \tau < 1.0$ $-1.0 < \delta < 0.0$	
A s B B si A	$\tau = 0.0$ $-1.0 < \delta < 0.0$	
A d B B di A	$-1.0 < \tau < 0.0$ $-1.0 < \delta < 0.0$	
A f B B fi A	$-1.0 < \tau < 0.0$ $\delta = 0.0$	
A e B	$\tau = \delta = 0.0$	

Tableau 4.3 – Exemple de conversion de la notation de l’algèbre d’intervalles d’Allen à une notation quantitative équivalente utilisant deux indices τ et δ .

Associé à une estimation de la durée passée à cet emplacement, le débit de dose permet d’obtenir une dose équivalente ou une dose efficace.

Du point de vue de la planification, l’optimisation de la dose reçue passe par une optimisation des doses individuelles et de leur somme, la dose collective. L’optimisation des doses individuelles passe par trois mécanismes :

- l’optimisation des tâches elles-mêmes comme nous venons de l’aborder, ce qui relève d’une granularité très fine et n’est pas considéré dans notre méthode qui est au niveau de l’intervention dans sa totalité ;
- un enchaînement de tâches optimal, avec le moins d’attente possible dans des zones radioactives : en cas de tâches successives, l’idéal est de les enchaîner sans délai (contrainte “*meets*”) ;
- la comparaison de plusieurs scénarii (dans la mesure du possible) : par exemple, le trajet le plus court n’est pas nécessairement celui comportant les débits de doses les plus bas, il peut parfois être utile de déplacer des équipements avant de travailler dessus plutôt que de rester dans une zone plus activée, etc.

En ce qui concerne la dose collective, l’optimisation passe par des doses individuelles optimisées dans la mesure du possible ainsi que par l’optimum temporel pour un scénario donné, avec les contraintes temporelles permettant un meilleur recouvrement des tâches lorsque des activités parallèles sont possibles tout en évitant les conflits. Autrement dit, une dose individuelle optimale peut être liée à un scénario qui ne correspond pas à l’optimum temporel, mais une fois ce scénario choisi, une durée optimale permet d’obtenir la plus faible dose collective.

4.3 Fusion de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen

Nous avons décrit les différentes étapes du cycle de vie d'une intervention ainsi que les besoins concrets rencontrés lors des phases collaboratives de la planification. À présent, il nous faut détailler comment l'utilisation combinée de l'algèbre d'intervalles d'Allen avec la DSM permet de répondre à chacune des demandes formulées précédemment, ainsi que de procéder à l'optimisation des interventions selon les deux axes que sont le temps et les doses de radiations reçues.

4.3.1 Structure des données

Avant même de nous soucier d'optimisation, nous allons donc décrire la structure de données utilisée pour mettre en œuvre notre méthodologie de planification collaborative. Cette structure est illustrée en Figure 4.7, dans ce qui représente un pseudo diagramme des classes utilisées dans notre application test, ainsi que leurs principaux attributs (nous y retrouvons par exemple les diverses informations temporelles et de débits de dose précédemment mentionnées). Cette structure nous permet de définir précisément les liens entre les différents éléments de notre système de planification tel que défini ontologiquement dans le chapitre précédent.

Une intervention (1) est créée et gérée par un unique utilisateur (2) possédant l'un des différents rôles définis en section 3.1.1 (3) : surintendant de zone, chef d'équipe d'intervention, chef d'équipe logistique, expert en radioprotection, expert en sécurité ou coordinateur. Ceci n'empêche cependant pas les autres utilisateurs impliqués d'intervenir dans la planification de l'intervention en y ajoutant leurs activités. Un utilisateur peut gérer plusieurs interventions (4). Chaque opération effectuée sur une intervention est enregistrée dans un système d'historique (le “log”, en anglais) (5). Chaque intervention possède son propre historique (6).

Une intervention comporte en général plusieurs activités (7). Une fois définie, une activité appartient à une seule intervention (8). Cependant, une même intervention peut être répétée au cours du temps s'il s'agit d'une opération effectuée régulièrement. Comme pour les interventions, les activités possèdent leur propre historique afin de conserver une trace de chaque opération les concernant (9). Chaque activité est gérée par un utilisateur, qui possède l'un des rôles définis précédemment en (3). Bien entendu, un même utilisateur peut gérer plusieurs activités (11).

En ce qui concerne les ressources de type “infrastructures”, une activité peut concerner un ou plusieurs équipements (12), et réciproquement, un même équipement peut être concerné par plusieurs activités (13). Chaque équipement est situé dans une unique zone (14) qui peut en revanche contenir plusieurs équipements différents (15). De même, chaque équipement est sous la responsabilité d'une unique équipe d'intervention, qui peut quant à elle être responsable de plusieurs équipements (16 et 17).

Dans une installation donnée, une zone est forcément adjacente à une, voire plusieurs autres (18). Une zone est placée sous la supervision d'un surintendant de zone (19), qui peut quant à lui être responsable de plusieurs zones (20). Les activités

4.3. Fusion de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen

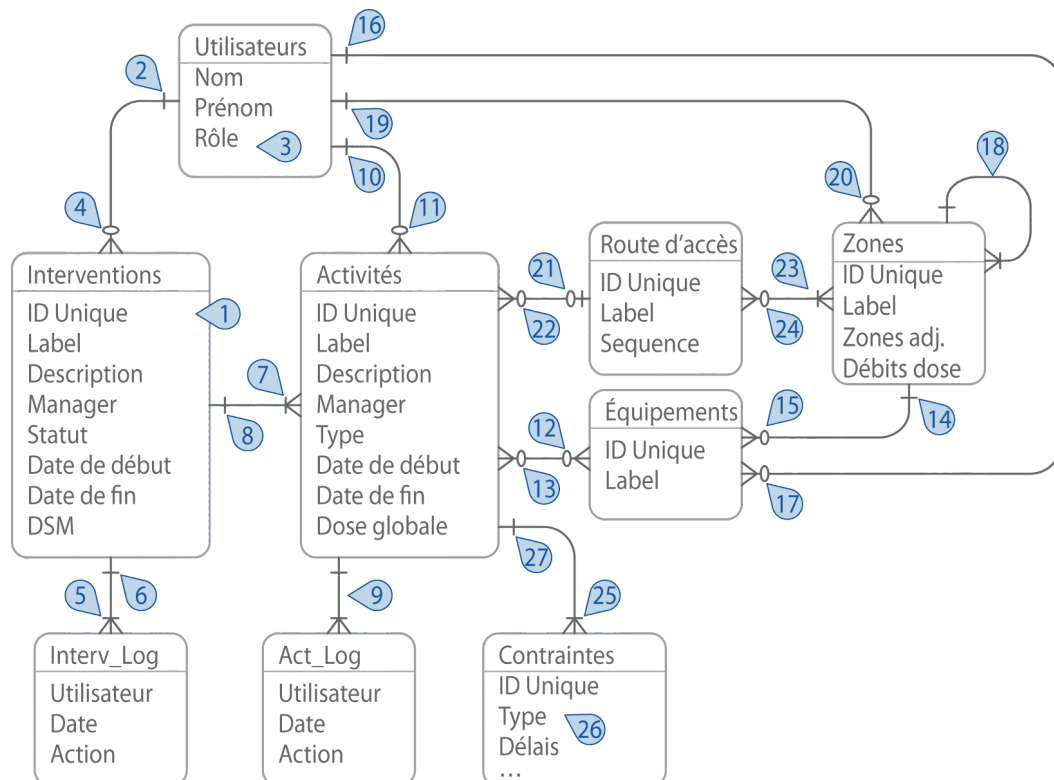


Figure 4.7 – Structure de données utilisée pour planifier des interventions collaborativement à l’aide d’une application test, codée en langage Python.

peuvent être associées à un chemin d'accès (21) qui correspond à une succession de zones (23). C'est typiquement le cas des activités dynamiques (logistiques et inspections). Dans le cas d'une activité statique, la zone est simplement celle de l'équipement sur laquelle l'équipe d'intervention va travailler. Un chemin d'accès peut être utilisé pour plusieurs activités (22), et une zone peut apparaître dans plusieurs chemins d'accès différents (24).

Pour conclure, les activités sont reliées par des contraintes, représentées par des vecteurs contenant des éléments de l'algèbre d'intervalles d'Allen (25). Une contrainte peut être de deux types : potentielle ou logistique (26). Une contrainte est associée à une paire d'activités donnée (27). Les contraintes entre les tâches d'une même intervention sont listées dans la DSM de cette intervention.

La figure 4.7 ne représente pas l'intégralité des éléments présents dans notre modèle de données mais en donne la structure générale et les rouages essentiels. Nous allons maintenant décrire le fonctionnement de la DSM collaborative au cours de la phase d'ajout des activités et des contraintes (phase 3 de notre section précédente) à l'aide d'un exemple simple.

4.3.2 Collecte des contraintes et recherche de compromis

Collecte des contraintes et détection des conflits

Considérons une intervention fictive consistant à remplacer un instrument placé dans la ligne de faisceau d'un accélérateur de particules (par exemple un collimateur). Trois acteurs sont impliqués dans la planification de sept tâches à accomplir, à savoir un responsable de l'équipement à remplacer, un intervenant pour remplacer le bloc de contrôle de cet instrument, et le groupe en charge des connexions électriques. Par la suite, nous les noterons respectivement *I*, *C*, et *E*. Les activités à effectuer sont :

- 1a Débrancher les câbles de l'instrument à remplacer ;
- 1b Débrancher les câbles du bloc de contrôle associé ;
- 4a Rebrancher les câbles de l'instrument remplacé ;
- 4b Rebrancher les câbles du bloc de contrôle ;
- 2 Remplacer l'instrument ;
- 3 Remplacer le bloc de contrôle ;
- 5 Tester l'installation.

Pour cet exemple simple, la procédure de collecte des activités et des contraintes est rapide : le responsable de l'instrument à remplacer fait une demande d'intervention et crée la tâche 2. Il contacte alors les deux autres participants concernés (*C* et *E*). Le participant *C* crée alors sa tâche 3 de remplacement du bloc de contrôle, en indiquant qu'elle peut être effectuée après le remplacement de l'instrument. Il indique également qu'un test de l'installation (tâche 5) sera nécessaire, et qu'il serait idéal de l'effectuer dans la foulée pour minimiser les trajets et les doses de radiations. Le participant *E* ajoute alors également ses quatre tâches de déconnexion et

4.3. Fusion de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen



	0	2	3	5	1a	1b	4a	4b
0								
2	m b				m b			
3		b				m b		
5			m				m b	m b
1a	m b							
1b	m b				m			
4a		m b						
4b			m b				m	

Figure 4.8 – DSM obtenue après l'ajout des sept tâches de l'intervention “remplacement d'instrument sur la ligne de faisceau” ainsi que des contraintes temporelles correspondantes.

de reconnexion des câbles d'alimentation ainsi que leurs relations avec les tâches préalablement entrées. La DSM obtenue est donnée en Figure 4.8.

Les contraintes temporelles entre tâches sont entrées sous forme de vecteurs contenant une ou plusieurs contraintes de l'algèbre d'intervalles d'Allen. Comme nous pouvons le constater dans la Figure 4.8, la large majorité des contraintes (surtout pour un scénario simple comme celui que nous utilisons) correspond à la relation “fin - début” de PDM. Une contrainte également très courante résultant de l'utilisation de ressources limitées est le vecteur $\langle b, bi, m, mi \rangle$ signifiant que les deux tâches concernées doivent impérativement être distinctes. Cependant, certaines situations nécessitent des contraintes plus élaborées. C'est le cas de la planification de tâches se recouvrant ou devant se dérouler de façon synchronisée : certaines interventions de maintenance corrective peuvent par exemple être rajoutées *in extremis* au cours de la planification, quitte à les coupler avec les inspections de radioprotection.

Chaque nouvelle contrainte temporelle est donc ajoutée dans la DSM de l'intervention, et en termes de calculs, cela revient à la propager dans le réseau de contraintes déjà existantes, comme expliqué précédemment dans ce chapitre (cf. section 4.1.1). Nous utilisons dans notre application test l'algorithme de propagation proposé par James Allen dans sa publication originale sur l'algèbre d'intervalles [Allen 1983a]. Cet algorithme se contente de trouver une solution approchée à la résolution du réseau de contraintes temporelles. Pour cela, il vérifie la cohérence du réseau obtenu avec la nouvelle contrainte en testant tous les sous-réseaux de trois activités où celle-ci apparaît à l'aide des règles de transitivité. Il est également possible de considérer des réseaux d'ordres supérieurs, comme proposé par exemple dans [van Beek 1989, van Beek 1990]. Mais comme nous allons prochainement le constater, notre méthode ne recherche pas une solution exacte à tout prix, et l'approche d'Allen s'avère largement suffisante pour notre application.

En effet, l'utilisation principale que nous faisons de cette propagation est la détection des conflits. En pratique, la propagation d'un vecteur de contrainte dans le réseau résulte en la suppression des contraintes qui n'appartiennent pas à une solution, qu'elles soient dans la nouvelle contrainte ajoutée ou dans les contraintes pré-existantes. Pour rappel, une solution au problème de satisfaction de contraintes est un réseau dans lequel chaque paire d'activités est reliée par une et une seule contrainte (un singleton). Si à un moment de la propagation un vecteur nul est obtenu, cela signifie que l'on a détecté un conflit et qu'aucune solution n'existe compte tenu des contraintes fournies. L'étape suivante est donc de tenter de le résoudre par un compromis.

Recherche de compromis par relâchement des contraintes

Un conflit étant détecté lorsqu'un des vecteurs de contraintes du réseau est vide, l'objectif de la recherche de compromis est de proposer aux utilisateurs de nouvelles contraintes pour ce vecteur. Il faut pour cela que ces nouvelles contraintes proposées respectent l'agencement global de celles qui ont été proposées initialement par les participants, tout en étant plus flexibles afin d'essayer de s'accorder également avec les contraintes ayant provoqué le conflit.

La méthode que nous présentons ici consiste à relâcher les contraintes les plus strictes. Remarquons toutefois que le relâchement des contraintes n'est qu'une technique parmi d'autres pour chercher à résoudre des conflits, et qu'il est également parfois possible d'effectuer l'opération inverse en fixant la position d'une activité plutôt qu'en rajoutant un délai (ce qui produit un emploi du temps moins flexible et plus risqué à tenir).

Toutes les contraintes ne peuvent pas être relâchées : il est difficile de faire plus simple qu'une contrainte fin-début avec délai flexible (*before* dans l'algèbre d'Allen). Les contraintes pouvant être relâchées sont donc celles qui possèdent des égalités. Dans l'algèbre d'Allen, ce sont donc les contraintes *meets*, *starts*, *finishes*, *equals* et leurs inverses respectives. Les différentes possibilités de relâchement sont illustrées en Figures 4.9 et 4.10.

L'algorithme utilisé est le suivant :

- 1** : Premièrement, un vecteur de contraintes relâchées est calculé pour chacune des trois contraintes dans le conflit à résoudre. Cela consiste à ajouter dans le vecteur initial les contraintes relâchées obtenues comme dans les figures 4.9 et 4.10 si elles n'y sont pas présentes, en considérant chaque élément du vecteur initial un par un.
- 2** : Ensuite, chaque nouveau vecteur de contraintes est propagé dans le réseau s'il diffère du vecteur original. L'algorithme utilisé est celui d'Allen, avec une complexité de On^3 .
- 3** : En cas de succès, le compromis est proposé aux participants concernés par les trois tâches impliquées dans le conflit, et en priorité à celui qui a soumis la contrainte sur laquelle il porte.

4.3. Fusion de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen

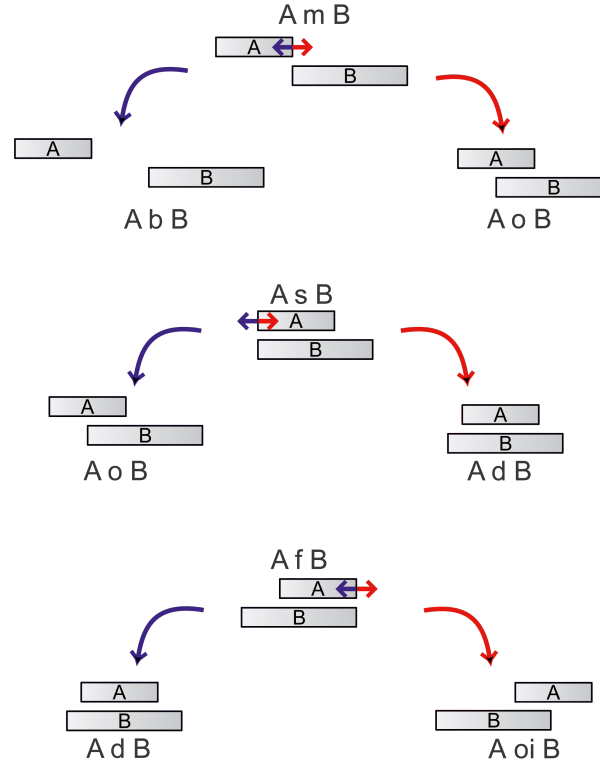


Figure 4.9 – Figure de relâchement pour les contraintes “meets”, “starts” et “finishes” présentant une seule contrainte d’égalité.

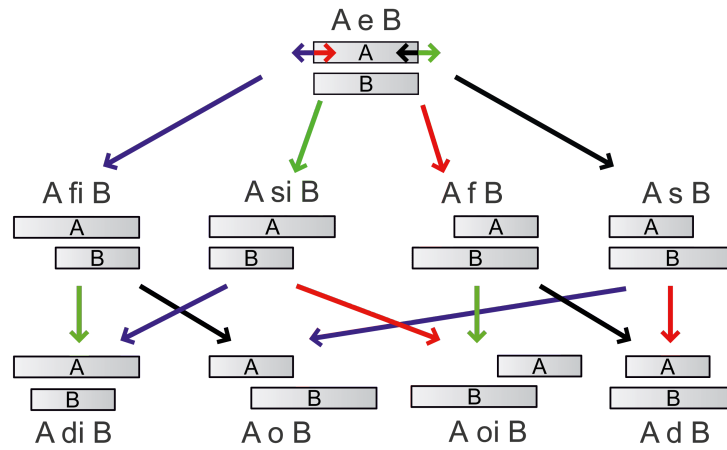
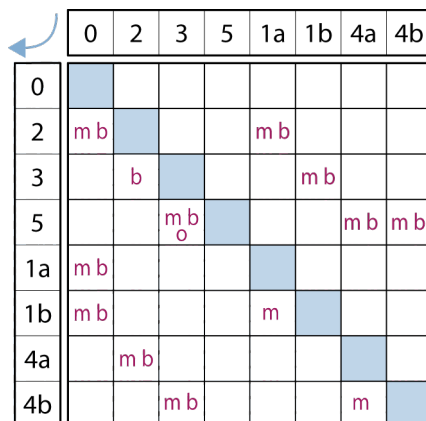


Figure 4.10 – Figure de relâchement pour la contrainte “equals” présentant deux contraintes d’égalité.



	0	2	3	5	1a	1b	4a	4b
0								
2	mb				mb			
3		b			mb			
5			mb_o			mb	mb	
1a	mb							
1b	mb				m			
4a		mb						
4b			mb			m		

Figure 4.11 – DSM obtenue après relâchement de la contrainte $3 < m > 5$ en $3 < m, b, o > 5$ pour résoudre le conflit entre les tâches 3, 4b et 5.

- 4 : Les utilisateurs communiquent et choisissent d'accepter ou de refuser le compromis, voire de saisir un nouvel ensemble de contraintes. En cas de refus, le conflit est transféré aux coordinateurs du système.

Dans le cas de notre exemple simple, nous avons choisi d'illustrer un conflit qui résulte d'une optimisation irréaliste de la dose reçue. Le participant C en charge du bloc de contrôle soumet en effet deux contraintes : le remplacement du bloc est effectué après le remplacement de l'instrument ($2 < b > 3$), mais afin de minimiser le temps de séjour de l'équipe, il demande à ce que la phase de test soit effectuée dans la foulée ($3 < m > 5$), ce qui ne laisse pas de temps pour la tâche 4b de reconnexion du bloc de contrôle. Ce conflit facilement évitable en pratique nous permet d'illustrer simplement le relâchement des contraintes. Comme nous pouvons le constater en Figure 4.11, la contrainte $3 < m > 5$ devient $3 < m, b, o > 5$. Le succès de la propagation de ce nouveau vecteur signifie qu'un des éléments au moins (donc soit b , soit o) appartient à une solution possible.

C'est cette étape de résolution des conflits entre participants qui vient s'ajouter au processus de planification tel qu'il est effectué actuellement au CERN ou à GSI. L'idée est de favoriser la communication et la résolution des conflits préalablement à l'établissement de la séquence définitive des activités sans qu'ils passent tous par les coordinateurs. Cela a pour but d'éviter de placer les participants devant des choix qu'ils peuvent ne pas comprendre et percevoir comme arbitraires, tout en diminuant le nombre de conflits parvenant aux coordinateurs qui peuvent ainsi se concentrer sur les cas les plus problématiques.

Une fois cette étape effectuée, il nous reste donc à agréger toutes les contraintes soumises par les utilisateurs ou obtenues par compromis afin d'établir les différentes séquences d'activités qui en résultent et de les comparer avant de choisir les meilleures solutions.

Résolution du problème de satisfaction de contraintes

Cet étape consiste à éliminer les derniers vecteurs comportant des contraintes multiples pour ne conserver que les solutions comportant des singletons. Nous résolvons ici en réalité simplement un problème de satisfaction de contraintes (CSP) réduit, puisque nous n'allons pas chercher à résoudre l'intégralité du réseau.

Étant donné que la DSM permet de calculer une séquence d'activités optimisée à partir d'un nombre restreint de contraintes, il ne nous est en effet pas utile de calculer une contrainte unique pour chaque paire d'activités comme le veut la résolution exacte d'un CSP. Nous allons donc dans cette étape rechercher les singletons valides uniquement entre les paires d'activités pour lesquelles les utilisateurs ont spécifié des contraintes. En d'autres termes, on ne va pas remplir toutes les cellules de la DSM, mais uniquement rechercher tous les singletons possibles dans celles qui nous intéressent, c'est-à-dire celles dans lesquelles nous disposons déjà d'informations.

L'algorithme utilisé est un algorithme récursif, qui localise les contraintes multiples, et en propage chaque singleton individuellement dans le réseau de contraintes pour vérifier s'il appartient à une solution :

- 1** : trouver s'il existe une contrainte multiple $C_{i,j} = \langle e_1, e_2, \dots, e_k \rangle$;
- 2** : pour chaque e_i , propager la contrainte $C_{i,j} = \langle e_i \rangle$ dans le réseau ;
- 3a** : en cas d'échec : passer à e_{i+1} , car e_i n'appartient pas à une solution ;
- 3b** : en cas de succès : chercher une contrainte multiple $C_{k,l}$;
- 4a** : en cas d'échec : ajouter la DSM à la liste des DSM solutions, remonter au niveau de récursivité supérieur et passer à e_{i+1} . Si $e_{i+1} = e_n$, terminer l'algorithme ;
- 4b** : en cas de succès : appliquer les étapes 2 et 3 à $C_{k,l}$.

Cette étape conserve cependant un temps de calcul exponentiel²⁶ dépendant du nombre de vecteurs à contraintes multiples ainsi que du nombre de contraintes qu'ils contiennent. Il est donc difficile d'évaluer le gain effectué en ne calculant pas la totalité des singletons valides entre toutes les paires d'activités du réseau.

Ces aspects algorithmiques mis à part, cette étape nous a permis d'obtenir des DSM contenant des cellules vides si aucune contrainte n'est spécifiée, ou alors qui contiennent un singleton de l'algèbre d'Allen. Le nombre de DSM obtenues correspond au nombre de solutions possibles compte tenu des contraintes entrées par les utilisateurs (ou obtenues grâce à un ou plusieurs compromis). Si nous reprenons notre exemple, seule une des contraintes relâchées proposées correspond à une solution valable, et il s'agit de la contrainte *before* : en effet, un recouvrement (*overlap*) ne permet pas d'intercaler la reconnexion de câbles entre le remplacement du bloc de contrôle et la phase de tests. La seule DSM représentant une solution est donc celle que nous retrouvons dans les paragraphes suivants en Figure 4.13.

26. Au maximum 13^n combinaisons possibles pour n contraintes comportant les treize relations de l'algèbre, soit une complexité de l'ordre de Ok^n , avec k dénombrant arbitrairement les contraintes des vecteurs multiples.

4.3.3 Construction de la DSM

Une fois arrivés à ce stade, il ne reste plus qu'à optimiser les DSM afin de pouvoir comparer les différentes options qui s'offrent aux participants. Cette optimisation se fait à l'aide de l'algorithme de séquençage présenté en section 4.1.2, qui a pour objectif de réordonner les activités au sein des DSM en fonction des jeux de contraintes qu'elles contiennent.

Cependant, pour réaliser ce séquençage, il faut définir comment il s'effectue, c'est-à-dire qu'il faut établir un lien entre la notation de l'algèbre d'intervalles d'Allen et la DSM binaire. Nous avons vu dans la section précédente et notamment dans le tableau 4.2 que, mis à part les contraintes *before* et *after*, toutes les contraintes de l'algèbre se traduisent par un couplage (ou boucle de premier ordre) dans une DSM binaire. Ceci permet d'assurer que les tâches concernées par ces contraintes soient juxtaposées dans la séquence finale.

Mais les participants souhaitent au final obtenir un emploi du temps, et nous avons précédemment discuté des moyens possibles d'introduire des informations temporelles supplémentaires sous forme de méta-données des activités. La première et la plus importante est leur durée, mais elle n'apparaît pas dans la DSM. Nous avons cependant proposé d'ajouter des indices pour caractériser les contraintes et notamment différencier les différents types de couplages, comme présenté précédemment dans le tableau 4.3. Ces indices, que nous avons choisis de noter τ et δ , se calculent à l'aide des durées estimées des intervalles et d'un délai D spécifié par l'utilisateur. Par exemple, pour une paire d'intervalles (A, B) où B débute après qu'un délai D s'est écoulé à la suite du début de A (cf. Figure 4.12) :

$$D = (1 - \tau) \times \text{durée}(A) \quad (4.4)$$

$$D = (1 - \delta) \times \text{durée}(B) \quad (4.5)$$

Notons que le calcul de la durée $\delta \times \text{durée}(B)$ se fait en sens inverse de l'axe du temps, de la fin de l'intervalle B à celle de l'intervalle A . Une paire $(\tau, \delta) = (1.0, -1.0)$ correspond donc à une contrainte *meets*.

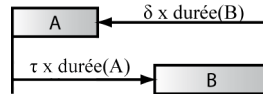


Figure 4.12 – Illustration des coefficients τ et δ pour une contrainte *before*.

Dans le cas de notre exemple, l'unique solution peut par exemple prendre la forme illustrée en Figure 4.13. Toutes les contraintes ne sont pas nécessairement spécifiées, et des valeurs par défaut peuvent être utilisées dans un premier temps avant d'être affinées par la suite. De même, si les délais spécifiés dans les contraintes posent des problèmes sans toutefois changer la nature de la contrainte, il est possible de les modifier. On pense par exemple à la réduction d'un délai imposé dans une contrainte de type *before* pour ne pas entrer en conflit avec une contrainte en aval

4.3. Fusion de DSM et de l'algèbre d'intervalles d'Allen

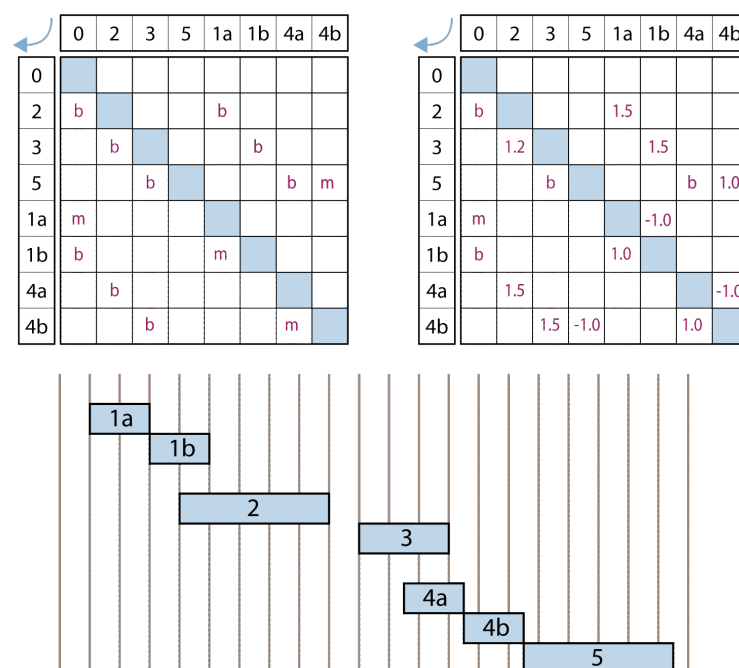


Figure 4.13 – Illustration d'une solution (DSM contenant uniquement des vecteurs singletons) dans laquelle des informations temporelles sont ajoutées ainsi que son illustration en diagramme de Gantt.

dans le réseau. Rappelons que l'objectif de ce processus de planification collaborative est avant tout de s'assurer que chacun puisse exprimer ses contraintes et les voir satisfaites dans la mesure du possible, davantage que de graver un emploi du temps dans le marbre.

4.3.4 Échéancement et choix des solutions

Passer de la DSM au diagramme de Gantt

Nous voici arrivés à l'ultime étape de cette phase de planification collaborative : la reconstitution des différentes séquences possibles pour l'intervention, avec des dates, des durées et des estimations de doses reçues (individuelles et collective), ainsi que la lourde tâche d'effectuer le choix du plan qui sera transmis aux coordinateurs afin qu'ils effectuent la validation finale et les autorisations d'accès aux installations.

Pour cela, notre exemple simple ne va pas nous être d'une grande utilité puisqu'il ne nous reste qu'un seul scénario valable. Nous pouvons cependant le considérer une dernière fois avec la Figure 4.13, qui illustre comment passer d'une DSM à une représentation en diagramme de Gantt.

C'est à partir de cette conversion que la durée globale associée à une DSM binaire peut être calculée [Chen 2003]. Ce calcul se fait à la façon de la passe arrière de la méthode CPM, en partant de la dernière tâche et en cherchant ses précurseurs, puis

en répétant l'opération pour chacun d'eux jusqu'à remonter toute la matrice. Le chemin le plus long est alors le chemin critique de la DSM et sa durée consiste en la somme des activités qui le compose. Il est également possible de calculer la variation de la durée de ce chemin critique s'il comporte des itérations.

Dans notre cas, nous ne pouvons pas nous contenter de sommer les durées individuelles, car le jeu de contraintes de l'algèbre d'Allen implique des délais supplémentaires entre activités ou au contraire des recouvrements entre les tâches. De plus, lorsque deux activités sont liées par une contrainte de couplage (*meets*, *overlaps*, *during*, *starts*, *finishes*, *equals* et leurs inverses), il faut s'assurer que leurs dates de début et de fin la respectent, quitte à ce que l'une d'entre elles ne débute ou ne finisse pas à sa date au plus tôt.

Choisir une solution

Nous avons donc plusieurs solutions qui sont à présent optimisées en fonction de leurs jeux de contraintes respectifs. Il convient à présent de faire le choix du scénario à adopter, et ici encore, ce choix va dépendre de multiples critères.

En se basant sur un jeu de contraintes initial ainsi qu'un jeu de ressources défini (humaines, matérielles mais aussi spatiales, c'est-à-dire avec les routes d'accès et les zones d'intervention définies), et si nous considérons que chaque tâche impliquant une forte dose de radiations reçues a été préalablement optimisée, la solution qui entraînera la plus faible dose collective sera la plus rapide. c'est-à-dire que les délais entre tâches seront réduits au strict nécessaire, et qu'un maximum d'activités seront planifiées en parallèle.

Cependant, il convient si possible de considérer d'autres scénarii, c'est-à-dire d'effectuer toute la procédure que nous venons de détailler dans cette seconde moitié de chapitre sur des jeux de ressources différents. Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'optimum temporel peut dans certains cas ne pas représenter l'optimum en termes de dose individuelle reçue. Par exemple, un trajet direct dans une zone à haut débit de dose ambiant peut entraîner une dose plus importante qu'un contournement plus coûteux en temps. Il peut également être intéressant de déplacer un équipement avant de travailler dessus dans une zone moins radioactive, ce qui va également entraîner une dose plus faible pour une durée d'intervention supérieure, ou encore de distribuer la ou les tâches à effectuer entre plusieurs personnes pour diminuer les doses individuelles, ce qui implique une augmentation du nombre de trajets à effectuer.

Donc en résumé, la dose collective s'optimise pour un scénario fixé (ressources et contraintes) à l'aide du jeu de contraintes singleton qui résulte en l'optimum temporel, tandis que le meilleur scénario pour un individu, bien que dépendant aussi du temps, sera atteint en optimisant chaque tâche en variant les scénarii possibles.

4.4 Bilan : processus collaboratif global et utilisation de la DSM Collaborative

La méthode que nous venons de présenter est une fusion de l'algèbre d'intervalles d'Allen et de la Design Structure Matrix (DSM) qui permet de s'adapter particulièrement aux contextes collaboratifs et de faire de la planification elle-même un processus orienté vers l'échange et la collaboration entre participants.

Cette méthode de DSM Collaborative associe donc les algorithmes "traditionnels" de chaque méthode pour faciliter les interactions entre participants dans la phase de collection des contraintes tout en les adaptant pour rendre les deux méthodes compatibles :

- la propagation des contraintes et la détection des conflits pour l'algèbre d'Allen ;
- l'optimisation par séquençage et l'estimation de la durée totale pour la DSM.

À cela, nous avons ajouté des algorithmes tournés vers l'amélioration de la collaboration entre participants : c'est le cas de l'algorithme de compromis qui teste des combinaisons de contraintes relâchées afin de proposer directement des solutions en cas de contraintes incompatibles et donne la possibilité aux participants de retravailler leur plan provisoire sans avoir à en référer aux coordinateurs de la planification. L'adaptation des données de l'algèbre d'intervalles d'Allen a également été effectuée afin notamment de prendre en compte certaines informations temporelles additionnelles lorsque les utilisateurs souhaitent plus de précision au niveau de l'échéancement des tâches et ne se contentent plus de la représentation qualitative de l'algèbre.

Tous les algorithmes mentionnés plus ou moins en détail dans ce chapitre sont repris en annexe. Mais la méthode que nous venons de décrire ne se limite pas à de l'algorithmique, et nous avons tenté tout au long de cette deuxième moitié de chapitre d'insister sur la présence de l'humain tout au long du processus et de son contrôle sur les contraintes entrées et les décisions prises. Ce sont les participants qui acceptent ou rejettent les conflits, et ce sont eux qui adoptent la solution au terme des calculs.

Ce choix dépend de plusieurs critères, et nous en avons considéré ici deux principaux : le temps (qui est central dans toute opération de planification) et les doses de radiations reçues qui, dans notre cas, peuvent être amenées à dépasser la criticité temporelle. À ce propos, nous avons d'ailleurs insisté sur le fait que l'optimum temporel n'équivaut pas forcément à l'optimum des doses reçues.

Nous avons volontairement ignoré dans ce chapitre théorique d'autres critères importants, à commencer par le coût, qui est central dans l'approche ALARA : il s'agit d'optimiser la dose autant qu'il est raisonnable de le faire compte tenu des coûts mis en œuvre. Le coût intervient par exemple lorsqu'il s'agit d'acheter du matériel (notamment des moyens robotisés pour réduire l'exposition humaine aux radiations) ou d'employer plusieurs intervenants (ou des sous-traitants) pour réduire

les doses individuelles. Nous allons aborder dans le chapitre suivant un cas d'étude qui permettra d'introduire ce critère dans notre analyse.

Pour conclure ce chapitre 4, la figure 4.14 résume les différentes étapes de la DSM Collaborative et du processus de saisie collaborative des contraintes temporelles entre tâches.

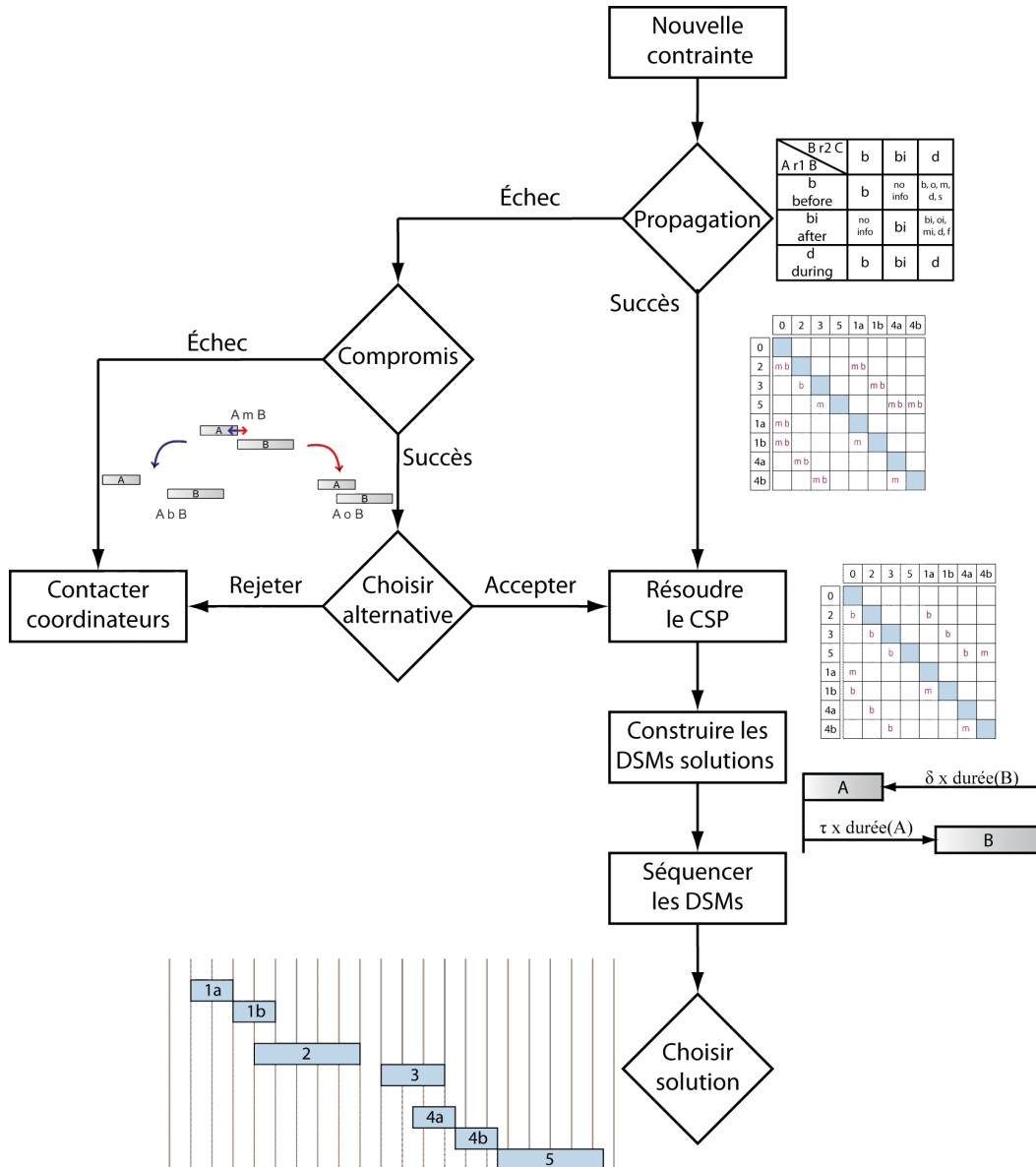


Figure 4.14 – Résumé du processus collaboratif de soumission des contraintes et d'élaboration de la séquence d'activité d'une intervention.

Application : comparaison de scenarii d'intervention

Sommaire

5.1 GSI-FAIR et le Super-FRS	121
5.1.1 GSI-FAIR	121
5.1.2 Le Super-Séparateur de Fragments	123
5.2 Données pour la planification d'interventions dans le Super-FRS	132
5.2.1 Différents scenarii d'intervention	132
5.2.2 La séquence d'activités du scénario télé-opéré	134
5.2.3 Données de radioprotection et doses simulées	139
5.3 Résultats et discussions : comment planifier collaborative- ment ?	143
5.3.1 Utilisation d'un prototype d'application pour l'étude de cas	143
5.3.2 Présentation des résultats	146
5.3.3 De nombreux facteurs d'amélioration	150
5.3.4 Vers une planification collaborative	152
5.4 Conclusions sur cette première étude	153

5.1 GSI-FAIR et le Super-FRS

5.1.1 GSI-FAIR

Dans ce chapitre d'application, nous quittons le cadre du CERN pour nous intéresser aux installations de GSI-FAIR situées à Darmstadt en Allemagne. La *GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung*²⁷ a été fondée en 1969 sous le nom de *Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI)*, qui signifie en français société pour la recherche sur les ions lourds. Comme le CERN, la GSI abrite et exploite des installations d'accélérateurs de particules utilisées par des expériences afin d'effectuer des recherches en physique fondamentale, et notamment en physique atomique et nucléaire [GSI 2014]. Des recherches sur la physique des plasmas, les matériaux ainsi que sur la médecine et la biophysique sont également effectuées à la GSI. Les travaux qui y sont réalisés concernent des énergies moins élevées que celles du CERN, mais

27. Centre Helmholtz pour la recherche sur les ions lourds, communément désigné en France par l'appellation "Centre de recherche sur les ions lourds".

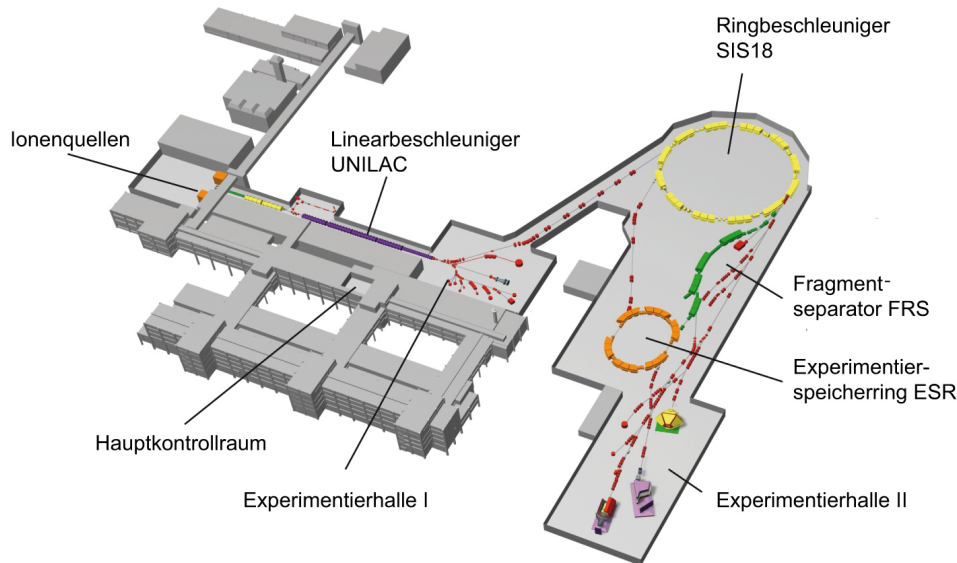


Figure 5.1 – Les installations d’accélérateurs de particules de la GSI ainsi que les zones expérimentales.

les densités des faisceaux utilisés sont plus importantes, ce qui entraîne, comme nous le verrons au cours de ce chapitre, de fortes activations radiologiques.

Les divers systèmes de la chaîne d’accélération et d’expérimentation de la GSI sont illustrés en 5.1. Les plus notables sont :

- l’UNILAC, qui est l’accélérateur linéaire des installations et qui débute la chaîne d’injection des ions lourds juste après les sources d’ions ;
- le synchrotron SIS18 permettant d’accélérer toutes sortes d’ions, de l’hydrogène à l’uranium, pour des énergies allant de 1 à 4,5 GeV par particule ;
- l’anneau de stockage ESR (Energy Storage Ring) qui permet de conserver des particules issues du SIS 18 ou du FRS un certain temps avant de les délivrer aux différentes expériences, mais aussi d’effectuer des mesures de masse ou de durées de vie, et d’étudier des réactions en son sein même ;
- le séparateur de fragments (Fragment Separator, abrégé en FRS) qui est un spectromètre en ligne, situé entre le SIS 18 et l’ESR afin de pouvoir fonctionner de façon couplée avec eux.

Ce dernier est le système qui va nous intéresser le plus parmi les installations actuelles de la GSI, car son successeur est au cœur des travaux présentés dans ce chapitre. La GSI devait en effet accueillir dès 2013 les installations d’un nouveau projet international : Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) [FAIR 2014]. Dix pays sont membres de ce partenariat d’un budget s’élevant à environ un milliard d’euros : l’Allemagne, la Finlande, la France, l’Inde, la Pologne, la Roumanie, le

5.1. GSI-FAIR et le Super-FRS

Royaume-Uni, la Russie, la Slovénie et la Suède. Cependant, le projet a pris du retard, et les travaux, commencés en 2011, sont actuellement en cours de réalisation. Parmi les nouvelles installations de FAIR se trouvera le Super-FRS²⁸, sur lequel porte le travail de planification effectué dans ce chapitre.

5.1.2 Le Super-Séparateur de Fragments

Le FRS

Avant de décrire le Super-FRS lui-même, intéressons-nous brièvement à son prédécesseur, son utilisation, et son fonctionnement, car il en hérite en bien des points. Le FRS est décrit en détail dans [Geissel 1992]. Il s'agit d'une installation dans laquelle, comme pour la zone TCC2 du CERN présentée dans le chapitre 2, le faisceau principal va interagir avec une cible métallique afin d'obtenir des faisceaux secondaires contenant notamment des isotopes rares à durées de vie parfois très courtes (typiquement, quelques dizaines de microsecondes). Il permet de plus d'effectuer la séparation des différents produits obtenus afin de sélectionner précisément un isotope donné pour alimenter des expériences en aval (cf. Figure 5.2), ou tout simplement d'analyser la composition du faisceau secondaire obtenu à la façon d'un spectromètre.

L'obtention de ces noyaux exotiques se fait aujourd'hui en suivant deux méthodes expérimentales complémentaires. La première est la séparation d'isotopes en ligne (en anglais : Isotope Separation On-Line abrégée en ISOL) que l'on retrouve notamment dans l'installation ISOLDE et dans la future HIE-ISOLDE au CERN. Dans cette méthode, les ions des faisceaux secondaires sont produits au repos avant d'être accélérés par un post-accelérateur. Le FRS travaille quant à lui suivant la seconde méthode, à savoir la séparation en vol, dans laquelle les faisceaux secondaires sont produits à des énergies supérieures et directement séparés et analysés dans la foulée au sein du séparateur, ce qui permet notamment d'analyser un plus grand nombre de projectiles [Winckler 2003, Geissel 2003].

La Figure 5.2 illustre la séparation d'un faisceau et décrit les différents éléments optiques du FRS²⁹. Le FRS est un système symétrique composé de quatre parties indépendantes. Chacune comporte un dipôle incurvant la trajectoire de 30 degrés ainsi qu'un ensemble de quadrupôles permettant de concentrer le faisceau, placés de part et d'autre du dipôle. Des aimants sextupôles placés juste entre les dipôles et les quadrupôles permettent de corriger les aberrations optiques plus fines. Le système possède ainsi quatre plans focaux (de F1 à F4), et est achromatique en F4, c'est-à-dire que les dispersions de faisceau induites par les deux premières parties sont compensées par les deux dernières. Le point focal F2 est quant à lui dispersif, c'est-

28. Séparateur de fragments supraconducteur.

29. Dans les accélérateurs de particules, le terme "optique" est utilisé pour désigner les différents aimants utilisés pour modifier le faisceau et sa trajectoire, par analogie avec les lentilles de l'optique géométrique. Autrement dit, les faisceaux de particules traversant les différents aimants se comportent de manière analogue aux faisceaux lumineux dans un système optique.

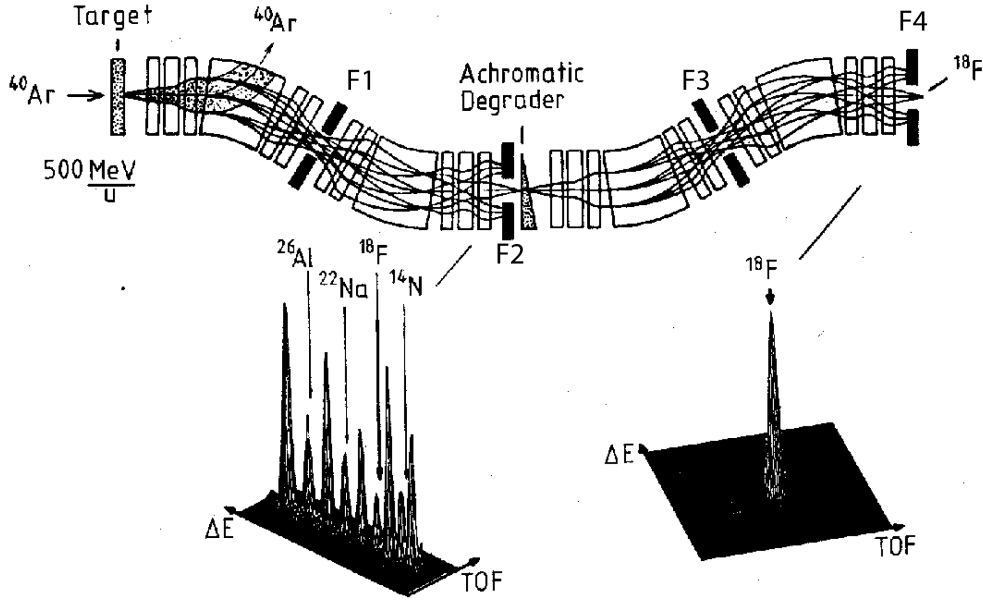


Figure 5.2 – Illustration du fonctionnement du FRS tirée de [Geissel 1992]. On peut distinguer les différents éléments optiques du système (notamment les points focaux de F1 à F4) ainsi que la cible (béryllium, 2 g/cm²) et le dégradeur d'énergie lors de la production d'un faisceau de fluor-18 à partir d'un faisceau d'argon-40 à 500 MeV par particule.

à-dire que les différents produits de fragmentation y seront spatialement séparés suite à leur passage dans les deux premiers stades du FRS.

Dans le FRS la séparation des fragments est effectuée en trois étapes selon une combinaison de deux méthodes : l'analyse de rigidité et la perte d'énergie atomique. L'analyse de rigidité repose sur le fait que deux particules de même énergie et de même rapport A/Z sont déviées de façon identique par les deux premiers champs des dipôles D1 et D2 et arrivent en F2 au même endroit³⁰. En F2 est placée une pièce métallique appelée dégradeur d'énergie qui va permettre de séparer les différentes particules de même rapport A/Z , qui vont y perdre des quantités d'énergie différentes, ce qui introduit un critère de sélection supplémentaire. Les deux derniers stades du FRS permettent alors de finaliser la séparation en F4. Les produits de fragmentation indésirables sont interceptés en F2 et F4 comme illustré en Figure 5.2.

La rigidité magnétique (souvent utilisée sous le seul terme de rigidité) est une grandeur illustrant l'action du champ magnétique produit par un dipôle sur la trajectoire d'une particule chargée. Sa formule est donnée par :

$$R = B\rho \text{ (Tm)} \quad (5.1)$$

30. A est le nombre de nucléons de l'isotope considéré et Z son nombre de protons. Voir le chapitre 2, section 2.2.1 pour un retour complet sur la nomenclature.

5.1. GSI-FAIR et le Super-FRS

où B est le champ magnétique du dipôle traversé (en teslas) et ρ le rayon de courbure (en mètres) du mouvement circulaire de la particule induit par la force de Lorentz. En pratique, la notation $B\rho$ est utilisée pour désigner la rigidité magnétique. La méthode de séparation du FRS est donc désignée dans la littérature comme une méthode $(B\rho - \Delta E - B\rho)$: de la cible à F2, le faisceau subit une première analyse de rigidité éliminant le faisceau incident ainsi que les particules n'ayant pas le rapport A/Z souhaité. Le dégradeur d'énergie en F2 permet d'atténuer différemment l'énergie des particules de même A/Z le traversant, ce qui permet de les séparer entre F2 et F4 grâce à la seconde analyse de rigidité.

Nous n'allons pas rentrer plus que nécessaire dans la description du FRS, et de plus amples informations sont disponibles dans Geissel et al. cité précédemment. Cependant, les quelques bases que nous venons de poser sur la description et le fonctionnement d'un séparateur de fragments sont à garder en mémoire, car nous allons à présent nous intéresser au successeur du FRS, le Super-FRS, qui en reprend en grande partie les principes et le fonctionnement.

Le projet du Super-FRS

Le Super-FRS appartiendra, comme nous l'avons précédemment indiqué, au complexe d'accélérateurs de FAIR, actuellement en construction sur le site de la GSI. Une illustration de ce complexe est donnée en Figure 5.3, et permet de visualiser les futurs éléments principaux de ce complexe :

- le SIS100/300, un synchrotron à deux anneaux qui accélérera les ions à des énergies atteignant 1,5 GeV par particule (pour U^{28+}) et des intensités atteignant les 10^{12} ions par seconde, ce qui est 100 à 1000 fois supérieur aux intensités délivrées par le SIS18 actuel ;
- les anneaux de stockage comme le Collector Ring (CR) et le New Energy Storage Ring (NESR), qui auront un rôle proche de celui de l'actuel ESR consistant à conserver les particules accélérées dans de bonnes conditions pour les expériences, ainsi que de permettre la mesure de quantités physiques comme des durées de vie ou des masses d'isotopes rares ;
- le Super-FRS, qui fonctionnera comme le FRS mais avec un plus large spectre de particules acceptées. Il alimentera trois branches expérimentales distinctes : les branches haute et basse-énergie (*High Energy Branch* et *Low Energy Branch*) ainsi que la branche des anneaux de stockage (*Ring Branch*) contenant notamment le CR et le NESR. Une illustration est disponible en Figure 5.4.

Le fonctionnement du Super-FRS sera très proche de celui du FRS, et la différence clé (en plus de l'accroissement de l'énergie et de la densité des faisceaux incidents) provient d'une conception tournée vers une acceptation plus importante de produits de fission. Nous avons rapidement mentionné en décrivant le FRS qu'il existe deux mécanismes de production pour les fragments obtenus dans un séparateur après l'interaction entre le faisceau et la cible : la fragmentation et la fission, cette dernière provenant essentiellement des ions d'uranium (^{238}U). Cependant, dans le cas de cette dernière, l'énergie cinétique des fragments obtenus est très variable,

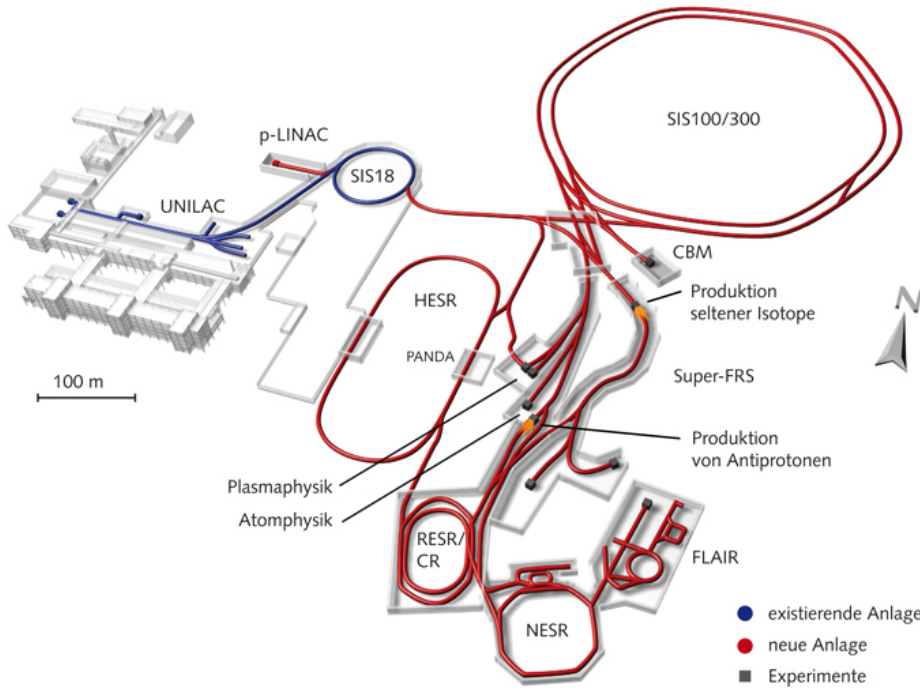


Figure 5.3 – Les futures installations d’accélérateurs de particules de FAIR (en rouge), avec notamment le SIS 100/300, le Super-FRS et les différents anneaux de stockage et les zones expérimentales. On peut également repérer les actuelles installations de GSI en bleu pour une visualisation des tailles respectives.

ce qui entraîne une large distribution dans l’espace de phase représentant le moment angulaire des particules en fonction de l’énergie cinétique, comme illustré dans [Winckler 2003, Geissel 2003]. Dans le FRS actuel, 70% voire plus des produits de fragmentation sont transmis, mais seul un pourcentage très faible des produits de fission l’est (cf. Winckler et al. 2003). Le Super-FRS a donc parmi ses objectifs la correction de cette tendance, mais, en raison de l’acceptation plus large des fragments, additionnée à des énergies et des intensités nettement augmentées, des efforts supplémentaires sont requis dans la conception pour conserver un pouvoir séparateur identique à celui du FRS actuel.

La méthode de séparation utilisée est la même que celle du FRS, à savoir la méthode $(B\rho - \Delta E - B\rho)$ que nous avons décrite précédemment. Cependant, pour faire face à une plus grande concentration de produits secondaires indésirables due aux conditions d’énergie, d’intensité et d’acceptation des fragments, deux niveaux de séparateurs sont combinés pour atteindre la pureté de faisceau souhaitée. On parle donc de pré-séparateur (*pre-separator*) et de séparateur principal (*main-separator*). Ils sont placés l’un à la suite de l’autre comme illustré en Figure 5.5, pour une longueur totale de 129 m (par comparaison, le FRS actuel mesure 69 m de long).

5.1. GSI-FAIR et le Super-FRS

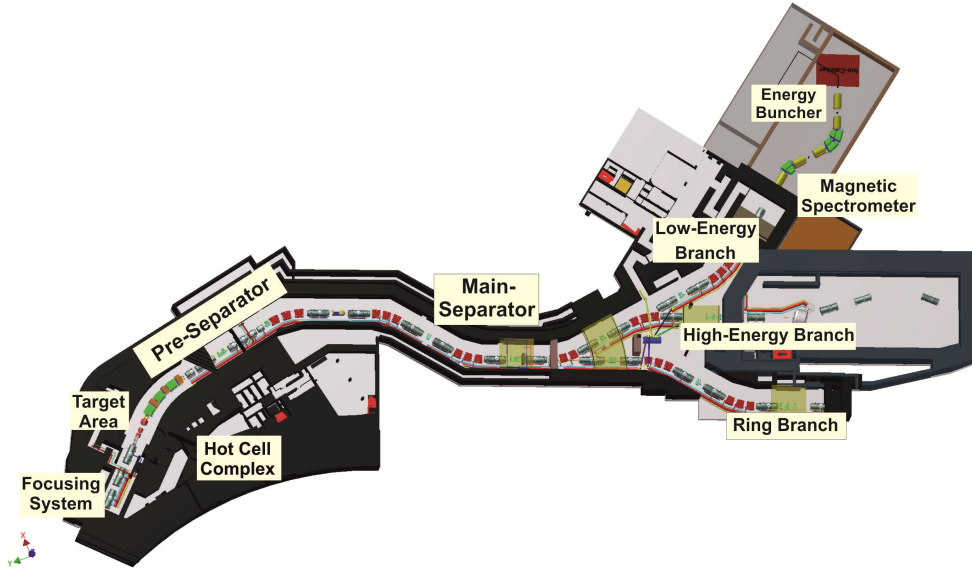


Figure 5.4 – Illustration du Super-FRS avec notamment ses deux parties (pré-séparateur et séparateur principal) ainsi que ses trois branches de sortie (haute énergie, basse énergie et anneaux).

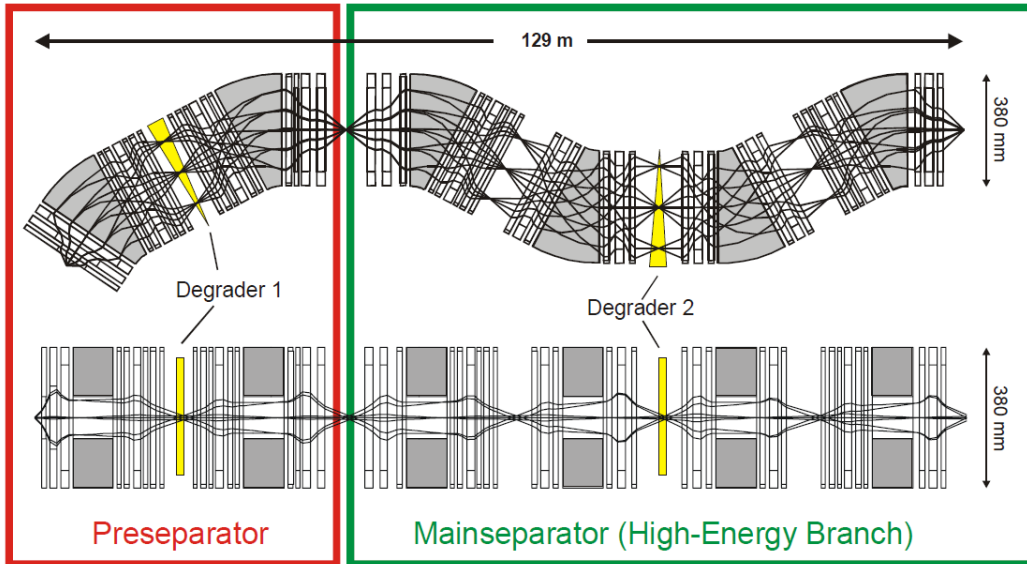


Figure 5.5 – Description de l'optique du futur Super-FRS. Nous pouvons y distinguer ses deux grandes parties (pré-séparateur et séparateur principal), ainsi que les deux dégradeurs d'énergie. Source : [Winckler 2003].

Une description précise des éléments optiques ainsi que des cibles et des dégradeurs est disponible dans Winckler et al. et Geissel et al. précédemment cités, ainsi que, d'une façon plus synthétique dans [Winkler 2008], qui fournit une description de l'avancement du projet en 2008. Brièvement, chaque séparateur possèdera donc des dipôles (2 pour le pré-séparateur et 4 pour le séparateur principal comme pour le FRS actuel) qui courberont les trajectoires des particules afin de procéder aux analyses de rigidité. Des aimants quadrupôles, sextupôles et même octupôles seront également insérés pour effectuer la correction des aberrations optiques. Le pré-séparateur possèdera quatre points focaux intermédiaires de FPF1 à FPF4. Cependant, les points FPF1 et FPF3 seront alignés avec FPF2 et auront essentiellement un rôle de collimation du faisceau. Le séparateur principal sera quant à lui identique au FRS actuel avec quatre points focaux, de FMF1 à FMF4. Des dégradeurs d'énergie seront placés en FPF2 et FMF2 qui seront les points focaux dispersifs du système. Les faisceaux secondaires indésirables seront interceptés aux divers points focaux à l'aide d'éléments de collimation appelés *slits*, et ce qu'il reste du faisceau incident sera rapidement absorbé dans la première partie du pré-séparateur.

Activation des matériaux et radioprotection

Nous avons jusqu'ici décrit succinctement les installations de la GSI ainsi que celles (en devenir) de FAIR. En particulier, nous avons insisté sur le FRS et le Super-FRS qui sont des systèmes particulièrement intéressants concernant la radioprotection et la planification d'interventions en milieux radioactifs. En effet, des éléments fortement activés s'y trouvent, comme par exemple la cible à l'entrée du système ou les dégradeurs qui interagissent directement avec les faisceaux, ainsi que les pièces interceptant les faisceaux (en anglais, les *slits* et autres *beam catchers*) positionnées pour capter le faisceau principal ainsi que les produits secondaires indésirables. Nous allons nous intéresser à présent aux conditions de radioprotection dans le futur Super-FRS, une étape nécessaire pour commencer à envisager les futurs scenarii d'interventions qui s'y dérouleront.

Les installations de FAIR étant seulement en cours de conception, la seule source de données de radioprotection disponible actuellement est la simulation. Des études poussées ont été réalisées à l'aide du code de calcul FLUKA (cf. chapitre 2, sections 2.4.1 et 2.4.2) [Kozlova 2008, Kozlova 2012]. C'est en se basant sur ces résultats que le blindage des installations a été dimensionné, et c'est également sur les mêmes géométries FLUKA que nous nous sommes basés par la suite pour travailler sur les scenarii d'interventions dans le tunnel principal.

Si ce terme de "tunnel principal" est employé, c'est qu'une partie de l'installation, à savoir le hall contenant la cible et allant entre les points focaux FPF1 et FPF2 du pré-séparateur, recevra un traitement spécial en raison des débits de dose anticipés. Leurs valeurs élevées interdiront en effet tout accès humain aux installations, notamment à proximité de la cible ou des bloqueurs de faisceau. Les tâches de maintenance, notamment concernant la cible ou les inserts présents sur la ligne de faisceau seront entièrement effectuées automatiquement, à l'aide d'un système

5.1. GSI-FAIR et le Super-FRS

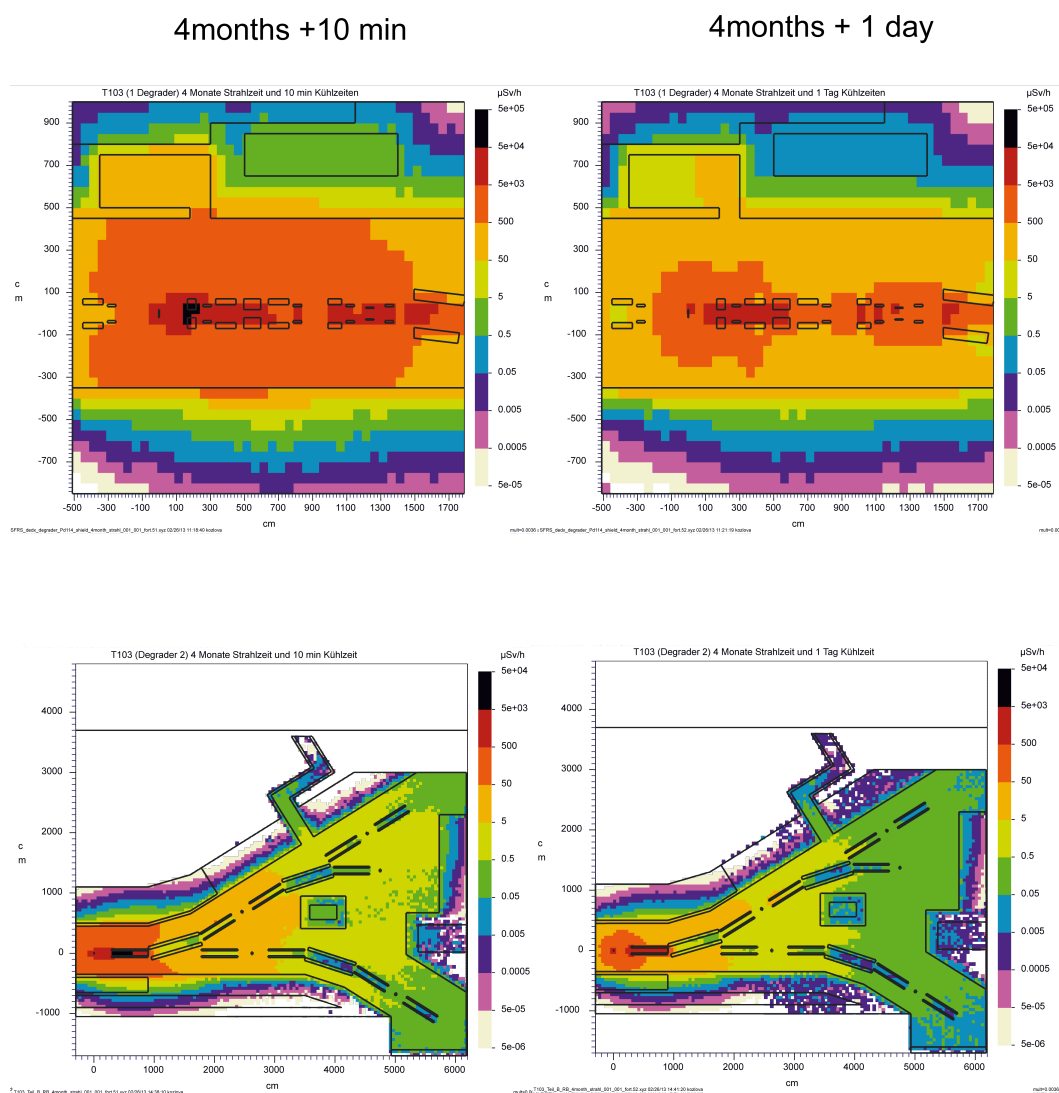


Figure 5.6 – Deux scenarii extraits (10 min et 1 jour de refroidissement après 4 mois d’opération) parmi les nombreux débits de dose simulés dans le tunnel principal du Super-FRS. L’installation est séparée en deux géométries FLUKA. Données fournies par E. Kozlova, du service de radioprotection de la GSI.

de flasque blindée et d'une grue. La conception de cette zone du Super-FRS est détaillée dans Kozlova et al. cité précédemment, et nous allons peu nous y intéresser car aucune implication humaine n'est envisagée.

La seconde partie du tunnel (de FPF2 à FMF4), appelée "tunnel principal", est en revanche d'un plus grand intérêt concernant les interventions humaines. Nous verrons en effet que certains scenarii sont en ce moment à l'étude, et les données de radioprotection simulées avec FLUKA ont permis d'y dimensionner le blindage comme pour le pré-séparateur, et nous ont également été utiles pour estimer les doses reçues dans le cadre de certaines activités, par exemple à proximité du point FPF2 (voir la partie gauche de la Figure 5.6).

Dans le cadre de notre étude de planification d'interventions, de nouvelles simulations ont été effectuées sur deux géométries représentant la totalité du tunnel principal. La première est celle donnée dans la partie basse de la Figure 5.6 qui représente la seconde moitié du tunnel principal puis la division du Super-FRS dans les diverses branches qu'il alimente. La seconde est donnée en Figure 5.7 et représente le tunnel entre les deux dégradeurs. Cependant, des modifications ont été nécessaires sur cette dernière, car un tunnel de service a été prévu à la place de la terre compactée (*compacted soil*) comme représenté sur la moitié droite de la figure, afin de garantir aux opérateurs un accès aux zones d'intervention avec un écran de protection contre les radiations.

Il faut enfin noter que nous n'insistons pas ici sur les valeurs obtenues dans ces simulations. En effet, si les valeurs instantanées en cours d'opération avec faisceau telles que celles montrées en partie gauche de la Figure 5.7 ont une véritable utilité pour le dimensionnement des blindages, celles que nous avons obtenues pour les doses résiduelles après activation des matériaux sont susceptibles d'évoluer. Avec le temps et l'avancée de la conception du Super-FRS, les géométries FLUKA seront affinées et les valeurs obtenues plus proches de la réalité, sans compter que de nombreux scenarii d'irradiation différents peuvent être envisagés. De plus, l'étude que nous présentons en section suivante constitue l'une des toutes premières ébauches de planification d'intervention dans le futur Super-FRS. Il faut donc garder à l'esprit que les données de radioprotection que nous y utilisons permettent plus de comparer les différents scenarii les uns aux autres et d'effectuer de premières estimations que de leur associer avec certitude des prédictions de doses reçues.

Ceci conclut notre description du Super-FRS en termes de radioprotection. Nous reviendrons plus en détail sur les résultats des simulations FLUKA et notamment sur leur exploitation dans la section suivante, lorsqu'il sera question d'associer des doses simulées à des activités. Mais pour cela, il nous faut d'abord décrire les interventions considérées ainsi que leurs séquences d'activités. Et c'est ce à quoi nous allons à présent procéder.

5.1. GSI-FAIR et le Super-FRS

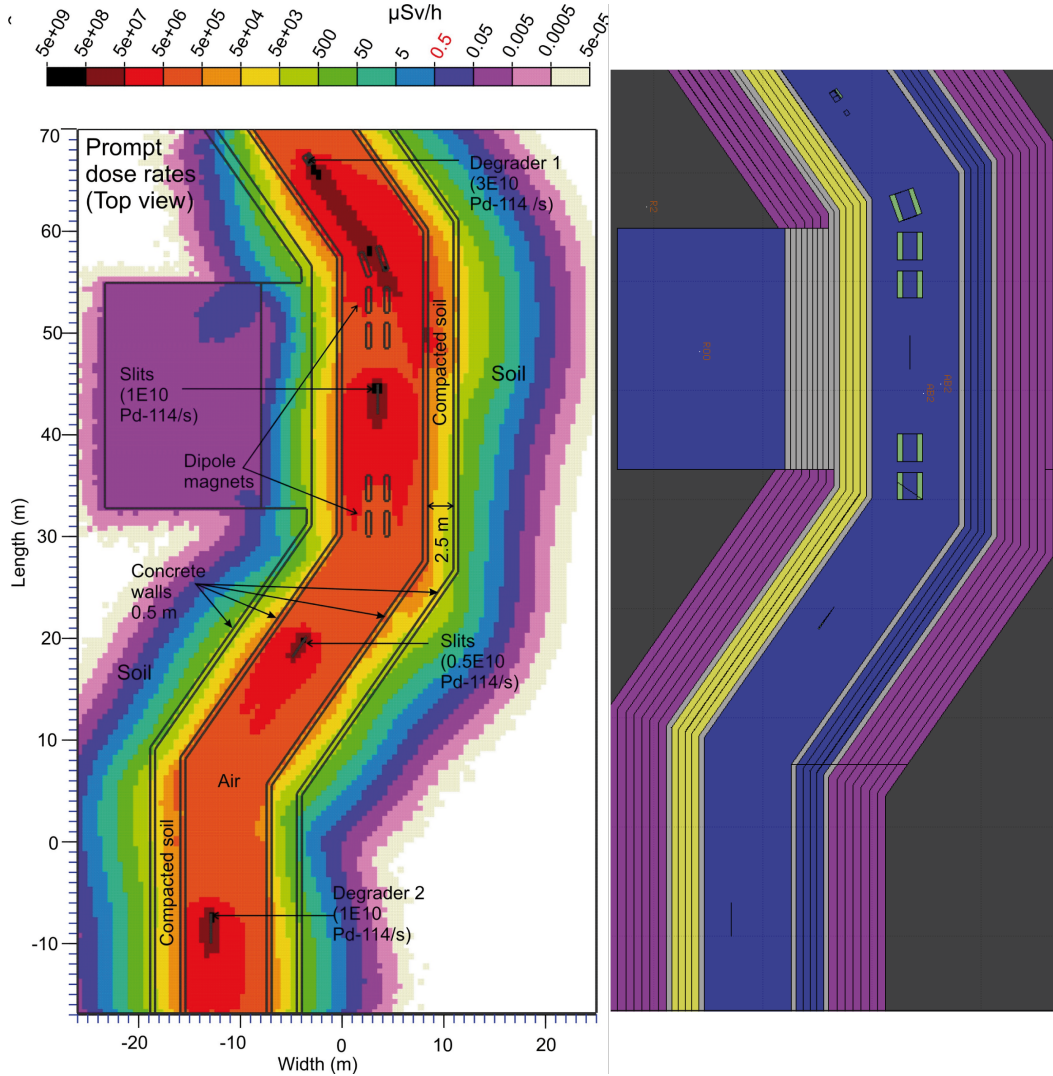


Figure 5.7 – Partie du tunnel principal du Super-FRS située entre les deux dégradeurs, c'est-à-dire entre les points focaux FPF2 et FMF2. Les débits de dose indiqués sur la partie gauche sont des débits instantanés en cours d'opération. La moitié droite représente les matériaux de la géométrie, avec notamment l'ajout d'un tunnel de service (en bleu) à la place de la terre compactée. Le gris représente le béton pour le blindage, et le violet le sol normal à l'extérieur de la géométrie.

5.2 Données pour la planification d'interventions dans le Super-FRS

Dans les deux dernières sections de ce chapitre, nous allons dévoiler les résultats préliminaires du premier effort d'intégration de la DSM collaborative dans une situation réelle de planification d'intervention. L'objectif de ce travail est d'estimer des doses de radiations reçues lors d'interventions de maintenance sur des inserts placés sur la ligne de faisceau au niveau de certains points focaux du futur Super-FRS afin de comparer différents scenarii envisagés.

Les résultats présentés ici sont des résultats préliminaires, et seront améliorés par la suite. Ils sont cependant déjà révélateurs du potentiel de la méthode utilisée ainsi que des améliorations qui pourront lui être apportées par la suite.

5.2.1 Différents scenarii d'intervention

Nous avons vu précédemment qu'une partie importante du pré-séparateur (le hall comprenant la cible, le point focal FPF1 ainsi que les dispositifs de blocage du faisceau principal) serait interdite d'accès en raison des importants débits de dose anticipés. Le tunnel principal pourra en revanche être sujet à des interventions humaines, même s'il présente des débits de dose non négligeables, ce qui rend l'application de l'optimisation ALARA indispensable.

De plus, il faut souligner que les interventions dans le tunnel principal ne seront en aucun cas entièrement manuelles. Afin de réduire au maximum l'exposition du personnel, des solutions de télé-opération ainsi que d'automatisation ont été envisagées, chacune entraînant différents niveaux de coût et d'implication humaine. C'est dans le cadre de la comparaison de ces différents scenarii que nous avons effectué la première analyse de cas pratique avec la DSM collaborative, afin de fournir quelques estimations et arguments de comparaison (concernant essentiellement les aspects de radioprotection).

Lieux des interventions et tâches à accomplir

Les interventions que nous considérons dans cette étude concernent les trois derniers plans focaux du pré-séparateur, à savoir FPF2, FPF3 et FPF4. Depuis le point d'accès, la distance à parcourir pour un opérateur est d'environ une centaine de mètres pour atteindre FPF2 qui est le point le plus lointain à atteindre depuis l'entrée.

En ces trois points, des inserts sont placés sur la ligne de faisceau (16 au total sur les trois localisations), chacun possédant diverses fonctions que nous ne détaillerons pas ici³¹ (cf. Figure 5.8). Une tâche annuelle (sans compter les éventuelles défaillances) sera menée pour effectuer leur inspection et leur maintenance. Il faudra alors pouvoir se rendre sur les lieux, les démonter et éventuellement les réparer

31. Il est possible d'y retrouver notamment les *slits* et les dégradeurs d'énergie.

5.2. Données pour la planification d'interventions dans le Super-FRS

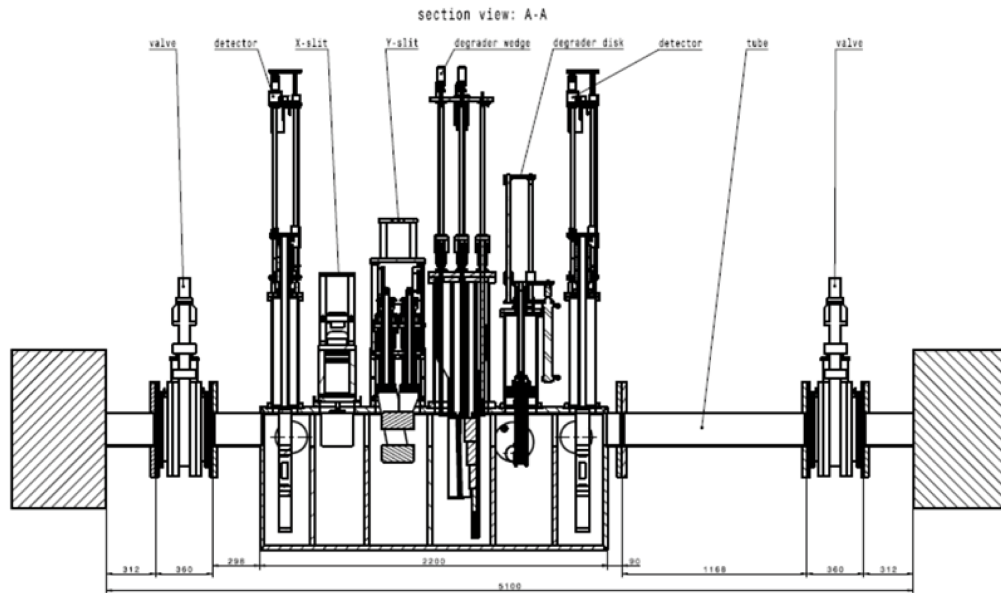


Figure 5.8 – Illustration des différents inserts présents au point FPF2. On retrouve le dégradeur d'énergie, mais également des détecteurs ou encore deux *slits*, pour un total de six éléments pouvant être concernés par les interventions de maintenance abordées dans cette section.

(sur place ou en les emportant pour travailler dessus hors des zones activées) ainsi que de procéder à leur remplacement.

Les trois scénarii proposés

Les débits de dose estimés étant élevés (après un jour d'attente, entre 5 et 50 $\mu Sv/h$ à deux mètres du dégradeur en FPF2, entre 50 et 500 $\mu Sv/h$ à moins d'un mètre comme indiqué précédemment en Figure 5.6), il n'est pas envisageable d'effectuer toutes ces interventions manuellement et seuls trois scénarii, soit totalement automatisés, soit en partie télé-opérés, ont été considérés :

- 1 Scénario totalement automatisé** : comprenant 18 tâches, il met en œuvre deux plateformes de type *omnimove* de marque KUKA³², l'une équipée d'un bras robotique et l'autre d'une cellule de stockage pour les équipements radioactifs. Une grue mobile (modèle UNIC Eco-095) est également nécessaire comme système de soutien en cas de panne. Le coût d'achat de matériel estimé pour ce scénario est de 1,45 M€ : 1,25 M€ pour les deux *omnimoves* et le bras robotisé, 200 k€ pour la grue.

32. Illustrée en Figure 5.9, la plateforme *omnimove* est un dispositif automatique qui peut manœuvrer sans rotation dans toutes les directions. Elle est idéale pour les déplacements mettant en jeu des charges importantes, notamment dans des espaces limités.

- 2 Scénario télé-opéré** : comprenant de 22 à 29 tâches, il nécessite lui aussi la plateforme *omnimove* équipée cette fois d'un robot télé-opéré (*Exo-Hands* de marque Festo), ainsi que la grue mobile télé-opérée (modèle UNIC Eco-095). Deux opérateurs humains effectuent les tâches avec la grue ou le robot à tour de rôle. Le coût d'achat de matériel pour ce scénario est d'environ 800 k€, avec de 500 à 600 k€ pour l'*Exo-Hands* et le blindage (pas encore dimensionné) et 200 k€ pour la grue mobile.
- 3 Scénario hybride** : comprenant 30 tâches, il contrebalance les avantages des deux méthodes précédentes. Cependant, il nécessite plus de matériel (la totalité du matériel mentionné précédemment, mis à part le blindage sur le second *omnimove*, pour un coût d'achat estimé à 2 M€) et induit donc des coûts plus importants. Le personnel y est également exposé à des rayonnements ionisants dans des proportions moindre comparées à celles du scénario 2 car il ne s'agit que de maintenance rapide sur des équipements activés effectuée à l'écart des zones les plus radioactives.

Les différents dispositifs automatisés et télé-opérés utilisés dans les trois solutions sont illustrés en Figure 5.9, et le Tableau 5.1 résume les avantages et les inconvénients de chacun de ces scenarii. Lister les séquences de tâches complètes pour chacun des scenarii envisagés étant plutôt fastidieux, elles sont données toutes les trois en annexe F. À l'instant où ces lignes sont écrites, nous avons essentiellement travaillé sur le scénario télé-opéré qui demande le plus de travail pour l'estimation des doses et l'optimisation ALARA. Nous en donnons donc une séquence de tâches simplifiée dans la section suivante.

5.2.2 La séquence d'activités du scénario télé-opéré

Dans la section suivante, nous allons détailler les résultats obtenus pour l'étude du scénario télé-opéré (précédemment désigné comme scénario numéro 2) sur le point FPF2 qui présente les plus fortes activations en raison de la présence du dégradeur. Cette section est quant à elle dédiée à la description des données utilisées. Une séquence détaillée est fournie en annexe F, mais nous allons la décrire de façon simplifiée afin d'indiquer plusieurs particularités auxquelles il faut prêter attention.

Tout d'abord, ce scénario télé-opéré présente une importante flexibilité concernant sa séquence de tâches. En effet, comme indiqué dans le Tableau 5.1, l'utilisation de la télé-opération permet d'avoir un contrôle humain sur le déroulement de l'intervention, et différentes décisions peuvent être prises. Par exemple, si un insert est démonté et remplacé mais ne nécessite qu'une maintenance légère, il est possible de l'effectuer dans la foulée en emportant l'insert dans une zone présentant des débits de dose plus faibles. Dans le scénario automatisé, un insert enlevé est rapporté dans la cellule de stockage quel que soit son état et l'éventuelle maintenance fait l'objet d'une autre intervention.

De même, en cas de maintenance très légère (problème de connexion ou de positionnement par exemple), un remplacement n'est peut-être même pas nécessaire, et la réparation peut être effectuée directement sur le point focal où se déroule

5.2. Données pour la planification d'interventions dans le Super-FRS

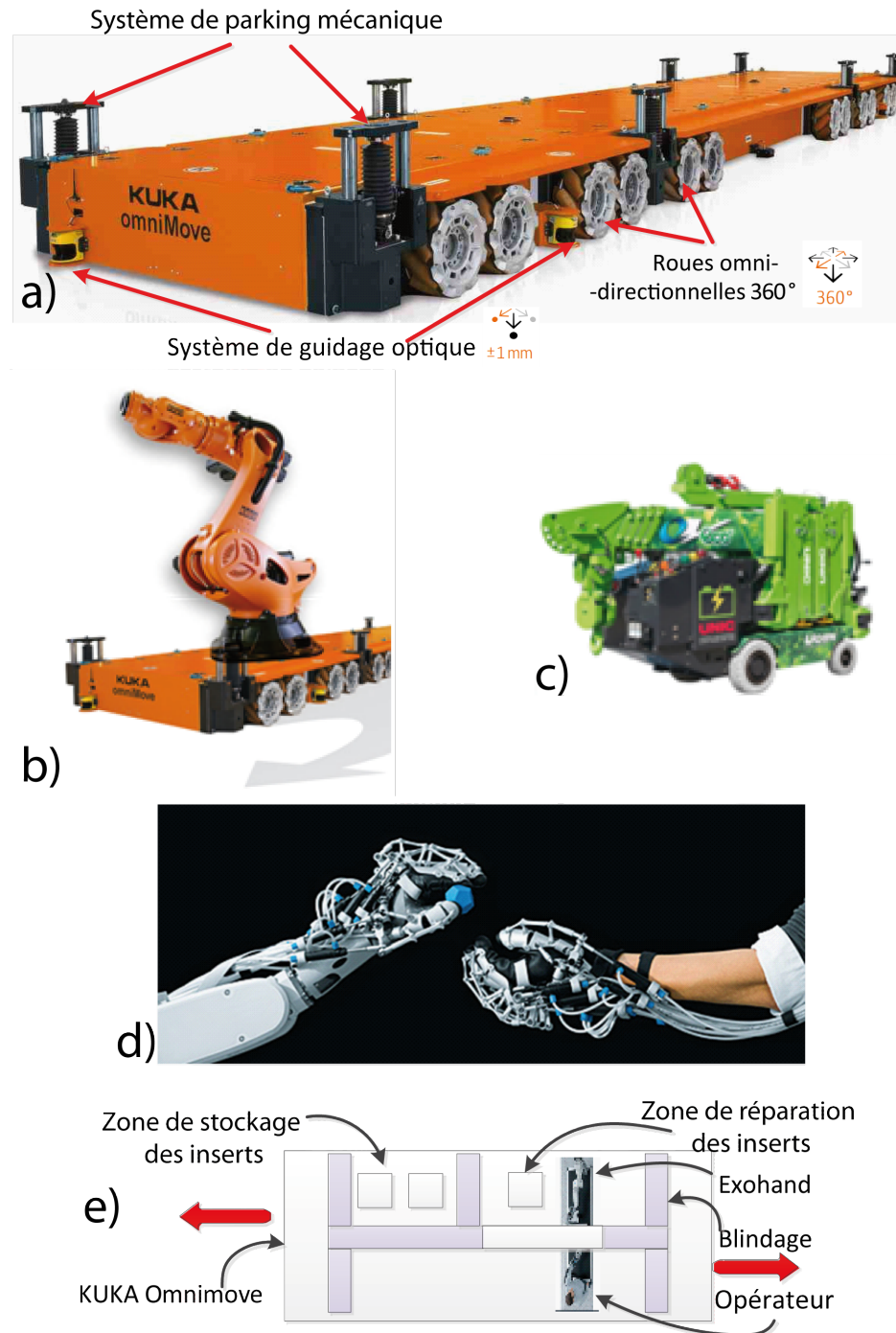


Figure 5.9 – Les outils robotisés ou télé-opérés utilisés dans les trois scénarii : **a)** Plateforme KUKA *omnimove* (tous scénarii) **b)** Plateforme *omnimove* avec bras automatisé (scénarii 1 et 3) **c)** Grue télé-opérée UNIC Eco-095 (tous les scénarii) **d)** Dispositif de téléopération Festo *Exo-Hands* (scénarii 2 et 3) **e)** Schéma de la plateforme *omnimove* telle qu'utilisée dans une des variantes du scénario 2 avec l'*Exo-Hands* et l'opérateur (dans une cabine blindée) sur la plateforme elle-même, ainsi que deux zones pour la réparation et le stockage des inserts.

Scénario	Avantages	Inconvénients
Automatisé	• Pas de présence humaine donc pas de dose prise • Présence d'un système de secours en cas de panne (grue mobile) • Technologies déjà existantes dans l'industrie • Scénario le plus rapide	• Électronique embarquée sensible aux radiations • Coût important et modification du matériel nécessaire pour protéger l'électronique • Pas de contrôle humain une fois la séquence lancée • Tests de séquence nécessaires avant implémentation : peu pratique car l'installation est unique • Pas de maintenance rapide possible, uniquement montage et démontage des inserts • Transport de matériel radioactif obligatoire pour effectuer la maintenance
Télé-opéré	• La maintenance légère peut être effectuée sur place après démontage des inserts • Contrôle et jugement humain sur la situation : meilleure adaptation aux imprévus • Flexibilité importante du scénario : optimisation de la dose au cas par cas • Un coût moindre comparé aux scenarii automatisé et hybride	• Pas de système de secours en cas de panne • Le jugement humain est au centre de la procédure : une formation adéquate est importante • Les équipements envisagés ne sont pas encore testés et approuvés pour les circonstances d'intervention envisagées
Hybride	• Peu de dose prise par le personnel • La maintenance légère rapide est possible après démontage d'un insert	• Le coût le plus important en raison du matériel • Le contrôle humain sur le processus reste faible

Tableau 5.1 – Comparaison sommaire des trois scenarii envisagés pour la maintenance des inserts des points FPF2, FPF3 et FPF4 sur la ligne de faisceau du Super-FRS.

5.2. Données pour la planification d'interventions dans le Super-FRS

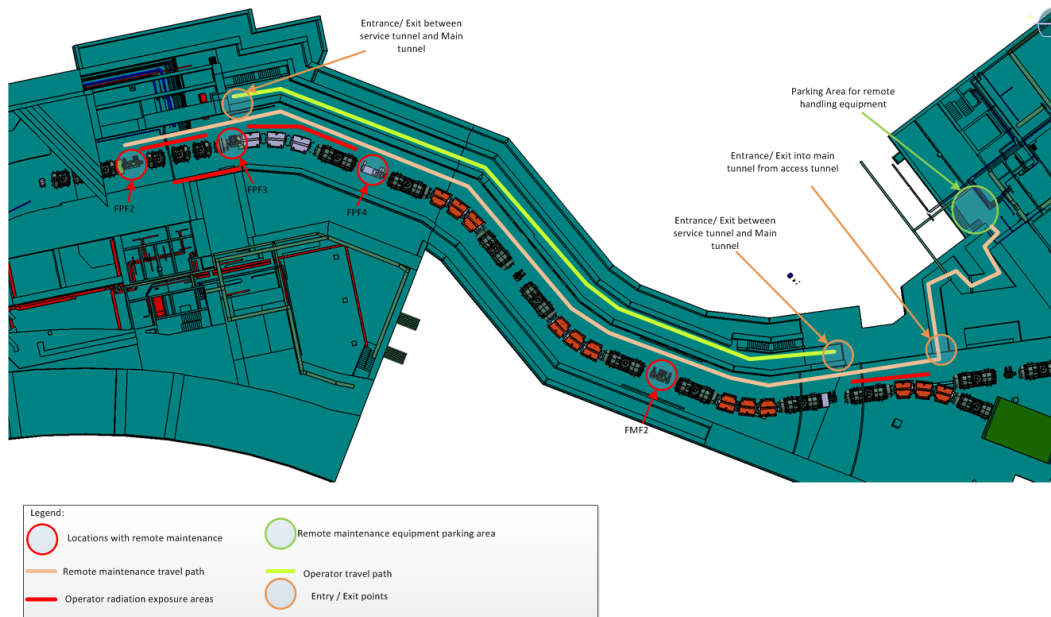


Figure 5.10 – Illustration de la géométrie du tunnel principal avec notamment le tunnel de service, les différents trajets effectués par les robots et les opérateurs ainsi que les stations de travail pour le point FPF2.

l'intervention. Cette flexibilité n'est pas possible dans le scénario automatisé car les dispositifs ne disposent que de certaines séquences pré-programmées et les effectuent sans qu'un humain puisse prendre la main (à l'exception de procédures comme un arrêt d'urgence).

Enfin, le placement des opérateurs au cours de l'intervention va également influencer sur les estimations des doses de radiations. En effet, ils devraient idéalement être placés sur la plateforme *omnimove* comme illustré en Figure 5.9, c'est-à-dire à environ 2 m de la ligne de faisceau, mais protégés derrière un blindage. Cette plateforme *omnimove* ainsi aménagée sera par la suite désignée sous le terme de *cellule chaude mobile*. Une autre option envisageable serait de les faire travailler au bout du tunnel de service, qui se situe en face du point focal FPF3 (à une distance d'environ 6 mètres), soit à une quinzaine de mètres des points FPF2 et FPF4. Ce scénario permettrait de garder les opérateurs derrière l'écran de protection qu'est le mur en béton du tunnel de service et à plus grande distance de la ligne de faisceau. Cependant, tout le travail devrait alors être effectué à l'aide de caméras, sans visibilité directe. Il est également possible de remarquer que ce scénario présente pour FPF2 l'avantage d'un chemin d'accès plus court et donc d'une dose plus faible que si l'opérateur doit aller jusqu'à 2 mètres du point FPF2. Une illustration de la future géométrie des installations ainsi que des différents trajets et stations de travail est donnée en Figure 5.10.

Les résultats que nous allons présenter et analyser se basent sur la version la plus simple et la moins “dosante” du scénario télé-opéré, c’est-à-dire un simple remplacement d’insert sans maintenance sur site. Les opérateurs travaillent depuis le tunnel de service, et l’insert usagé est simplement remplacé puis rapporté pour être stocké dans la cellule de confinement (ou cellule chaude) où d’éventuelles opérations de maintenance pourront être effectuées par la suite. Le choix de la position des opérateurs dans le tunnel de service vient du fait que le dimensionnement du blindage installé sur la cellule chaude mobile n’est à l’heure actuelle pas achevé, mais des comparaisons pourront ensuite être obtenues une fois de nouvelles simulations FLUKA effectuées.

La séquence des tâches du scénario d’intervention est la suivante :

- **1 - 2** : Déplacement automatique puis placement adéquat de la Cellule Chaude Mobile (CCM) transportant également le robot *Exo-Hands* (EH) près de FPF2.
- **3 - 4** : Déplacement automatique puis placement adéquat de la grue mobile (GM) près de FPF2.
- **5 - 7** : L’opérateur de l’*Exo-Hands* (opérateur EH) se rend au point FPF2, puis à l’aide du robot EH, inspecte les inserts et leurs alentours puis effectue les déconnexions nécessaires sur le panneau de raccordement avant de quitter la zone et regagner la sortie.
- **8 - 11** : L’opérateur de la grue (opérateur GM) se rend au point FPF2, puis à l’aide de la GM il extrait l’insert à remplacer de la ligne de faisceau et le place dans l’espace de stockage dédié sur la CCM. Toujours avec la GM, il place l’insert de remplacement sur la ligne de faisceau avant de quitter la zone pour regagner la sortie.
- **12 - 14** : L’opérateur EH retourne sur zone. Avec le robot EH, il reconnecte les câbles qu’il a précédemment enlevés avant de regagner la sortie.
- **15 - 16** : La GM est sortie de sa position de travail puis ramenée automatiquement à la sortie.
- **17** : Inspection de la GM à la recherche d’une éventuelle contamination radiologique. Décontamination si besoin.
- **18** : Retour automatique de la GM à sa position de stockage à l’abri du faisceau et des radiations.
- **19 - 20** : La CCM est sortie de sa position de travail puis ramenée automatiquement à la sortie.
- **21** : Inspection de la CCM à la recherche d’une éventuelle contamination radiologique. Décontamination si besoin.
- **22** : Retour automatique de la CCM à sa position de stockage à l’abri du faisceau et des radiations.

Telles qu’elles sont présentées dans cette séquence, les tâches s’enchaînent comme précisé dans le chapitre précédent avec des contraintes temporelles de type *before* ou *meets* dans une très large majorité des cas. En particulier, celles qui sont décrites dans un même élément de la liste doivent s’enchaîner directement afin de minimiser la durée d’exposition des opérateurs. On se trouve ici dans un cas où l’optimisation temporelle joue en effet un rôle crucial, car le personnel ne disposera que d’un seul

5.2. Données pour la planification d'interventions dans le Super-FRS

accès aux installations, et il ne sera pas possible de tester d'autres routes pour accéder aux différents points focaux.

C'est en ce qui concerne l'enchaînement entre les différents éléments de la liste présenté ci-dessus que les contraintes peuvent varier. La contrainte *before* est la plus généralement utilisée, mais certaines tâches peuvent s'effectuer en parallèle ou avec un certain degré de recouvrement en utilisant des contraintes comme *overlaps*, *is finished* ou encore *equals*, ce qui nécessitera un effort de collaboration à la fois lors de la planification et lors de l'exécution de l'intervention.

Nous reviendrons plus en détail sur ces différentes contraintes lors de la discussion sur les résultats obtenus, mais avant cela, il est important de préciser comment les doses reçues par les deux opérateurs impliqués ont été estimées.

5.2.3 Données de radioprotection et doses simulées

Comme nous l'avons mentionné lors de la description du Super-FRS en termes de radioprotection, plusieurs géométries FLUKA étaient à disposition pour simuler des scénarii d'intervention. En ce qui concerne les interventions aux points FPF2, FPF3 et FPF4, deux géométries ont été nécessaires : elles sont désignées à la GSI par *Teil A* et *Teil B*, soit simplement "partie A" et "partie B" en français. La partie A décrit le système entre les deux dégradeurs d'énergie (de FPF2 à FMF2) et la partie B représente la fin du séparateur principal et sa division en trois branches. Elles sont représentées toutes les deux en Figure 5.11.

À partir de ces géométries, de nouvelles simulations ont pu être effectuées en ajoutant quelques modifications mineures. Nous avons déjà mentionné le remplacement du sol compacté par un tunnel de service pour faciliter l'accès des opérateurs en les protégeant autant que possible des radiations. Dans la partie B, une chambre de protection a été ajoutée autour du dégradeur 2 afin d'atténuer les débits de dose. Ces nouvelles simulations ont été effectuées avec les paramètres suivants :

- 14 jours d'irradiation ;
- 4 différentes durées de refroidissement : 12 heures, 1 jour, une semaine et 30 jours (les résultats présentés par la suite utilisent les valeurs obtenues après un jour de refroidissement) ;
- type et énergies des faisceaux :
 - Partie A : palladium-114 (^{114}Pa) d'énergie 1,3 GeV ;
 - Partie B : antimoine-131 (^{131}Sb) d'énergie 1,0 GeV ;
- intensité des faisceaux :
 - Partie A ³³ : 3×10^{10} ions/s en FPF2 (dégradeur 1), 1×10^{10} ions/s en FPF3, 5×10^9 ions/s en FPF4 et 1×10^{10} ions/s en FMF2 ;
 - Partie B : 8×10^9 ions/s sur FMF2 (dégradeur 2).

³³. Une simulation FLUKA ne pouvant comporter qu'un seul faisceau simulé, quatre simulations ont été effectuées séparément pour la partie A et leurs résultats ont ensuite été sommés car les quatre points focaux qui s'y trouvent ne sont pas alignés.

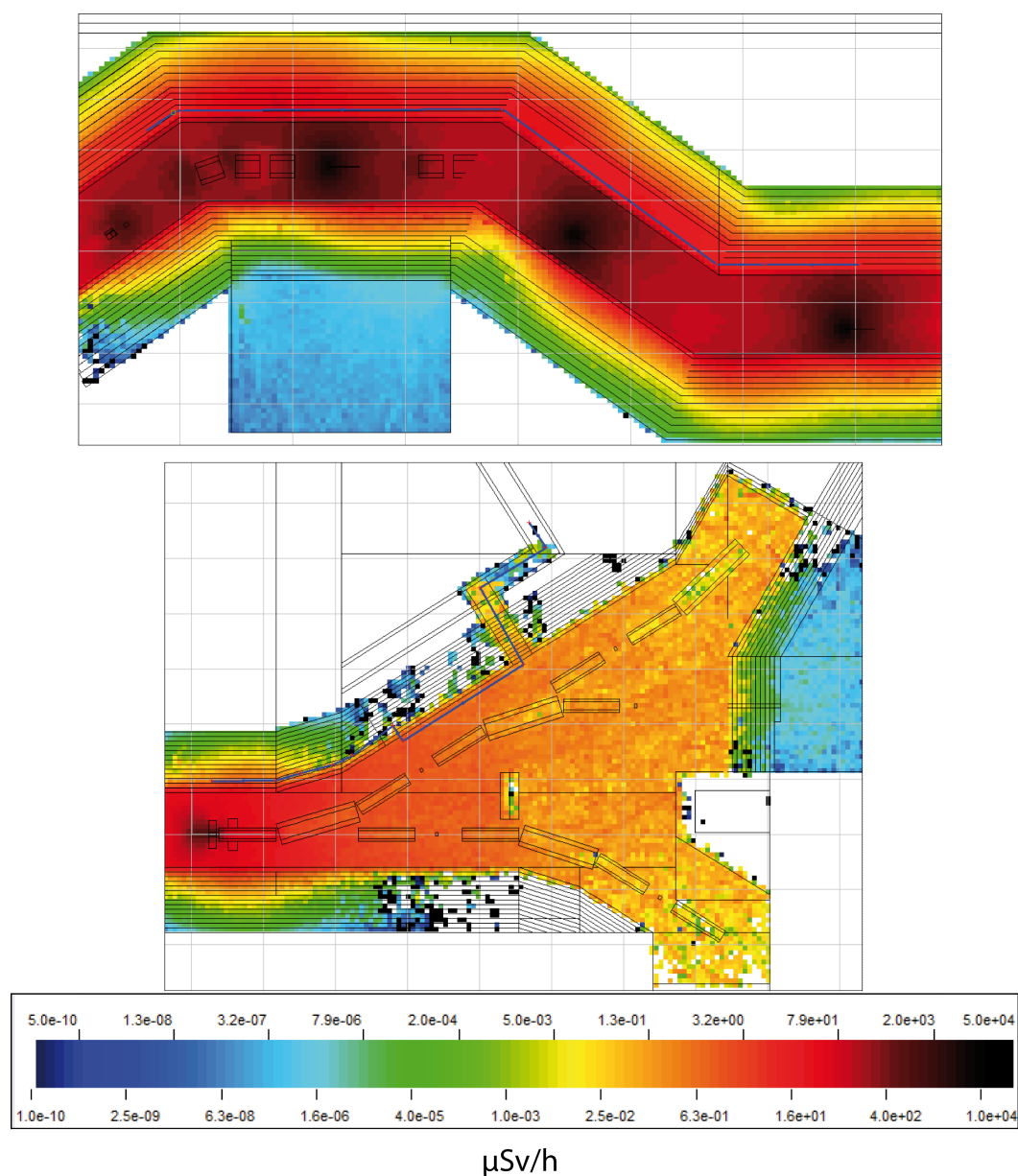


Figure 5.11 – Simulations effectuées avec FLUKA sur des géométries fournies par le service de radioprotection de la GSI (en haut la partie A et en bas la partie B). Ces simulations portent sur 14 jours d'irradiation suivis de 24 heures de refroidissement, soit une situation d'intervention rapide après arrêt des faisceaux, typiquement pour un arrêt technique court. Les simulations de trajectoires (en bleu) ont été effectuées à l'aide d'un planificateur 2D développé au sein du service de radioprotection du CERN par C. Theis.

5.2. Données pour la planification d'interventions dans le Super-FRS

Il n'existe aucun outil commercial pour exploiter des résultats obtenus avec FLUKA. Au CERN, deux outils en cours de développement et non distribués sont utilisables : nous avons rapidement évoqué en fin de chapitre 2 (section 2.4.2) les travaux de T. Fabry et al. [Fabry 2013, Fabry 2014] et son développement d'un logiciel prototype appelé *RADIJS*. Il y propose notamment un modèle formalisé pour calculer les doses de radiations suivant une trajectoire.

Cependant, le développement de *RADIJS* est encore en cours et la puissance du matériel informatique nécessaire à son utilisation sur des géométries de tailles importantes comme celle de TCC2 également abordée dans le chapitre 2 ou celles du Super-FRS ont rendu son utilisation difficile pour ce cas d'étude. Ces problèmes étaient regrettables étant donné l'apport que peut constituer la visualisation en trois dimensions du champ de radiations superposé à la géométrie, en particulier dans des zones d'intervention où la trajectoire choisie peut influencer de façon importante sur la dose reçue.

Nous avons donc estimé les doses équivalentes reçues dans nos scénarii par les opérateurs à l'aide d'un planificateur d'interventions en deux dimensions : *IVPlanner 2.0.0*, développé par C. Theis du groupe de radioprotection du CERN, qui est également à l'origine de l'outil SimpleGeo utilisé pour développer les géométries FLUKA. Comme illustré en Figure 5.11, cette application permet de représenter une projection de la géométrie ainsi que du champ de radiations en deux dimensions, à une hauteur sélectionnée par l'utilisateur. Dans les futures installations du Super-FRS, la ligne de faisceau sera placée à deux mètres de hauteur, et nous avons opté dans la planification de nos interventions pour une hauteur de 1,50 m, ce qui correspond à la hauteur de la poitrine d'une personne de taille moyenne.

Dans nos simulations, *IVPlanner 2.0.0* a été utilisé pour estimer les doses reçues lors des tâches dynamiques, c'est-à-dire les trajets des opérateurs entre l'entrée du Super-FRS dans la partie B et la station de travail en bout de tunnel dans la partie A. Il permet également de récupérer des valeurs ponctuelles de débit de dose, à partir desquelles notre prototype d'application peut estimer les doses reçues lors des tâches statiques une fois leurs durées estimées.

Le Tableau 5.2 récapitule les débits de dose aux deux stations de travail envisagées pour les opérateurs, ainsi que les doses estimées pour les différentes activités. Pour les activités statiques, les durées ont été estimées par le personnel de la GSI actuellement en charge de la maintenance sur le FRS et qui travaille sur les solutions envisagées pour le futur Super-FRS. Les vitesses de déplacement ont été choisies volontairement basses (entre 1 et 3 km/h) pour les trajets afin d'anticiper le fait que les opérateurs peuvent être amenés à transporter du matériel ou à se mouvoir plus lentement qu'un marcheur moyen au sein des installations où l'espace sera limité. Les valeurs obtenues seront donc nécessairement pessimistes. Pour les activités dynamiques dosantes, la dose est simulée à l'aide du planificateur 2D. Sinon, la durée estimée et le débit de dose simulé à la station de travail sont utilisés.

Pour un scénario et un opérateur donnés, il devient alors possible d'estimer les doses individuelles et collective globales, avec un algorithme simple qui est implémenté dans l'application prototype qui a été utilisée pour obtenir les résultats. Une

Débits de dose	• Station 1 : à 2 m de FPF2 • Station 2 : bout du tunnel	• 10.35 $\mu Sv/h$ • 10.35 $\mu Sv/h$
Tâches statiques	Durée estimée	Dose estimée
Déconnexion ou connexion d'insert	10 min	• Station 1 : 49.0 μSv • Station 2 : 1.725 μSv
Insertion ou retrait d'insert	30 min	• Station 1 : 147.0 μSv • Station 2 : 5.175 μSv
Tâches dynamiques	Vitesse de déplacement	Dose estimée
Trajet Entrée - Station 1	• 1 km/h • 2 km/h • 3 km/h	• 3.78 μSv • 1.89 μSv • 1.27 μSv
Trajet Entrée - Station 2	• 1 km/h • 2 km/h • 3 km/h	• 1.73 μSv • 0.86 μSv • 0.58 μSv

Tableau 5.2 – Estimations, à partir des simulations FLUKA, des doses reçues lors des tâches du scénario télé-opéré ainsi que des débits de doses simulés aux points des installations où sont effectuées les tâches statiques. Il faut noter que les débits de doses de la Station 1 sont donnés sans le blindage mobile placé sur la plateforme *omnimove* car il n'a pas encore été dimensionné ni inclus dans les simulations FLUKA. Il s'agit donc de valeurs pessimistes.

fois la séquence de tâches créée, les contraintes entrées et le tout optimisé à l'aide de la DSM collaborative, il ne reste plus qu'à procéder de la façon suivante pour chaque tâche que l'opérateur doit effectuer :

- 1 On vérifie si la tâche est localisée dans une zone radioactive (en cas de "non", on passe à l'activité suivante) et si oui, si elle possède ou non une tâche précédente dans la même zone.
- 2 Si oui, on vérifie l'enchaînement des deux tâches : s'il est direct, on passe à l'estimation de la dose reçue au cours de l'activité (étape 3). S'il y a un délai, on calcule la dose reçue en utilisant le débit de dose simulé avec FLUKA.
- 3a Si la tâche est dynamique : sa dose est simulée par trajectoire avec *IVPlaner* et si un délai a été trouvé et une dose calculée en étape 2, celle-ci est ajoutée.
- 3b Si la tâche est statique : sa dose est calculée à l'aide du débit de dose simulé avec FLUKA et la durée estimée par les opérateurs. Si un délai a été trouvé et une dose calculée en étape 2, celle-ci est ajoutée.
- 4 La dose calculée en étape 3 est ajoutée à la dose cumulée reçue par l'opérateur et on peut passer à l'étape suivante.
- 5 La dose collective de l'intervention est obtenue en sommant les doses individuelles totales de tous les opérateurs.

Nous avons à présent décrit les différentes données que nous avons utilisées pour simuler les interventions de remplacement d'inserts au point FPF2 du Super-FRS.

5.3. Résultats et discussions : comment planifier collaborativement ?

Nous disposons d'une séquence d'activités, d'un ensemble de ressources humaines et robotiques ainsi que de données de radioprotection simulées. Il est à présent temps de passer à la description de notre procédure d'obtention des résultats, ainsi qu'à l'analyse de ces derniers.

5.3 Résultats et discussions : comment planifier collaborativement ?

5.3.1 Utilisation d'un prototype d'application pour l'étude de cas

Afin de mettre en œuvre la méthodologie de planification collaborative présentée dans cette thèse, un prototype d'application codé en langage Python a été développé. Il ne dispose pas pour l'instant d'un nom défini, même si certaines propositions ont été avancées comme *Interveneering* (combinaison de *intervention* et *engineering*) ou encore *MatPlan* (pour *Matricial Planner*). Cette application est essentiellement une interface graphique (développée avec la librairie standard de Python Tk-Inter) placée sur la structure de données décrite dans le chapitre précédent³⁴, et son fonctionnement est basé sur les algorithmes qui y ont également été développés et sont donnés plus en détail dans l'annexe E.

En termes de fonctionnalités, elle permet de créer interventions et activités (cf. Figure 5.12), de rentrer des informations temporelles (durées estimées, dates de début et de fin d'intervention, délais) ainsi que les contraintes temporelles qui utilisent l'algèbre d'intervalles d'Allen. Tous les calculs liés aux processus décrits dans le chapitre 4, c'est-à-dire la propagation des contraintes, la détection des conflits, la recherche de compromis et l'optimisation de la séquence avec DSM, sont faits en arrière-plan, et des solutions sont proposées aux utilisateurs sous deux formes : un écran de rapport qui résume les résultats, leurs durées estimées et les données de radioprotection associées (cf. Figure 5.13), et une autre vue qui permet de consulter ces différentes solutions sous forme de diagramme de Gantt (cf. Figure 5.17 dans la section suivante).

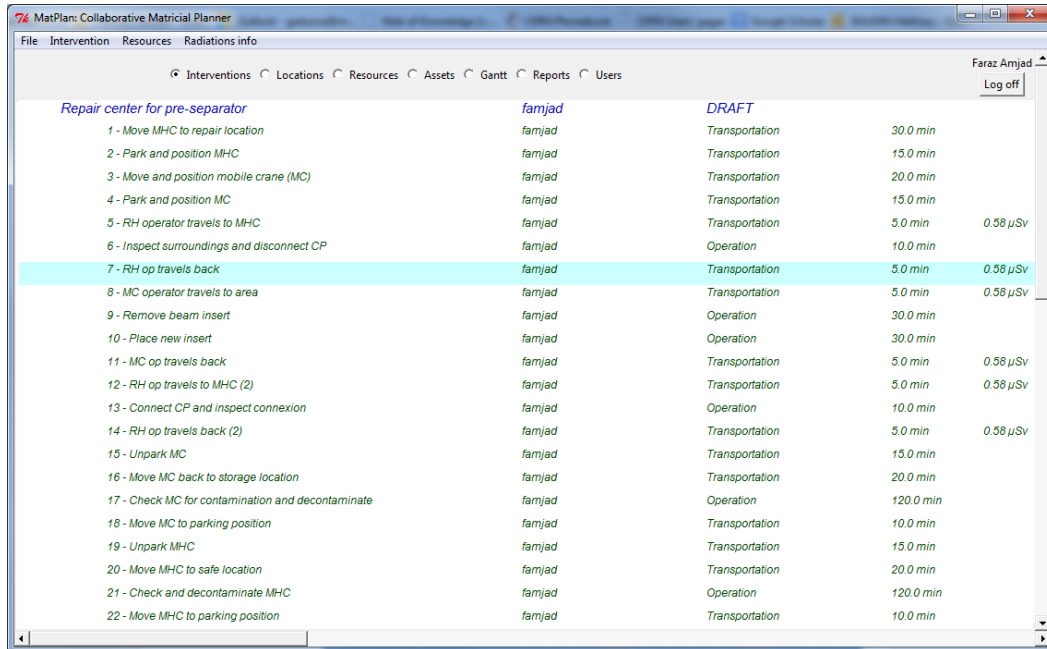
Une interface rudimentaire de gestion des ressources a été également développée. Elle permet de créer différents types de ressources qui vont intervenir notamment dans les calculs de doses de radiations anticipées. Ces différents types sont :

- ressources humaines (opérateurs, agents de radioprotection) ;
- robots (ici : grue mobile et *omnimove*) ;
- lieux (ici : les deux stations de travail) ;
- équipements (inserts, aimants, pompes, etc.) ;
- outils (échelles, échafaudages, etc.) ;
- consommables (ampoules, câbles, cartouches de traitement d'eau, etc.).

Dans l'immédiat, ces six types ne sont pas tous utiles à un même niveau. Dans notre scénario, les plus importants sont les ressources humaines qui peuvent recevoir une dose de radiations, et les lieux, qui peuvent en émettre. Un équipement, une fois

34. Section 4.3.1, illustration en Figure 4.7.

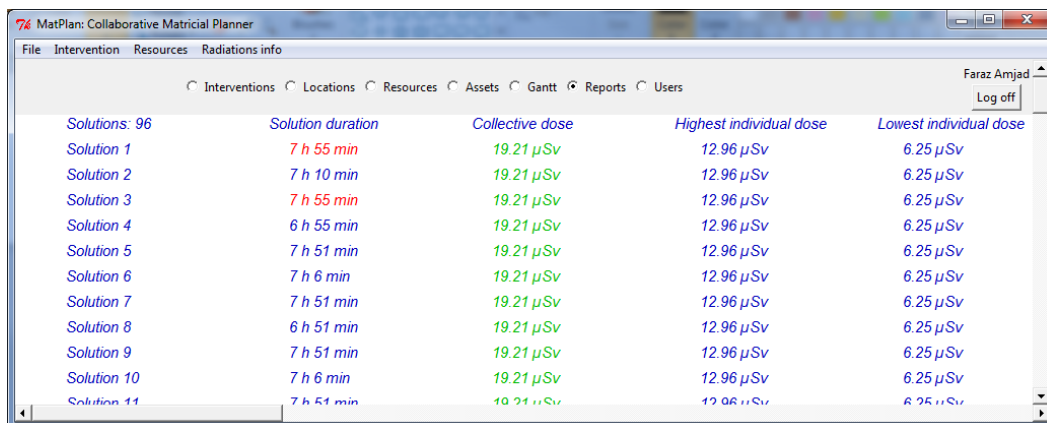
Chapitre 5. Application : comparaison de scenarii d'intervention



The screenshot shows the 'Interventions' tab in the MatPlan software. The user 'Faraz Amjad' is logged in. The title is 'Repair center for pre-separator'. The status is 'DRAFT'. The table lists 22 activities with columns for activity name, user, operation type, duration, and radiation dose.

Activity	User	Operation	Duration	Dose (μSv)
1 - Move MHC to repair location	famjad	Transportation	30.0 min	
2 - Park and position MHC	famjad	Transportation	15.0 min	
3 - Move and position mobile crane (MC)	famjad	Transportation	20.0 min	
4 - Park and position MC	famjad	Transportation	15.0 min	
5 - RH operator travels to MHC	famjad	Transportation	5.0 min	0.58 μSv
6 - Inspect surroundings and disconnect CP	famjad	Operation	10.0 min	
7 - RH op travels back	famjad	Transportation	5.0 min	0.58 μSv
8 - MC operator travels to area	famjad	Transportation	5.0 min	0.58 μSv
9 - Remove beam insert	famjad	Operation	30.0 min	
10 - Place new insert	famjad	Operation	30.0 min	
11 - MC op travels back	famjad	Transportation	5.0 min	0.58 μSv
12 - RH op travels to MHC (2)	famjad	Transportation	5.0 min	0.58 μSv
13 - Connect CP and inspect connexion	famjad	Operation	10.0 min	
14 - RH op travels back (2)	famjad	Transportation	5.0 min	0.58 μSv
15 - Unpark MC	famjad	Transportation	15.0 min	
16 - Move MC back to storage location	famjad	Transportation	20.0 min	
17 - Check MC for contamination and decontaminate	famjad	Operation	120.0 min	
18 - Move MC to parking position	famjad	Transportation	10.0 min	
19 - Unpark MHC	famjad	Transportation	15.0 min	
20 - Move MHC to safe location	famjad	Transportation	20.0 min	
21 - Check and decontaminate MHC	famjad	Operation	120.0 min	
22 - Move MHC to parking position	famjad	Transportation	10.0 min	

Figure 5.12 – Capture de l'écran principal détaillant les activités des interventions, le nom d'utilisateur qui en est responsable, leurs durées estimées et si nécessaire la dose de radiation correspondante simulée.



The screenshot shows the 'Reports' tab in the MatPlan software. The user 'Faraz Amjad' is logged in. The table lists 11 solutions with columns for solution name, duration, collective dose, highest individual dose, and lowest individual dose.

Solution	Solution duration	Collective dose	Highest individual dose	Lowest individual dose
Solutions: 96				
Solution 1	7 h 55 min	19.21 μSv	12.96 μSv	6.25 μSv
Solution 2	7 h 10 min	19.21 μSv	12.96 μSv	6.25 μSv
Solution 3	7 h 55 min	19.21 μSv	12.96 μSv	6.25 μSv
Solution 4	6 h 55 min	19.21 μSv	12.96 μSv	6.25 μSv
Solution 5	7 h 51 min	19.21 μSv	12.96 μSv	6.25 μSv
Solution 6	7 h 6 min	19.21 μSv	12.96 μSv	6.25 μSv
Solution 7	7 h 51 min	19.21 μSv	12.96 μSv	6.25 μSv
Solution 8	6 h 51 min	19.21 μSv	12.96 μSv	6.25 μSv
Solution 9	7 h 51 min	19.21 μSv	12.96 μSv	6.25 μSv
Solution 10	7 h 6 min	19.21 μSv	12.96 μSv	6.25 μSv
Solution 11	7 h 51 min	19.21 μSv	12.96 μSv	6.25 μSv

Figure 5.13 – Capture de l'écran des rapports qui liste les différentes solutions calculées par l'application, leurs durées respectives ainsi que les doses individuelles et collectives estimées.

5.3. Résultats et discussions : comment planifier collaborativement ?

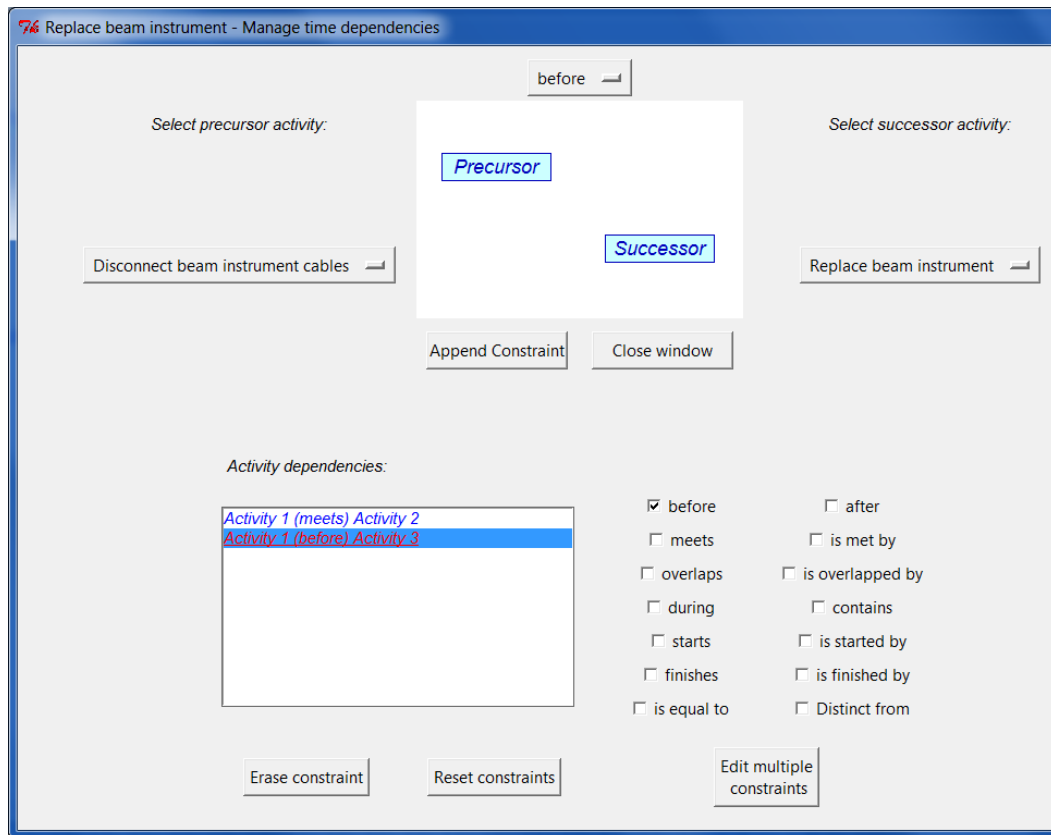


Figure 5.14 – Fenêtre permettant d’entrer les contraintes temporelles entre tâches.

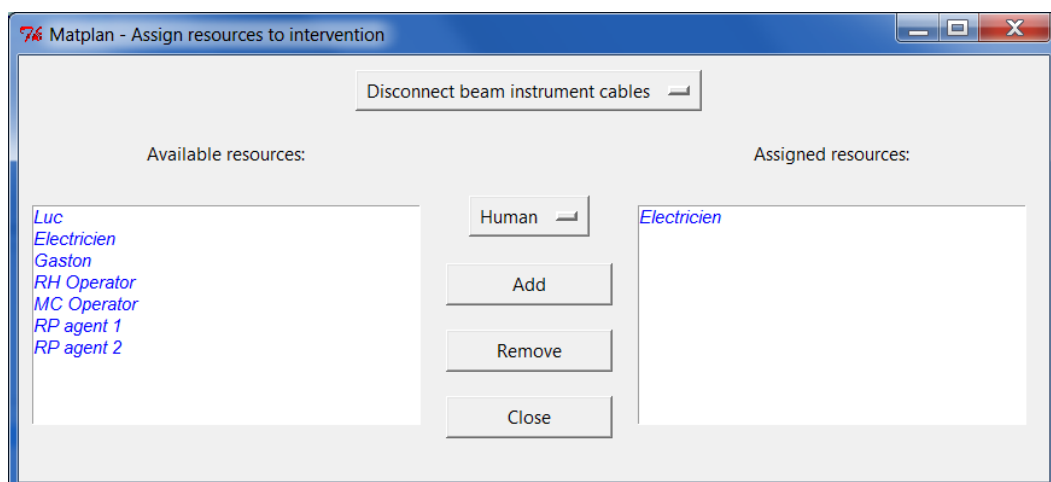


Figure 5.15 – Fenêtre permettant d’associer différentes ressources (humaines, robots, routes d’accès etc.) aux activités.

activé, peut également devenir une source de radioactivité, et nous aborderons cette notion dans les développements futurs à ajouter à notre scénario. Les robots sont également à prendre en compte puisqu'ils interviennent dans notre scénario. La dose de radiation qu'ils reçoivent est estimée de la même façon que pour un humain dans l'application, mais leur tolérance bien plus importante en fait un facteur secondaire lorsque les travaux sont effectués sans faisceau circulant dans les accélérateurs. Les outils et consommables ont pour une existence relativement symbolique, et leur implémentation n'est que limitée à l'heure actuelle.

L'ajout des données de radioprotection se fait dans cette application selon deux mécanismes différents :

- les activités dynamiques sont simulées entièrement avec *IVPlaner* et une dose qui sera distribuée aux ressources humaines et robotiques y prenant part leur est assignée ;
- les lieux présentant des débits de dose non nuls et où des activités statiques seront effectuées sont associés à leur débit de dose ambiant simulé avec FLUKA et obtenu avec *IVPlaner*.

Les diverses figures de cette section permettent d'avoir un aperçu de la façon dont les données ont été saisies dans *MatPlan - Interveneering*. Un développement important reste à faire, notamment pour la saisie des contraintes et la proposition des compromis aux utilisateurs. Cette application est un prototype hautement expérimental et son développement sera poursuivi jusqu'à la fin de ce travail de thèse, et très probablement également après. Passons à présent aux résultats obtenus ainsi qu'à la partie la plus importante de cette étude, à savoir leur analyse et les nombreuses discussions associées.

5.3.2 Présentation des résultats

Contraintes et optimisation de la durée

La durée totale de l'intervention s'étale, avec le jeu de contraintes simulées, entre 6 h 25 min et 7 h 55 min, soit à peu près une journée complète de travail sur l'installation. La matrice des contraintes utilisées pour parvenir à ce résultat est donnée en Figure 5.16, et les deux diagrammes de Gantt correspondant à ces solutions extrêmes sont fournis en Figure 5.17. Le nombre total de solutions obtenues est de 96, dont certaines (notamment la plus rapide) imposent des compromis sur certaines contraintes.

Deux remarques s'imposent de prime abord : premièrement, le jeu de contraintes utilisé a été collecté auprès du personnel de la GSI chargé d'intervenir dans ces futures installations, et il est par conséquent déjà bien optimisé notamment pour réduire les doses reçues. Et effectivement, nous verrons que l'estimation des doses individuelles et collective donne un résultat invariant, et qu'il serait nécessaire d'introduire des délais supplémentaires pour rendre la planification non optimale.

Ensuite, les informations temporelles dont nous disposons à ce stade sont encore hautement spéculatives, à la fois en termes de durées estimées des tâches et en

5.3. Résultats et discussions : comment planifier collaborativement ?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1 - Déplacement CCM à FPF2 (20 min)																						
2 - Mise en position CCM (15 min)	m																					
3 - Déplacement GM à FPF2 (20 min)		b m																				
4 - Mise en position GM (15 min)			m																			
5 - Aller opérateur CCM (5 min)			m o fi	m																		
6 - Inspection et déconnexion câbles (10 min)					m																	
7 - Retour opérateur CCM (5 min)						m																
8 - Aller opérateur GM (5 min)						b	o e															
9 - Démontage insert (30 min)							m															
10 - Insertion nouvel insert (30 min)								m														
11 - Retour opérateur GM (5 min)									m													
12 - Aller opérateur CCM (2) (5 min)								b	o e													
13 - Reconnexion câbles et inspection (10 min)										m												
14 - Retour opérateur CCM (2) (5 min)											m											
15 - Préparation CCM pour retour (15 min)												b										
16 - Retour CCM à l'entrée (20 min)													m									
17 - Inspection radioprotection CCM (2h)														b								
18 - Retour CCM au parking protégé (10 min)															b m							
19 - Préparation GM pour retour (15 min)																b						
20 - Retour GM à l'entrée (20 min)																		m				
21 - Inspection radioprotection GM (2h)																			b			
22 - Retour GM au parking protégé (10 min)																				b m		

Figure 5.16 – Matrice de contraintes utilisée pour le scénario d’intervention télé-opérée de remplacement d’un insert au point FPF2 du Super-FRS. Pour rappel : CCM est la “cellule chaude mobile” transportant le robot *Exo-Hands* et GM est la “Grue Mobile”.

Chapitre 5. Application : comparaison de scenarii d'intervention

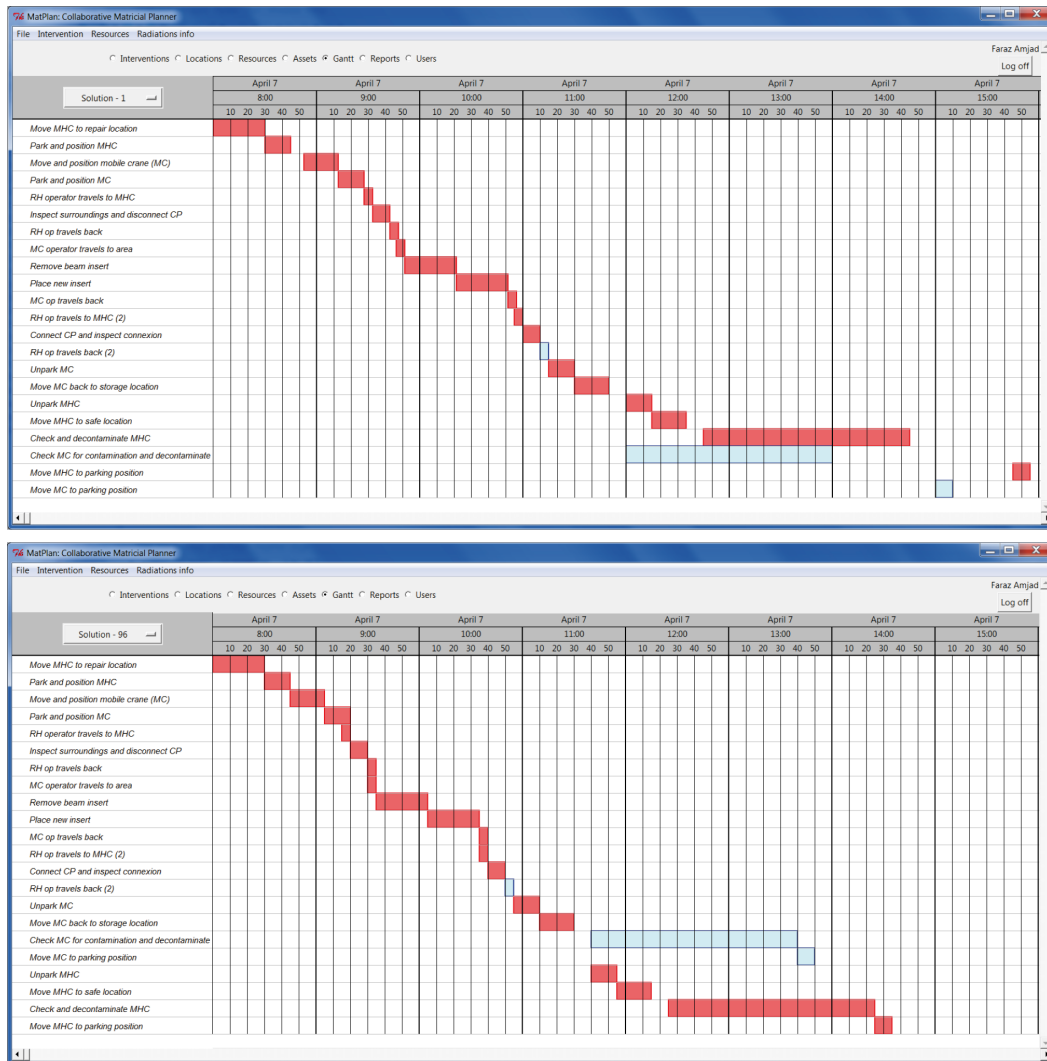


Figure 5.17 – Diagrammes de Gantt des deux solutions extrêmes en termes de durées (7h55 au-dessus, 6h25 en dessous).

5.3. Résultats et discussions : comment planifier collaborativement ?

termes de délais éventuels entre celles-ci lorsqu’une contrainte de type “*before*” est utilisée. En effet, certaines tâches peuvent avoir été surestimées en ce qui concerne leur durée, comme le placement en position de travail des engins utilisés (estimé par les opérateurs à 10 minutes compte tenu de la lenteur des déplacements dans des installations contraintes en espace, et de la précision du placement à proximité de la ligne de faisceau). Les trajets des opérateurs ont été également estimés à 5 minutes chacun, mais ils n’ont que 140 mètres à parcourir ce qui, même à une vitesse relativement faible de 3 km/h, ne leur prendrait qu’environ 3 minutes seulement pour se rendre à la station 1 (à deux mètres de FPF2) qui est la plus lointaine. En revanche, les tâches télé-opérées de branchement et débranchement ainsi que de montage et démontage des inserts pourraient prendre plus longtemps que les 10 et 30 minutes respectives qui leur sont estimées, notamment lors des premières interventions où les opérateurs ne seront pas encore totalement habitués aux procédures.

Pour ce qui est des délais entre tâches, ils sont encore largement ajustables : comme précisé dans le chapitre précédent, en l’absence d’information précise sur une contrainte, des valeurs par défaut sont utilisées dans le programme. Par exemple, dans le cas d’une contrainte “*before*”, cette valeur sera une fois et demie la durée de l’activité effectuée avant le délai. Dans notre étude, cela donne énormément d’importance aux dernières tâches de la séquence, car l’inspection de radioprotection et l’éventuelle décontamination du matériel a été estimée à deux heures quand les autres tâches ne dépassent pas la demi-heure. Sachant que ces deux tâches de radioprotection ont été saisies avec une contrainte de type (b, m) (“*before*” ou “*meets*”) vis-à-vis de leur tâche suivante (reconduire chaque engin robotisé à son parking protégé des radiations), une différence d’une heure apparaît entre la durée globale de deux scénarii.

Si l’on met cet important artefact de côté, on constate donc que sur les 1 h 30 min de différence entre les deux scénarii extrêmes, 30 minutes peuvent être gagnées ou perdues selon l’optimisation des contraintes restantes. C’est donc au niveau de l’optimisation des contraintes ainsi que du choix du scénario à adopter que le travail collaboratif va prendre tout son sens dans ce cas d’étude. Car comme nous allons le voir à présent, l’intervention est relativement simple à optimiser du point de vue de la radioprotection et aucun gain ne peut réellement être effectué du point de vue de l’agencement des tâches.

Doses reçues estimées

Comme nous l’avons déjà laissé paraître dans les paragraphes précédents, l’intervention telle que nous l’avons décrite est déjà bien optimisée pour la radioprotection, du moins en ce qui concerne l’enchaînement des tâches qui résultent en une prise de dose pour les opérateurs. Autrement dit, l’optimisation temporelle n’a ici pas d’effet sur les doses anticipées car pour chaque tâche à effectuer, nos deux opérateurs parcourent le trajet aller, effectuent l’activité elle-même puis le trajet retour sans aucun flottement (les tâches s’enchaînent uniquement avec des contraintes “*meets*”, comme indiqué en Figure 5.16).

Chapitre 5. Application : comparaison de scenarii d'intervention

Doses simulées	Stations	Trajets 1 km/h	Trajets 2 km/h	Trajets 3 km/h
Doses Collectives	Station 1	409,35 μSv	398,01 μSv	394,23 μSv
	Station 2	26,11 μSv	20,89 μSv	19,21 μSv
Opérateur CCM	Station 1	111,79 μSv	104,23 μSv	101,71 μSv
	Station 2	10,85 μSv	7,37 μSv	6,25 μSv
Opérateur GM	Station 1	297,56 μSv	293,78 μSv	292,52 μSv
	Station 2	15,26 μSv	13,52 μSv	12,96 μSv

Tableau 5.3 – Tableau récapitulatif des estimations de doses individuelles et collectives globales anticipées pour le scénario télé-opéré de remplacement d'insert au point FPF2 du Super-FRS.

Le Tableau 5.3 récapitule les différentes doses individuelles et collectives anticipées pour ce scénario d'intervention. On peut constater qu'elles sont faibles (de 10 à 20 μSv par opérateur, de 20 à 26 μSv de dose collective) à la station de travail numéro 2 (dans le tunnel de service) comme l'on pouvait s'y attendre avec la protection du mur. Pour la station numéro 1, les doses sont logiquement bien plus élevées, avec une dose individuelle de 100 μSv environ pour l'opérateur de la cellule chaude mobile et de 300 μSv environ pour celui de la grue mobile, soit une dose collective de l'ordre de 400 à 410 μSv . Nous pouvons également constater que les trajets et leur vitesse influe assez peu sur les doses globales, et en déduire que les tâches statiques plus longues et dans les zones à débits plus élevés déterminent l'essentiel (environ 95 %) des doses reçues.

Ces résultats préliminaires peuvent être analysés plus avant, et les solutions d'amélioration ne manquent pas. De plus, comme nous pouvons le voir jusqu'ici, la collaboration ne joue qu'un rôle assez faible jusqu'à présent, et sa prise en compte peut fournir des pistes de travail intéressantes.

5.3.3 De nombreux facteurs d'amélioration

Affiner les données de radioprotection

Tout d'abord, concernant la radioprotection, il est clair que les simulations FLUKA peuvent (et doivent) être poussées plus avant. En effet, le scénario avec le travail en station 2 débouche sur des doses très faibles et apparemment intéressantes, mais il n'est en pratique pas réalisable en l'état. En effet, une station de travail devrait être installée au bout du tunnel de service, avec notamment des systèmes de visualisation et la partie maître du système *Exo-Hands*, le tout contenant de l'électronique. Ces éléments ne pouvant en aucun cas demeurer si près de la ligne de faisceau en période d'opération en raison des dommages causés par les rayonnements ionisants sur l'électronique, il faudrait ajouter à notre intervention des tâches de transport et d'installation de ce poste de travail, ce qui pourrait augmenter significativement les doses anticipées.

5.3. Résultats et discussions : comment planifier collaborativement ?

Le scénario avec travail au poste 1 à deux mètres du FPF2 est plus réaliste, sachant que le système *Exo-Hands* dans sa totalité (système de commandes et système asservi) serait transporté sur la plateforme *omnimove* constituant la cellule chaude mobile. En revanche, avec des doses individuelles de l'ordre de 100 et 300 μSv par opérateur (respectivement celui en charge de la cellule chaude puis celui de la grue mobile), et un total d'au moins 15 interventions annuelles sur les différents inserts du FPF2 et des autres points focaux, on atteindrait des doses de 1,5 mSv pour l'opérateur de la CCM et de 4,3 mSv pour celui de la grue. Le développement d'un blindage (actuellement en cours de dimensionnement) à placer sur la CCM permettrait de réduire significativement ces doses, et de nouvelles simulations FLUKA seront donc nécessaires pour affiner ces estimations.

Enfin, nous pouvons remarquer qu'une réduction de nos estimations de doses reçues est également possible en considérant différents temps de refroidissement des installations. Si le calendrier d'opérations du futur Super-FRS le permet, effectuer l'intervention au bout d'une semaine plutôt qu'un jour produira des estimations bien inférieures (données pour une intervention en station 1 à 2 m du point FPF2 et des trajets effectués à 3 km/h) :

- Débit de dose en station 1 : 140 $\mu Sv/h$;
- Dose opérateur CCM : 47,65 μSv ;
- Dose opérateur GM : 140,49 μSv ;
- Dose collective : 188,14 μSv ;

Une rapide consultation avec le personnel de la GSI nous a cependant appris que le scénario d'un jour de refroidissement demeurerait le plus probable, et le travail sur le dimensionnement puis la simulation du blindage devrait être prioritaire.

Affiner les données temporelles

Nous avons vu que l'optimisation temporelle de notre plan d'intervention pouvait introduire jusqu'à 30 minutes de différence dans la durée globale entre deux scénarii différents, sans tenir compte de l'heure de délai obtenue avec une contrainte "*before*" entre les deux dernières tâches. L'estimation de la durée globale de l'intervention bénéficiera donc de l'apport de données de la part des opérateurs quant à leurs disponibilités et quant à la possibilité d'enchaîner les tâches le jour de l'intervention. Ce sont malheureusement des éléments qu'il est difficile d'anticiper dans ce travail, tant le développement du Super-FRS et des plans d'interventions en particulier n'en est qu'aux balbutiements.

Des données temporelles plus précises seront également utiles pour de meilleures estimations des doses anticipées. Nous pensons ici aux durées estimées des tâches statiques qui apportent la majorité de la dose reçue en cours d'intervention, car dans le cas présent, nous sommes justement dans la situation que nous avons décrite dans cette thèse comme ne devant pas être perçue comme une norme, à savoir une intervention où l'optimisation temporelle correspondra à l'optimum en termes de doses. En effet, un seul chemin d'accès est disponible. Et à moins d'utiliser un plus grand nombre d'opérateurs afin de réduire les doses individuelles (sans altérer

la dose collective), peu de scenarii alternatifs s'offrent à nous pour effectuer des comparaisons.

Nous pouvons en effet rappeler que la comparaison des scenarii est à la base de la méthode de travail que nous proposons dans ce travail de thèse. Tout en procédant à de nombreuses optimisations, qu'elles soient temporelles ou ALARA pour les radiations, nous avons pris le soin dans le chapitre 2 de mettre en garde contre une optimisation rationaliste trop limitante lorsqu'il s'agit de chercher une solution adéquate à un problème complexe. C'est dans cet esprit-là que nous introduisons la collaboration et le choix multicritère au cœur de notre méthodologie de travail, et c'est ce que nous allons enfin mettre en valeur dans ce cas d'étude où la collaboration n'est pourtant pas très étendue.

5.3.4 Vers une planification collaborative

Nous avons obtenu 96 solutions différentes avec l'ensemble de contraintes que nous avons utilisées (24 contraintes, dont 6 multiples). Les solutions s'étalent sur des durées de 6h25 à 7h55, ce qui laisse un large choix aux intervenants pour sélectionner leur scenario, sachant qu'ils sont tous équivalents en termes de doses anticipées.

Et c'est cette liberté de choix et de comparaison entre les solutions que nous considérons comme un des apports principaux de la DSM collaborative. Par opposition à une méthode plus classique de planification, elle cherche à simuler un large nombre de scenarii possibles avant de procéder à un choix, et non à obtenir un emploi du temps idéal qui risque d'être mis en défaut face aux réalités du terrain.

Par exemple, considérons le diagramme de Gantt de la solution la plus rapide, donné en Figure 5.17. Les contraintes temporelles utilisées y sont optimales : les opérateurs effectuent leurs trajets de façon parfaitement synchronisée (deux contraintes "*equals*" sont utilisées pour les paires de tâches 7-8 et 11-12 et la tâche 4 est terminée par la tâche 5), ce qui implique qu'ils seront à la fois totalement disponibles au moment de l'intervention, mais communiqueront de façon étroite et quasi-instantanée sur l'avancement de leurs tâches. Une telle situation ne semble pas extrêmement réaliste en pratique, et il y a peu de chance qu'un tel emploi du temps soit tenable. Et si un opérateur se déplace alors que l'autre n'a pas achevé son activité, des doses supplémentaires risquent alors d'être reçues.

Une telle situation est évitable si les opérateurs planifient eux-mêmes et ensemble l'intervention. Les ressources humaines, par opposition aux ressources spatiales ou matérielles, ne sont plus uniquement des unités assignées à une tâche, mais des ressources "*pensantes*"³⁵ ou plutôt "*intelligentes*", qui, en intervenant dans le processus de planification, sont capables d'identifier des situations optimales en théorie mais qui seront mises à mal en pratique. Ici, le scénario à adopter se trouve probablement parmi les solutions à durées intermédiaires, dont les contraintes sont plus simples à respecter en pratique, sans toutefois rajouter de durées tampons ou de tâches fictives comme dans les emplois du temps obtenus avec PDM ou la méthode de la chaîne critique.

35. Terme employé par le Pr. J.M. Ruiz, rappelle Pascal et son "roseau pensant".

5.4. Conclusions sur cette première étude

Le choix d'un scénario acceptable pour notre intervention au point FPF2 du Super-FRS passera nécessairement par la communication et la synchronisation entre nos deux opérateurs, deux éléments indispensables à la collaboration. Ils ne seront bien entendu pas seuls à effectuer le travail de planification. Ils devront également interagir avec les agents de radioprotection pour la décontamination des équipements (nous n'avons ici pas imposé de contrainte entre ces activités, mais si seul un agent est disponible, la durée globale de l'intervention en sera affectée), ainsi qu'avec les administrateurs du système de planification et le groupe en charge du Super-FRS.

D'autres interventions seront certainement programmées au cours du même arrêt technique, certaines impliqueront peut-être également nos opérateurs. Notre système n'inclut pour l'instant que les contraintes entre les activités d'une même intervention et pas les contraintes inter-interventions, mais cette fonctionnalité est en cours de développement. Il est en effet nécessaire de les prendre en compte, car dans notre environnement collaboratif, une intervention ne peut être considérée hors de son contexte à savoir le système d'accélérateurs de particules, le système de planification, les acteurs impliqués sur différents niveaux hiérarchiques, les activités à effectuer et les différentes contraintes qui les lient.

5.4 Conclusions sur cette première étude

Dans cet ultime chapitre, nous avons quitté le CERN pour la GSI. Parmi les systèmes d'accélérateurs de particules présents dans ses installations, nous avons isolé son séparateur de fragments, le FRS et en avons exposé les principes de fonctionnement.

Ce FRS est appelé à être remplacé dans un futur proche par un séparateur de fragments supraconducteur, le Super-FRS. Après en avoir également présenté les principales caractéristiques, notamment concernant la radioprotection, nous nous sommes attachés à décrire des interventions de maintenance sur des inserts placés sur les lignes de faisceau en des points spéciaux appelés points focaux. Parmi ces interventions, nous en avons détaillé une en particulier, consistant à effectuer le remplacement d'un insert au point focal FPF2 à l'aide d'un scénario utilisant des robots télé-opérés.

Notre étude a permis d'effectuer les toutes premières estimations de doses reçues lors de futures interventions dans le Super-FRS, ainsi que de commencer à travailler sur leur optimisation. Ces données seront utiles au groupe du Super-FRS afin de comparer ce scénario aux autres solutions, soit totalement automatisées, soit hybrides. L'accent de cette comparaison sera placé sur le fait que le scénario que nous avons utilisé est le moins coûteux, mais implique la prise de doses de radiations par le personnel. Notre étude en constitue un des premiers éléments.

Enfin, cette étude nous a permis d'argumenter sur l'intérêt de la méthode de la DSM Collaborative que nous présentons dans cette thèse. De prime abord, le scénario étudié ne s'y prêtait pas de façon importante. Cependant, ce cas nous a permis de montrer, avec ses solutions multiples et même avec son faible nombre d'acteurs

Chapitre 5. Application : comparaison de scenarii d'intervention

impliqués, l'apport principal de notre méthode : son approche par la collaboration entre les participants, la multiplicité des solutions à comparer (plutôt que le choix d'un optimum unique) et l'implication des ressources humaines qui participent activement dans le processus de planification.

Conclusion générale

La tâche de cette conclusion est ardue : il nous faut en quelques pages unifier un travail de trois ans, s'étendant dans trois directions certes complémentaires, et que nous avons sans cesse tenté de garder connectées les unes aux autres dans cette thèse. Il est temps de conclure sur le pilotage de la complexité, après avoir parlé d'interventions en environnement présentant des rayonnements ionisants, après avoir parlé de Descartes et de la systémique, après être entrés dans les détails de l'algorithmique de l'algèbre d'intervalles d'Allen et de la DSM, et surtout après avoir été au plus près des interventions dans le futur Super-FRS de la GSI.

Quels sont les apports de cette thèse ?

En premier lieu, une méthode de planification collaborative. La DSM Collaborative est le premier apport de cette thèse, apport que l'on pourrait presque qualifier de *tangible*. Elle est le fruit des réflexions présentées dans ce travail, et son utilisation est déjà en mesure de fournir des premiers résultats dans le cadre de la planification d'interventions du projet Super-FRS de la GSI.

Mais sans s'arrêter à la méthode même de la DSM Collaborative, nous avons cherché dans cette thèse à proposer une approche nouvelle de la planification, et ce pas uniquement concernant les interventions en environnements émettant des rayonnements ionisants. Nous avons cherché à poser les bases de la planification collaborative, afin de faire de ce processus fondamental dans le "*pilotage*" d'une organisation complexe une action collective.

Le modèle de planification que nous proposons implique les deux niveaux hiérarchiques que sont le niveau opérationnel et le niveau tactique, comme nous l'avons décrit avec les différents rôles impliqués (équipes d'intervention, surintendants d'installations, agents de radioprotection, coordinateurs du système de planification etc.). Mais lorsqu'il s'agit, en utilisant les mêmes méthodes, de planifier l'exécution d'un projet comme HL-LHC, puis son opération qui s'inscrivent dans les deux à trois prochaines décennies, on retrouve également l'implication du niveau hiérarchique supérieur : le niveau stratégique, ou normatif.

Dans une intervention donnée, l'optimisation de la dose reçue assure la sécurité sanitaire de l'opérateur dont l'optimisation temporelle est une partie intégrante. Si l'on passe à l'échelle supérieure, en considérant que cette intervention sera répétée au cours de l'année, ou peut-être même plusieurs fois en cas de maintenance corrective, le *tactique* vient se mêler à l'opérationnel. Notre opérateur ne peut pas

dépasser les limites de doses légales, et ses superviseurs ainsi que les responsables des équipements doivent en tenir compte. À l'échelle de l'organisation entière, les interventions liées aux grands projets comme HL-LHC doivent venir se greffer sur ces opérations courantes dont elles partagent les installations, sans oublier que la problématique des radiations a également un impact important sur l'image extérieure de l'organisation.

De cette façon, la gestion du fonctionnement à long terme se mêle à celle des opérations, et le stratégique a ainsi son rôle à jouer aux côtés du *tactique* et de l'opérationnel lorsqu'il s'agit d'intégrer planification, collaboration et gestion des radiations dans la conduite des grands projets de l'organisation. Nous retrouvons bien dans ces trois axes les aspects indissociables de ce que nous appelons le pilotage du CERN, qui est indubitablement une organisation complexe [Nicquevert 2013a].

C'est donc suivant cette volonté d'intégrer la complexité et la collaboration à tous les niveaux stratégiques dans la planification, et de faire ainsi de la planification elle-même un acte collaboratif, que nous avons travaillé sur les notions de rôles et de contraintes. Nicquevert plaide dans sa thèse pour une définition non linéaire des processus au sein de l'organisation complexe. Pourtant, la planification a jusqu'à aujourd'hui été très linéaire dans sa pratique. La séquence désormais traditionnelle que constitue l'enchaînement WBS, PDM, assignation des ressources, nivellement des ressources puis établissement du diagramme de Gantt ne laisse que peu de place à une expression individualisée des contraintes, et encore moins à une modification a posteriori du plan établi : le cerveau a établi le plan, et la main essaie tant bien que mal de le suivre, en se confrontant à la situation du terrain.

C'est dans la direction inverse que la DSM Collaborative cherche à aller, même s'il faut garder à l'esprit que la pratique impose nécessairement des limites à la théorie et à la pensée, et qu'à un certain moment, il faut bien calculer des dates, les fixer dans un plan à exécuter et aller dans les installations effectuer les tâches : c'est pour cette raison qu'un certain degré de coordination ou de modération doit être conservé, et c'est ici que la notion de compromis prend tout son sens.

Travailler collaborativement peut être vu comme un rapprochement entre ceux qui décident et ceux qui font. Dans un environnement collaboratif, la main n'est plus séparée du système nerveux, et ceux qui sont acteurs dans les interventions prennent part activement à la prise de décision. Nous ne sommes plus dans une situation où les ressources sont assignées à des tâches comme des objets : ce sont, dans notre conception de la planification, des ressources qui participent activement au processus et qui vont interagir entre elles afin de participer à une optimisation raisonnée et raisonnable des interventions : avec l'approche ALARA, nous avons vu que l'optimum n'est pas nécessairement temporel. Les problèmes "réels" sont complexes, et la notion d'optimalité prend alors tout son sens dans le multicritère [Schärli 1985].

Pour résumer cette discussion, cette thèse apporte une méthode, mais aussi une nouvelle philosophie de planification, plaçant l'individu et la contrainte au centre d'un processus itératif et collaboratif, basé sur la communication et l'échange d'informations. À l'heure du Web 2.0 des années 2000 et 2010, cette approche de la

planification 2.0 est dans l'air du temps, car le fonctionnement d'un système complexe dépend grandement des interfaces entre ses acteurs où la communication et l'échange d'informations jouent un rôle essentiel.

Quelles en sont les perspectives ?

Dans l'immédiat, les perspectives de ce travail de thèse se situent dans la recherche et le développement. Nous avons abordé dans le chapitre 5 le cas du Super-FRS de la GSI et la planification des interventions dans cette future installation. Pour ce faire, de nombreux outils différents ont été utilisés, et leur compatibilité laisse encore à désirer.

Les premiers intéressés par le développement d'outils comme le prototype *Mat-plan - Interveneering* que nous avons développé puis utilisé dans cette thèse sont les services de radioprotection. L'utilisation combinée de FLUKA avec des applications de simulation de trajectoire comme RADIJS [Fabry 2013] ou IVPlaner que nous avons utilisé dans notre cas, le tout additionné avec une interface de planification collaborative, ouvrirait des perspectives extrêmement intéressantes en termes de conception et de planification d'interventions à doses reçues optimisées. Des utilisateurs pourraient ainsi créer des scénarii d'interventions et les soumettre aux agents de radioprotection pour validation ou pour demander conseil. De leur côté, les agents de radioprotection pourraient être informés des différents projets d'intervention, et détecter directement les plus critiques.

Hors du contexte des accélérateurs et des environnements radioactifs, c'est l'aspect collaboratif qui génère le plus de perspectives. Du point de vue de la recherche, les algorithmes que nous avons utilisés sont encore loin d'être optimaux. Pour certains comme l'algorithme de propagation, d'importants travaux ont été effectués par le passé [Vilain 1989, van Beek 1989, van Beek 1990], mais concernant par exemple la recherche de compromis, nous n'avons dans ce travail qu'entrevu les améliorations à apporter.

En plus de l'amélioration des algorithmes de la DSM collaborative, les données qu'elle utilise peuvent devenir des sujets d'exploration. Dans [Bonnal 2012], nous avons envisagé d'utiliser la DSM avec des données floues. L'utilisation de telles données pour les durées des activités dont nous avons souligné le caractère spéculatif (par exemple lorsque nous les avons collectées auprès du personnel de la GSI) constitue un axe de développement intéressant.

La sélection des solutions n'a de plus pas été abordée en profondeur dans cette thèse. Nous avons à de nombreuses reprises mentionné le fait que ce choix était dépendant de plusieurs critères, à savoir la durée, les doses individuelles et collectives ainsi que les coûts des diverses solutions. Cependant, des travaux sont encore à prévoir si l'on veut formaliser ce processus de décision qui n'est pas nécessairement systématique : quel coût attribuer à un millisievert reçu par un technicien ?

Quand atteint-on la limite du fameux “raisonnable” de l’approche ALARA³⁶ ? Ce sont autant de questions qui demeurent en suspens.

Nous pensons cependant pour l’heure avoir proposé sinon juste une méthode, du moins une base de réflexion pour aborder différemment l’action de planifier, en plaçant l’acteur et la contrainte au cœur du procédé. Il est certainement possible et intéressant de rechercher d’autres méthodes de propagation de contraintes que celle de l’algèbre d’intervalles d’Allen, et en prenant en compte des spécificités des systèmes complexes autres que les rayonnements ionisants.

C’est afin de conclure ce mémoire que nous nous arrêtons une dernière fois sur ce que nous pensons être son apport central : travailler en collaboration, c’est placer ne serait-ce que pour un temps l’acteur, la ressource, au même niveau que le décideur. C’est en faire une ressource qui agit, un élément actif du système, un acteur décideur ancré à la fois dans l’action et dans la réflexion qui la précède.

Il faut agir en homme de pensée et penser en homme d’action.

Henri Bergson

Message au congrès de Descartes, 1937, *Mélanges*, PUF, 1972, p. 1579.

36. Pour rappel, *As Low As Reasonably Achievable*.

Bibliographie

- [Agostinelli 2003] S. Agostinelli et al. *Geant4 - a simulation toolkit*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 506, no. 3, pages 250 – 303, 2003. (Cité en page 42.)
- [Aissi 2002] Selim Aissi, Pallavi Malu et Krishnamurthy Srinivasan. *E-business process modeling : the next big step*. IEEE Computer, vol. 35, no. 5, pages 55–62, 2002. (Cité en page 72.)
- [Allen 1983a] James F. Allen. *Maintaining Knowledge about Temporal Intervals*. Communications of the ACM, vol. 26, pages 832–843, 1983. (Cité en pages 69, 92, 111 et 232.)
- [Allen 1983b] James F. Allen et Johannes A. Koomen. *Planning Using a Temporal World Model*. In International Joint Conference on Artificial Intelligence, volume 8, pages 711–714, 1983. (Cité en page 69.)
- [Allen 2002a] James Allen, Nate Blaylock et George Ferguson. *A Problem Solving Model for Collaborative Agents*. International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Bologna, Italy, 2002. (Cité en page 55.)
- [Allen 2002b] James Allen et George Ferguson. *Human-Machine Collaborative Planning*. 3rd International NASA Workshop on Planning and Scheduling for Space, Houston, Texas, 2002. (Cité en page 55.)
- [Allison 2006] J. Allison et al. *Geant4 developments and applications*. Nuclear Science, IEEE Transactions on, vol. 53, no. 1, pages 270–278, Feb 2006. (Cité en page 42.)
- [Avesani 2000] Paolo Avesani, Anna Perini et Francesco Ricci. *Interactive Case-Based Planning for Forest Fire Management*. Applied Intelligence, vol. 13, pages 41–57, 2000. (Cité en pages 14, 16 et 68.)
- [Bachy 1997] Gérard Bachy et Ari-Pekka Hameri. *What to be implemented at the early stage of a large-scale project*. International Journal of Project Management, vol. 15, no. 4, pages 211–218, Août 1997. (Cité en page 58.)
- [Battistoni 2007] G. Battistoni et al. *The FLUKA code : Description and benchmarking*. Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop 2006, Fermilab 6-8 September 2006, M.Albrow, R. Raja eds., AIP Conference Proceeding 896, pages 31–49, 2007. (Cité en page 42.)
- [Baudin 2012] Mathieu Baudin, Pierre Bonnal et Jurgen De Jonghe. *A DSM Based "2.0" System for Human Intervention Planning and Scheduling in Facilities Emitting Ionizing Radiations*. In Moritoyo Onishi, Maik Maurer, Katharina Eben et Udo Lindemann, éditeurs, Gain competitive advantage by managing complexity : Proceedings of the 14th International DSM Conference. Carl Hanser Verlag, Munich, 2012. (Cité en pages 82 et 103.)

- [Baudin 2013a] Mathieu Baudin, Pierre Bonnal, Bertrand Nicquevert et Jean-Michel Ruiz. *An Enhanced Planning and Scheduling Approach Suited to the Requirements of Collaborative Project Management*. The Journal of Modern Project Management, vol. 1, no. 2, 2013. (Cité en pages 54, 95 et 103.)
- [Baudin 2013b] Mathieu Baudin, Pierre Bonnal et Jean-Michel Ruiz. Combining Activity DSM with Temporal Logic for Collaborative Planning and Scheduling. InTech, International Journal of Advanced Robotic Systems, Manuel Ferre, Jouni Mattila, Bruno Siciliano, Pierre Bonnal (Ed.), 2013. (Cité en page 103.)
- [Baudin 2014] Mathieu Baudin, Pierre Bonnal et Jean-Michel Ruiz. *The Collaborative DSM : a new way to handle complex collaborative planning and scheduling processes*. 16th International DSM Conference, Paris, France, 2014. (Cité en page 103.)
- [Blum 1997] Avrim L. Blum et Merrick L. Furst. *Fast planning through planning graph analysis*. Artificial Intelligence, vol. 90, no. 1-2, pages 281 – 300, 1997. (Cité en page 64.)
- [Bonnal 2006a] Pierre Bonnal et Doris Forkel-Wirth. *Critères et exigences ALARA applicables aux interventions*. CERN EDMS document n°810176, 2006. (Cité en pages 40, 41, 187 et 188.)
- [Bonnal 2006b] Pierre Bonnal et Doris Forkel-Wirth. *L'approche ALARA au CERN*. CERN EDMS document n°810169, 2006. (Cité en pages 38 et 39.)
- [Bonnal 2012] Pierre Bonnal et Mathieu Baudin. *Handling a Design Structure Matrix Based on Fuzzy Data*. In Moritoyo Onishi, Maik Maurer, Katharina Eben et Udo Lindemann, éditeurs, Gain competitive advantage by managing complexity : Proceedings of the 14th International DSM Conference. Carl Hanser Verlag, Munich, 2012. (Cité en pages 103 et 157.)
- [Bonnal 2015] Pierre Bonnal. Planification de projet. Presses Universitaires de France, À paraître, communication privée, 2015. (Cité en pages 6, 9, 59, 61 et 192.)
- [Browning 1998] Tyson R. Browning. *Use of Dependency Structure Matrices for Product Development Cycle Time Reduction*. Proceedings of the 5th International Conference on Concurrent Engineering Research and Applications, Tokyo, Japan, 1998. (Cité en page 98.)
- [Brucker 1999] Peter Brucker, Andreas Drexler, Rolf Möhring, Klaus Neumann et Erwin Pesch. *Resource-constrained project scheduling : Notation, classification, models, and methods*. European Journal of Operational Research, vol. 112, pages 3–41, 1999. (Cité en pages 62 et 192.)
- [Brugger 2005a] M. Brugger et al. *Benchmark studies of induced radioactivity produced in LHC materials, part I : specific activities*. Radiation Protection Dosimetry, vol. 116, no. 1-4, pages 6–11, 2005. (Cité en page 42.)

Bibliographie

- [Brugger 2005b] M. Brugger et al. *Benchmark studies of induced radioactivity produced in LHC materials, part II : remanent dose rates*. Radiation Protection Dosimetry, vol. 116, no. 1-4, pages 12–15, 2005. (Cité en page 42.)
- [Brugger 2006] M. Brugger, A. Ferrari, S. Roesler et L. Ulrici. *Validation of the FLUKA Monte Carlo code for predicting induced radioactivity at high-energy accelerators*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 562, no. 2, pages 814 – 818, 2006. Proceedings of the 7th International Conference on Accelerator Applications. (Cité en page 42.)
- [Bunge 1977] M. Bunge. *Treatise on basic philosophy : Volume 3 : Ontology 1 : The furniture of the world*. Reidel, Boston, 1977. (Cité en page 77.)
- [Bunge 1979] M.A. Bunge. *Treatise on Basic Philosophy : Ontology II : A World of Systems*. Dordrecht, Holland : D, 1979. (Cité en page 77.)
- [CERN EN-Department 2012] CERN EN-Department. *XTAX Description*. http://sba.web.cern.ch/sba/Documentations/Informations&Training/Beam_Equipments/target_attenuator/, 2012. (Cité en page 46.)
- [CERN EN-Department 2014] CERN EN-Department. *LHC Consolidation Project Website*. [urlhttp ://en-dep.web.cern.ch/en-dep/Groups/MEF/Projects/consolidation.htm](http://en-dep.web.cern.ch/en-dep/Groups/MEF/Projects/consolidation.htm), 2014. (Cité en page 6.)
- [CERN 2006] CERN. *Code de sécurité F Rev - Safety code F Rev*. <https://edms.cern.ch/document/335729/2>, 2006. (Cité en page 36.)
- [Chapin 1970] Ned Chapin. *Flowcharting With the ANSI Standard : A Tutorial*. Computing Surveys, vol. 2, pages 119–146, 1970. (Cité en pages 71 et 196.)
- [Chen 2003] Chun-Hsien Chen, Shi Fu Ling et Wei Chen. *Project scheduling for collaborative product development using DSM*. International Journal of Project Management, vol. 21, pages 291–299, 2003. (Cité en page 117.)
- [CLIC 2014] CLIC. *Compact Linear Collider Study Website*. <http://clic-study.org/>, 2014. (Cité en page 6.)
- [Cohen 1989] Paul R Cohen, Michael L Greenberg, David M Hart et Adele E Howe. *Trial by fire : Understanding the design requirements for agents in complex environments*. AI magazine, vol. 10, no. 3, page 32, 1989. (Cité en page 16.)
- [Corriveau 1995] Gilles Corriveau et Jean-Michel Ruiz. *Le désordre constructif en action*. Revue internationale en gestion et management de projets, vol. 2, pages 18–48, 1995. (Cité en page 2.)
- [Corriveau 1996] Gilles Corriveau. *Conceptualisation d’une logique du désordre constructif en gestion de projet : fondements, modélisation et hypothèses*. PhD thesis, Université d’Aix-Marseille III, 1996. (Cité en page 2.)
- [Crandall 1973] K. C. Crandall. *Project planning with precedence lead/lag factors*. Project Management Quarterly, vol. 6, 1973. (Cité en pages 60 et 191.)
- [Cucinotta 2001] F.A. Cucinotta et al. *Space radiation and cataracts in astronauts*. Radiation research, vol. 156, no. 5, pages 460–466, 2001. (Cité en page 17.)

- [de la Asunción 2005] Marc de la Asunción, Luis Castillo, Juan Fdez-Olivares, Óscar García-Pérez, Antonio González et Francisco Palao. *SIADEx : An interactive knowledge-based planner for decision support in forest fire fighting*. AI Communications, vol. 18, no. 4, pages 257–268, 2005. (Cité en page 16.)
- [Dechter 1991] Rina Dechter, Itay Meiri et Judea Pearl. *Temporal Constraint Networks*. Artificial Intelligence, vol. 49, pages 61–95, 1991. (Cité en page 94.)
- [Dufour-Lussier 2012] Valmi Dufour-Lussier, Florence Le Ber et Jean Lieber. *Extension du formalisme des flux opérationnels par une algèbre temporelle*. Sixièmes Journées de l’Intelligence Artificielle Fondamentale (JIAF), pages 133–142, 2012. (Cité en pages 89 et 92.)
- [Dumas 2005] Marlon Dumas, Wil M. P. van der Aalst et Arthur H. M. ter Hofstede. *Process-aware information systems : Bridging people and software through process technology*. John Wiley & Sons, Octobre 2005. (Cité en page 72.)
- [Durante 2008] Marco Durante et Francis A Cucinotta. *Heavy ion carcinogenesis and human space exploration*. Nature Reviews Cancer, vol. 8, no. 6, pages 465–472, 2008. (Cité en page 18.)
- [EDM 2014] CERN EDMS Service Website. <http://espace.cern.ch/edms-services/services/default.aspx>, 2014. (Cité en page 8.)
- [EFDA 2014] European Fusion Development Agreement EFDA. *JET- Joint European Torus website*, 2014. (Cité en page 18.)
- [Eisner 1962] Howard Eisner. *A generalized network approach to the planning and scheduling of a research project*. Operations Research, vol. 10, pages 115–125, 1962. (Cité en pages 61 et 194.)
- [ELENA 2014] ELENA. *ELENA Project Website*. <https://espace.cern.ch/elena-project/SitePages/Home.aspx>, 2014. (Cité en page 6.)
- [Elmaghraby 1964] Salah E. Elmaghraby. *An Algebra for the Analysis of Generalized Activity Networks*. Management Science, vol. 10, no. 3, pages 494–514, Avril 1964. (Cité en page 61.)
- [Elmaghraby 1977] Salah E. Elmaghraby. *Activity Networks*. Wiley-Interscience, 1977. (Cité en pages 61 et 193.)
- [Elmaghraby 1995] Salah E. Elmaghraby. *Activity nets : A guided tour through some recent developments*. European Journal of Operational Research, vol. 82, no. 3, pages 383–408, 1995. (Cité en pages 60, 69 et 95.)
- [Eppinger 1997] Steven D. Eppinger. *A Planning Method for Integration of Large-Scale Engineering Systems*. Proceedings of the International Conference on Engineering Design, Tampere, Finland, 1997. (Cité en page 98.)
- [Eppinger 2012] Steven D. Eppinger et R. Browning Tyson. *Design structure matrix methods and applications*. MIT Press, 2012. (Cité en pages 88 et 98.)
- [Fabry 2013] Thomas Fabry, Liesbeth Vanherpe, Mathieu Baudin, Chris Theis, Christian Braesch et Bruno Feral. *Interactive intervention planning in particle accelerator environments with ionizing radiation*. Nuclear Instruments

- and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 708, no. 0, pages 32 – 38, 2013. (Cité en pages 51, 106, 141 et 157.)
- [Fabry 2014] Thomas Fabry, Jan Blaha, Liesbeth Vanherpe, Christian Braesch, Laurent Tabourot et Bruno Feral. *The practical use of an interactive visualization and planning tool for intervention planning in particle accelerator environments with ionizing radiation*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 743, no. 0, pages 14 – 21, 2014. (Cité en pages 51, 106 et 141.)
- [FAIR 2014] FAIR. *Facility for Antiproton and Ion Research in Europe GmbH*. <http://www.fair-center.de/>, 2014. (Cité en page 122.)
- [Fasso 2005] A. Fasso, A. Ferrari, J. Ranft et P.R. Sala. *FLUKA : a multi-particle transport code*. CERN-2005-10, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773, 2005. (Cité en page 42.)
- [Ferber 1996] Jacques Ferber et Jean-Pierre M ller. *Influences and reaction : a model of situated multiagent systems*. In Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-96), pages 72–79, 1996. (Cité en page 55.)
- [Fikes 1971] Richard E. Fikes et Nils J. Nilsson. *Strips : A new approach to the application of theorem proving to problem solving*. Artificial Intelligence, vol. 2, no. 3-4, pages 189–208, 1971. (Cité en pages 64 et 65.)
- [Fondahl 1962] J. W. Fondahl. *A non computer approach to the critical path method*. Tech. Report no. 9. Dept of Civil Engineering, Stanford U., Stanford, CA., 1962. (Cité en pages 60 et 191.)
- [Forkel-Wirth 2006] Doris Forkel-Wirth et Thomas Otto. *Area classification*. CERN EDMS Document n 810149, 2006. (Cité en pages 186 et 189.)
- [Forrester 1961] Jay W. Forrester. *Industrial Dynamics*. System Dynamics Series. Productivity Press, 1961. (Cité en pages 70 et 202.)
- [Gebala 1991] David A. Gebala et Steven D. Eppinger. *Methods for Analyzing Design Procedures*. Proceedings of 3rd International ASME Conference on Design Theory and Methodology, Miami, Florida, 1991. (Cité en pages 98, 101 et 237.)
- [Geissel 1992] H. Geissel et al. *The GSI projectile fragment separator (FRS) : a versatile magnetic system for relativistic heavy ions*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 70, no. 1-4, pages 286–297, 1992. (Cité en pages 123 et 124.)
- [Geissel 2003] H. Geissel et al. *The Super-FRS project at GSI*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 204, no. 0, pages 71 – 85, 2003. 14th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications. (Cité en pages 123 et 126.)

- [Gervasio 1998] Melinda T. Gervasio, Wayne Iba et Pat Langley. *Case-based seeding for an interactive crisis response assistant*. In Case-Based Reasoning Integrations : Papers from the 1998 Workshop, 1998. (Cité en pages 16, 55 et 68.)
- [Goldratt 1997] E. M. Goldratt. Critical Chain. Great Barrington MA : North River Press, 1997. (Cité en page 193.)
- [Graham 2003] Ben S. Graham. Detail Process Charting, Speaking the language of Process. The Ben Graham Corporation, 2003. (Cité en pages 70 et 198.)
- [Green 2005] Peter F. Green, Michael Rosemann et Marta Indulska. *Ontological Evaluation of Enterprise Systems Interoperability Using ebXML*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 17, pages 713–725, 2005. (Cité en pages 78 et 211.)
- [Green 2006] Peter Green, Michael Rosemann, Marta Indulska et Chris Manning. *Candidate interoperability standards : an ontological overlap analysis*. Data and Knowledge Engineering, vol. 62, pages 274–291, 2006. (Cité en pages 72, 78, 210 et 211.)
- [Gruber 1993] Thomas R. Gruber. *A Translation Approach to Portable Ontology Specifications*. Knowledge Acquisition, vol. 5, pages 199–220, 1993. (Cité en page 74.)
- [Gruber 1995] Thomas R. Gruber. *Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing*. International Journal of Human-Computer Studies, vol. 43, pages 907–928, 1995. (Cité en page 77.)
- [GSI 2014] GSI. *GSI Helmholtzzentrum für Schwerionen Forschung GmbH*. <http://www.gsi.de/>, 2014. (Cité en page 121.)
- [Halpin 1973] D.W. Halpin. *An investigation of the use of simulation networks for modeling construction operations*. PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1973. (Cité en pages 72 et 196.)
- [Halpin 1999] Daniel W. Halpin et Luis-Henrique Martinez. *Real world applications of construction process simulation*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, pages 956–962, 1999. (Cité en pages 72 et 196.)
- [Hendler 1990] James Hendler, Austin Tate et Mark Drummond. *AI Planning : Systems and Techniques*. AI Magazine, vol. 11, pages 61–77, 1990. (Cité en pages 63, 65, 66 et 67.)
- [HIE-ISOLDE 2014] HIE-ISOLDE. *High Intensity and Energy ISOLDE Project website*. <http://hie-isolde.web.cern.ch/hie-isolde/>, 2014. (Cité en page 6.)
- [HL-LHC 2014] HL-LHC. *High Luminosity LHC project website*. <http://hilumilhc.web.cern.ch/HiLumiLHC/index.html>, 2014. (Cité en page 6.)
- [Iba 1998] Wayne Iba et Melinda Gervasio. *Adapting to user preferences in crisis response*. In Proceedings of the 4th international conference on Intelligent user interfaces, pages 87–90. ACM, 1998. (Cité en page 16.)

Bibliographie

- [ICRP 1990] ICRP. *ICRP Publication 60*. Annals of ICPR, vol. 21, no. 1-3, 1990. (Cité en page 36.)
- [ICRP 2007] ICRP. *ICRP Publication 103*. Annals of ICPR, vol. 37, no. 2.4, page 2, 2007. (Cité en page 36.)
- [IDE 2010] *IDEF : Integrated DEFinition Methods*. <http://www.idef.com>, 2010. (Cité en pages 71 et 204.)
- [IND 2014] *CERN's INDICO website*. <http://indico.cern.ch>, 2014. (Cité en page 8.)
- [IRA 2010] Institut de radiophysique IRA. Cours de radioprotection destiné aux laborantines et laborantins. CHUV Institut de radiophysique, 2010. (Cité en pages 20, 32 et 36.)
- [IRA 2011] Institut de radiophysique IRA. *Radiation Protection Course - CERN*, 2011. (Cité en pages 23, 34 et 185.)
- [ITER Organization 2014] ITER Organization. *ITER - Une énergie pour notre avenir*. <https://www.iter.org/fr/accueil>, 2014. (Cité en page 18.)
- [Jensen 1997] Kurt Jensen. *A Brief Introduction to Coloured Petri Nets*. Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. Proceedings of the TACAS'97 Workshop, pages 203–208, 1997. (Cité en pages 72 et 199.)
- [Jimonet 2009] Christine Jimonet et Henri Métivier, éditeurs. *Personne Compétente en Radioprotection : Principes de radioprotection - réglementation*. EDP Sciences, deuxième édition, 2009. (Cité en pages 20, 36, 182, 184 et 185.)
- [Karniel 2009] Arie Karniel et Yoram Reich. *From DSM-Based Planning to Design Process Simulation : A Review of Process Scheme Logic Verification Issues*. Engineering Management, IEEE Transactions on, vol. 56, no. 4, pages 636–649, Nov 2009. (Cité en page 88.)
- [Karniel 2011] Arie Karniel et Yoram Reich. *Managing the Dynamics of New Product Development Processes*. Springer, 2011. (Cité en page 88.)
- [Keen 1996] Chris Keen et Charles Lackos. *An Analysis of the Design Constructs Required in Process Modelling*. International Conference on Software Engineering : Education and Practice, Dunedin, Ireland, IEEE Computer Society, pages 434–441, 1996. (Cité en pages 78 et 211.)
- [Kelley 1959] James E. Jr. Kelley et Morgan. R. Walker. *Critical-Path Planning and Scheduling*. 1959 Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference, pages 160–173, 1959. (Cité en pages 60 et 191.)
- [Kozlova 2008] E. Kozlova et al. *Layout of the Super-FRS target hall*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 266, no. 19-20, pages 4275–4279, 2008. Proceedings of the 15th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications. (Cité en page 128.)
- [Kozlova 2012] Ekaterina Kozlova. *Shielding and Activation Calculations for Super-FRS*. GSI/IPHC joint collaboration meeting, Strasbourg, France, 2012. (Cité en page 128.)

- [Kreimeyer 2009] Matthias F. Kreimeyer. *A Structural Measurement System for Engineering Design Processes*. PhD thesis, Technische Universität München, 2009. (Cité en pages 70, 201, 204, 205 et 207.)
- [Krokhin 2003] Andrei Krokhin, Peter Jeavons et Peter Jonsson. *Reasoning about Temporal Relations : The Tractable Subalgebras of Allen's Interval Algebra*. Journal of the ACM, vol. 50, pages 591–640, 2003. (Cité en page 95.)
- [Le Moigne 1977] Jean-Louis Le Moigne. La théorie du système général : Théorie de la modélisation (édition de 1994). Collection les classiques du réseau intelligence de la complexité, www.mcxapc.org, 1977. (Cité en pages 57 et 58.)
- [Linac4 2014] Linac4. *Linac4 Project Website*. <http://linac4-project.web.cern.ch/linac4-project/>, 2014. (Cité en page 6.)
- [Lindemann 2009] Udo Lindemann. *Home DSMweb.org*. <http://DSMweb.org>, 2009. (Cité en pages 99, 102 et 237.)
- [LIU 2014] LIU. *LHC Injectors Upgrade Project Website*. <https://espace.cern.ch/liu-project/default.aspx>, 2014. (Cité en page 6.)
- [Lu 2006] Ruopeng Lu, Shazia Sadiq, Vineet Padmanabhan et Guido Governatori. *Using a Temporal Constraint Network for Business Process Execution*. Proceedings of the 17th Australasian Database Conference - Volume 49. Australian Computer Society, Inc., 2006. (Cité en pages 89, 92 et 93.)
- [Malcolm 1959] D. G. Malcolm, J. H. Rosenbloom, C. E. Clark et W. Fazar. *Application of a technique for R&D program evaluation (PERT)*. Operations Research, vol. 7, pages 646–669, 1959. (Cité en pages 60 et 192.)
- [Malik 1983] Jitendra Malik et Thomas O. Binford. *Reasoning in Time and Space*. Proceedings of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Karlsruhe, Germany, pages 343–345, 1983. (Cité en page 95.)
- [Moeller 1978] Gerald L. Moeller et Lester A. Digman. *VERT : A technique to assess risks*. Proceedings of 10th Annual Conference, American Institute for Decision Sciences, vol. 2, page 292, 1978. (Cité en page 61.)
- [Moeller 1981] Gerald L. Moeller et Lester A. Digman. *Operations Planning with VERT*. Operations Research, vol. 29, pages 676–697, 1981. (Cité en pages 61 et 194.)
- [Mokhov 1995] Nikolai V Mokhov. *The MARS code system user's guide, version 13*. Fermilab-FN-628, pages 50–60, 1995. (Cité en page 42.)
- [Mokhov 2005] N. V. Mokhov et al. *Recent enhancements to the MARS15 code*. Radiation Protection Dosimetry, vol. 116, no. 1-4, pages 99–103, 2005. (Cité en page 42.)
- [Murata 1989] Tadao Murata. *Petri Nets : Properties, Analysis and Applications*. Proceedings of the IEEE, vol. 77, pages 541–580, 1989. (Cité en pages 72 et 199.)

Bibliographie

- [NASA 2007] NASA. Systems Engineering Handbook. National Aeronautics and Space Administration, 2007. (Cité en pages 71 et 202.)
- [Nau 2007] Dana S. Nau. *Current trends in automated planning*. AI magazine, vol. 28, no. 4, page 43, 2007. (Cité en page 63.)
- [Nicquevert 2013a] Bertrand Nicquevert. *Manager l'interface. Approche par la complexité du processus collaboratif de conception, d'intégration et de réalisation : modèle transactionnel de l'acteur d'interface et dynamique des espaces d'échanges*. PhD thesis, Grenoble U., 2013. presented 23 Nov 2012. (Cité en pages 3, 55, 57, 74 et 156.)
- [Nicquevert 2013b] Bertrand Nicquevert, Jean-François Boujut *et al.* *Modeling engineering interfaces in collaborative activities : a transactional model*. In Proceeding of the 19th Internationale Conference on Engineering Design, 2013. (Cité en page 55.)
- [NSBRI 2000] NSBRI. *National Space Biomedical Research Institute*. <http://www.nsbri.org>, 2000. (Cité en page 17.)
- [Object Management Group 2011] Object Management Group. *Business Process Model and Notation (BPMN), version 2.0*, 2011. (Cité en pages 72 et 206.)
- [O'Lunaigh 2013] Cian O'Lunaigh. *Premier long arrêt du LHC : Effervescence à venir*. <http://home.web.cern.ch/fr/about/updates/2013/02/long-shutdown-1-exciting-times-ahead>, 2013. (Cité en page 7.)
- [OMG 2011] OMG. *OMG Unified Modeling Language (OMG UML) Superstructure, Version 2.4.1*, 2011. (Cité en pages 72 et 207.)
- [Patel 2012] Harshada Patel, Michael Pettitt et John R Wilson. *Factors of collaborative working : A framework for a collaboration model*. Applied ergonomics, vol. 43, no. 1, pages 1–26, 2012. (Cité en page 54.)
- [Pinedo 2008] Michael L. Pinedo. *Scheduling : Theory, algorithms, and systems*, third edition. Springer, 2008. (Cité en pages 15, 62 et 192.)
- [Pollycove 2008] Myron Pollycove et Ludwig E. Feinendegen. *Low-dose radioimmuno-therapy of cancer*. Human & Experimental Toxicology, vol. 27, pages 169–175, 2008. (Cité en page 33.)
- [PRINCE2 2014] PRINCE2. *PRINCE2 Official Website*. <http://www.prince-officialsite.com/>, 2014. (Cité en page 9.)
- [Pritsker 1966a] A. Alan B. Pritsker et W. William Happ. *GERT : Graphical Evaluation and Review Technique. Part I. Fundamentals*. The journal of Industrial Engineering, vol. 17, pages 267–274, 1966. (Cité en pages 61 et 193.)
- [Pritsker 1966b] A. Alan B. Pritsker et Gary E. Whitehouse. *GERT : Graphical Evaluation and Review Technique. Part II. Probabilistic and Industrial Engineering Applications*. The journal of Industrial Engineering, vol. 17, pages 293–301, 1966. (Cité en pages 61 et 193.)
- [Pritsker 1969] A. Alan B. Pritsker. *The status of GERT*. Project Planning by Network Analysis - North-Holland Publ. Cy., 1969. (Cité en page 193.)

- [Recker 2005] Jan Recker, Marta Indulska, Michael Rosemann et Peter Green. *Do Process Modelling Techniques Get Better? A Comparative Ontological Analysis of BPMN*. 16th Australian Conference on Information Systems, Sydney, Australia, 2005. (Cité en pages 78 et 211.)
- [Recker 2009] Jan Recker, Marta Indulska, Michael Rosemann et Peter Green. *Business Process Modeling - A Comparative Analysis*. Journal of the Association for Information Systems, vol. 10, pages 333–363, 2009. (Cité en pages 78, 79, 83, 207, 209 et 211.)
- [Robin 2007] Vincent Robin, Bertrand Rose et Philippe Girard. *Modelling collaborative knowledge to support engineering design project manager*. Computers in Industry, vol. 58, pages 188–198, 2007. (Cité en page 57.)
- [Rose 2004] Bertrand Rose. *Proposition d'un référentiel support à la conception collaborative : CO²MED (COllaborative COnflict Management in Engineering Design), Prototype logiciel dans le cadre du projet IPPOP*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2004. (Cité en pages 54 et 74.)
- [Rosemann 2000] Michael Rosemann et Peter Green. *Integrating Multi-Perspective Views into Ontological Analysis*. 21st International Conference on Information Systems, Brisbane, Australia, Association for Information Systems, pages 618–627, 2000. (Cité en pages 78, 79 et 211.)
- [Ross 1977a] Douglas T. Ross. *Structured Analysis (SA) : A Language for Communicating Ideas*. IEEE Transactions on Software Engineering, vol. SE-3, pages 16–34, 1977. (Cité en pages 71 et 201.)
- [Ross 1977b] Douglas T. Ross et Kenneth E. Jr. Schoman. *Structured Analysis for Requirements Definition*. IEEE Transactions on Software Engineering, vol. SE-3, pages 6–15, 1977. (Cité en pages 71 et 201.)
- [Roy 1977] Bernard Roy. *Critique et dépassement de la problématique de l'optimisation*. Cahiers Sema, vol. 1, pages 65–79, 1977. (Cité en page 15.)
- [Roy 1985] Bernard Roy. *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*. Gestion. Economica, 1985. (Cité en pages 15, 83 et 225.)
- [Russel 2010] Stuart Russel et Peter Norvig. *Artificial Intelligence : A Modern Approach*. Prentice Hall, 2^e édition, 2010. (Cité en pages 63, 64 et 65.)
- [Russell 2007] Nick Russell, Arthur H. M. ter Hofstede et Wil M. P. Van der Aalst. *newYAWL : Specifying a Workflow Reference Language Using Coloured Petri Nets*. 2007. (Cité en pages 72 et 200.)
- [Sacerdoti 1975] Earl D. Sacerdoti. *The nonlinear nature of plans*. Advance Papers of the Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1975. (Cité en page 65.)
- [Sawhney 1998] Anil Sawhney, Simaan M. AbouRizk et Daniel W. Halpin. *Construction project simulation using CYCLONE*. Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 25, pages 16–25, 1998. (Cité en pages 72 et 196.)

Bibliographie

- [Scheer 2005] A.W. Scheer, O. Thomas et O. Adam. *Process modeling using event-driven process chains*. Process-Aware Information Systems, pages 119–146, 2005. (Cité en page 205.)
- [Schimmerling 2003] W Schimmerling, FA Cucinotta et JW Wilson. *Radiation risk and human space exploration*. Advances in Space Research, vol. 31, no. 1, pages 27–34, 2003. (Cité en page 18.)
- [Schärlig 1985] Alain Schärlig. Décider sur plusieurs critères. Panorama de l’aide à la décision multicritère. Diriger l’entreprise. Presses Polytechniques Romandes, 1985. (Cité en pages 15, 58, 83, 156 et 225.)
- [Schärlig 1996] Alain Schärlig. Pratiquer Electre et Prométhée. Un complément à Décider sur plusieurs critères. Diriger l’entreprise. Presses Polytechniques Romandes, 1996. (Cité en pages 83 et 225.)
- [Schwindt 2005] Christoph Schwindt. Resource allocation in project management. Springer-Verlag, 2005. (Cité en pages 62 et 192.)
- [Shen 2004] Stella Shen et Michael Shaw. *Managing Coordination in Emergency Response Systems with Information Technologies*. In AMCIS, page 252. Citeseer, 2004. (Cité en page 16.)
- [Slyke 1963] Richard M. Van Slyke. *Monte Carlo Methods and the PERT Problem*. Operations research, vol. 11, pages 839–860, 1963. (Cité en page 193.)
- [Smith 2000] David E. Smith, Jeremy Frank et Ari K. Jonsson. *Bridging the Gap Between Planning and Scheduling*. Knowledge Engineering Review, vol. 15, 2000. (Cité en pages 63, 64, 68, 89, 96 et 98.)
- [Steward 1981] Donald V. Steward. *The Design Structure System : A Method for Managing the Design of Complex Systems*. IEEE transactions on Engineering Management, vol. 28, 1981. (Cité en pages 71, 98, 101 et 102.)
- [Tate 1977] Austin Tate. *Generating Project Networks*. In Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2, International Joint Conference on Artificial Intelligence 1977, pages 888–893, San Francisco, CA, USA, 1977. Morgan Kaufmann Publishers Inc. (Cité en page 64.)
- [Tate 1992] Austin Tate, Brian Drabble et Richard Kirby. O-plan2 : an open architecture for command, planning and control. Citeseer, 1992. (Cité en page 16.)
- [Tübingen 2013] Universität Tübingen, éditeur. PURESAFE ITN 2nd Training Event : Radiation Protection. Eberhard Karls Universität Tübingen, 2013. (Cité en pages 20 et 36.)
- [TDC2/TCC2 Working Group 2013] TDC2/TCC2 Working Group. *TCC2/TDC2 LS1 Consolidation ALARA optimisation*. CERN EDMS Document 1262751, 2013. (Cité en page 48.)
- [Team 2008] X-5 Monte Carlo Team. MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I : Overview and Theory. Los Alamos National Laboratory, 2008. (Cité en page 42.)

- [Theis 2006] C. Theis, K.H. Buchegger, M. Brugger, D. Forkel-Wirth, S. Roesler et H. Vincke. *Interactive three dimensional visualization and creation of geometries for Monte Carlo calculations*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 562, pages 827–829, 2006. (Cité en page 46.)
- [Theis 2009] Chris Theis. *SimpleGeo*. <http://www.cern.ch/theis/simplegeo>, 2009. (Cité en page 46.)
- [Tubiana 2005] Maurice Tubiana et André Aurengo. *La relation dose-effet et l'estimation des effets cancérogènes des faibles doses de rayonnements ionisants*. Rapport technique, Académie Nationale de Médecine, Paris, France, 2005. (Cité en page 33.)
- [Tubiana 2009] Maurice Tubiana, Ludwig E. Feinendegen, Chichuan Yang et Joseph M. Kaminski. *The Linear No-Threshold Relationship Is Inconsistent with Radiation Biologic and Experimental Data*. Radiology, vol. 251, pages 13–22, 2009. (Cité en page 33.)
- [Ulrich 2003] K. T. Ulrich et Eppinger S. D. Product design and development. McGraw-Hill, 2003. (Cité en page 98.)
- [UN/CEFACT and OASIS 2001] UN/CEFACT and OASIS. ebXML Business Process Specification Schema Version 1.01. UN/CEFACT and Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS), 2001. (Cité en pages 73, 205 et 206.)
- [van Beek 1989] Peter van Beek et Robin Cohen. Approximation Algorithms for Temporal Reasoning. Department of Computer Science, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1989. (Cité en pages 94, 95, 111 et 157.)
- [van Beek 1990] Peter van Beek. *Exact and Approximate Reasoning about Qualitative Temporal Relations*. PhD thesis, Department of Computer Science, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1990. (Cité en pages 94, 111 et 157.)
- [Van der Aalst 2005] W. M. P. Van der Aalst et A. H. M. ter Hofstede. *YAWL : Yet Another Workglow Language*. 2005. (Cité en pages 72 et 200.)
- [Van der Aalst 2011] W. M. P. Van der Aalst et A. H. M. ter Hofstede. *Workflow pattern website by Van der Aalst and Hofstede*. www.workflowpatterns.com, 2011. (Cité en page 200.)
- [Vere 1983] Steven A. Vere. *Planning in time : Windows and durations for activities and goals*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, no. 3, pages 246–267, 1983. (Cité en pages 65 et 69.)
- [Vidal 1990] C. Vidal et A. Yehia Alcoutlabi. *Méthode d'aide à la décision sur des évaluations multicritères par plusieurs juges*. Mathématiques et sciences humaines, vol. 112, pages 27–36, 1990. (Cité en page 224.)
- [Vilain 1989] Marc Vilain, Henry Kautz et Peter van Beek. *Constraint Propagation Algorithms for Temporal Reasoning : a Revised Report*. Readings in qualitative reasoning about physical systems, San Francisco, CA, USA, Morgan Kaufmann Publishers Inc, pages 373–381, 1989. (Cité en pages 93, 94, 95, 98, 157 et 228.)

Bibliographie

- [Vincke 1989] Philippe Vincke. L'aide multicritère à la décision. Editions de l'Université de Bruxelles, 1989. (Cité en pages 83 et 225.)
- [Vincke 2011] Heinz Vincke, Doris Forkel-Wirth, Stefan Roesler, Marco Silari, Christian Theis et Helmut Vincke. *Radiation Protection at CERN*. CERN Accelerator School, Bilbao, Espagne, 2011. (Cité en pages 37, 40 et 42.)
- [Visual-Paradigm 2014] Visual-Paradigm. *Activity Diagram*. <http://www.visual-paradigm.com/VPGallery/diagrams/Activity.html>, 2014. (Cité en page 208.)
- [Vlachoudis 2009] Vasilis Vlachoudis. *FLAIR : A Powerful But User Friendly Graphical Interface for FLUKA*. Proceedings of the International Conference on Mathematics, Computational Methods and Reactor Physics (M&C 2009), Saragota Springs, New York, 2009. (Cité en page 46.)
- [Vlachoudis 2012] Vasilis Vlachoudis. *FLAIR for FLUKA*. <http://www.fluka.org/flair>, 2012. (Cité en page 46.)
- [Wand 1993] Y. Wand et R. Weber. *On the ontological expressiveness of information systems analysis and design grammars*. Journal of Information Systems, vol. 3, pages 217–237, 1993. (Cité en page 77.)
- [Wand 1995] Y. Wand et R. Weber. *On the deep structure of information systems*. Information Systems Journal, vol. 5, pages 203–223, 1995. (Cité en page 77.)
- [WEB 2014] *Le berceau du web*. <http://home.web.cern.ch/fr/about/birth-web>, 2014. (Cité en page 8.)
- [White 2001] Ronald J White et Maurice Averner. *Humans in space*. Nature, vol. 409, no. 6823, pages 1115–1118, 2001. (Cité en pages 17 et 19.)
- [White 2005] Stephen White. *Using BPMN to model a BPEL process*. Business Process Trends, vol. 3, no. 3, pages 1–18, 2005. (Cité en page 73.)
- [Whitehouse 1969] Gary E. Whitehouse et A. Alan B. Pritsker. *GERT : Part III - Further Statistical Results ; Counters, Renewal Times and Correlations*. AIIE Transactions, vol. 1, pages 45–50, 1969. (Cité en pages 61 et 193.)
- [Wilkins 2001] David E. Wilkins et Marie desJardins. *A call for knowledge-based planning*. AI magazine, vol. 22, no. 1, page 99, 2001. (Cité en page 63.)
- [Wilson 2001] JW Wilson et al. *Issues in deep space radiation protection*. Acta Astronautica, vol. 49, no. 3, pages 289–312, 2001. (Cité en page 18.)
- [Winckler 2003] M. Winckler et al. *The Super-FRS Project at GSI*, 2003. (Cité en pages 123, 126 et 127.)
- [Winkler 2008] M. Winkler et al. *The status of the Super-FRS in-flight facility at FAIR*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 266, no. 19-20, pages 4183–4187, 2008. Proceedings of the XVth International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications. (Cité en page 128.)

- [Wood 1991] Donna J Wood et Barbara Gray. *Toward a comprehensive theory of collaboration*. The Journal of Applied Behavioral Science, vol. 27, no. 2, pages 139–162, 1991. (Cité en page [54](#).)
- [Yanagihara 2001] Satoshi Yanagihara, Takenori Sukegawa et Kunio Shiraishi. *Development of Computer Systems for Planning and Management of Reactor Decommissioning*. Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 38, no. 3, pages 193–202, 2001. (Cité en page [18](#).)

Liste des Abréviations

AD	Antiproton Decelerator
ADL	Action Description Language
AIEA	Agence Internationale de L'Énergie Atomique
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
AMCD	Aide à la Décision Multicritère
BPEL	Business Process Execution Language
BPMN	Business Process Modelling and Notation
CERN	Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
CIPR	Commission Internationale de Protection Radiologique
CLIC Study	Compact Linear Collider Study
CPM	Critical Path Method
CR	Collector Ring
CYCLONE	Cyclic Operations Network
DIMR	Dossier d'Intervention en Milieu Radioactif
DSM	Design Structure Matrix
ebXML	Electronic-business extensible Markup Language
ebXML-BPSS	ebXML - Business Process Specification Schema
EDMS	Engineering and Equipment Data Management System
EFFBD	Enhanced Functional Flow Block Diagram
EPC	Event-driven Process Chain
FCC	Future Circular Collider
FFBD	Functional Flow Block Diagram
FPC	Flow Process Chart
FRS	Fragment Separator
GERT	Graphical Evaluation and Review Technique
HIE-ISOLDE	High Intensity and Energy ISOLDE Project
HL-LHC	High Luminosity LHC Project
ICRU	International Commission on Radiation Units and measurement

IDEF Integration Definition
IMPACT Intervention Management Planning and Activity Coordination Tool
INDICO Integrated Digital Conferencing
IOC-OOR Input-on-Columns-Output-on-Rows
IOR-OOC Input-on-Rows-Output-on-Columns
ISOLDE On-Line Isotope Mass Separator
LEIR Low Energy Ion Ring
LHC Large Hadron Collider
Linac Linear Accelerator
LIU LHC Injectors Upgrade
LS1 Long Shutdown 1
NESR New Energy Storage Ring
PBS Product Breakdown Structure
PDDL Problem Domain Description Language
PDM Precedence Diagramming Method
PERT Program Evaluation and Review Technique
PLM Product Lifecycle Management
PS Proton Synchrotron
PS Booster Proton Synchrotron Booster
RC-PSP Resource Constrained Planning and Scheduling Problem
SADT Structured Analysis and Designed Technique
SPS Super Proton Synchrotron
Super-FRS Superconducting Fragment Separator
VERT Venture Evaluation and Review Technique
WBS Work Breakdown Structure

Table des figures

1.1	Le complexe d'accélérateurs du CERN.	4
1.2	Modèle systémique.	10
2.1	Processus de planification interactif.	16
2.2	Tableau des nucléides.	21
2.3	Les différentes sources de radioactivité.	23
2.4	Les différents mécanismes de désintégration radioactive.	28
2.5	Altérations de l'ADN par les radiations.	34
2.6	Pathologies radio-induites.	34
2.7	Exemple d'utilisation de FLUKA.	43
2.8	Fichier de données FLUKA (<i>input file</i>).	45
2.9	Le hall de cibles TCC2 au CERN.	47
2.10	Fusion de géométries FLUKA.	49
2.11	Débits de dose simulés pour TCC2.	50
2.12	Optimisation de planification interactive en trois dimensions.	52
3.1	Processus collaboratif de planification.	57
3.2	Méthodes CPM et PDM et leur représentation graphique.	60
3.3	Représentation graphique des méthodes GERT et VERT.	61
3.4	Planification d'objectifs imbriqués.	66
3.5	La notation STRIPS.	67
3.6	Illustration du <i>Flow Process Chart</i> (FPC).	70
3.7	Illustration d'un modèle effectué avec la méthode SADT.	71
3.8	Illustration simple de la modélisation de processus utilisant la méthode BPMN.	73
3.9	Représentation ontologique d'une intervention en environnement émettant des rayonnements ionisants.	75
3.10	Mise en correspondance entre ontologies.	78
3.11	Les trois relations du graphe de surclassement.	84
3.12	Résultats de l'AMCD sous forme de graphes de surclassement.	86
4.1	Les treize relations temporelles de l'algèbre d'intervalles d'Allen.	92
4.2	Algorithme de propagation de contraintes.	94
4.3	Correspondance entre les dépendances de PDM et les contraintes de l'algèbre d'intervalles d'Allen.	97
4.4	Les différentes dépendances entre tâches dans DSM.	99
4.5	Exemple de séquençage d'une DSM comprenant 7 activités.	100
4.6	Illustration du processus de planification d'intervention.	104
4.7	Structures de données du prototype d'application.	109
4.8	Exemple de DSM utilisant les contraintes de l'algèbre d'Allen.	111
4.9	Relâchement des contraintes " <i>meets</i> ", " <i>starts</i> " et " <i>finishes</i> ".	113

4.10	Relâchement de la contrainte “ <i>equals</i> ”.	113
4.11	DSM après relâchement de contraintes.	114
4.12	Illustration des coefficients τ et δ pour une contrainte <i>before</i> .	116
4.13	Illustration d’une DSM solution.	117
4.14	Schéma bilan.	120
5.1	Complexe d’accélérateurs de la GSI.	122
5.2	Fonctionnement du Séparateur de fragments (FRS).	124
5.3	Le futur complexe d’accélérateurs de FAIR.	126
5.4	Description du futur Super-FRS.	127
5.5	Description de l’optique du futur Super-FRS.	127
5.6	Débits de dose simulés du Super-FRS.	129
5.7	Géométrie FLUKA du tunnel principal du Super-FRS.	131
5.8	Inserts sur la ligne de faisceau au point FPF2 du Super-FRS.	133
5.9	Équipements robotisés envisagés pour les interventions du Super-FRS.	135
5.10	Trajets et postes de travail lors des interventions.	137
5.11	Résultats de simulations FLUKA dans le Super-FRS.	140
5.12	Écran principal du prototype.	144
5.13	Écran des résultats du prototype.	144
5.14	Saisie des contraintes dans le prototype.	145
5.15	Gestion des ressources dans le prototype.	145
5.16	DSM des contraintes pour une intervention dans le Super-FRS.	147
5.17	Diagrammes de Gantt de deux solutions.	148
A.1	Classification ALARA au CERN.	187
B.1	Réseaux d’activités CPM et PDM.	191
B.2	La logique de GERT, accompagnée d’exemples de réseau.	193
B.3	Exemple de réseau d’activités VERT.	194
B.4	Exemple d’un réseau de <i>Decision Box</i> à trois issues.	195
B.5	Réseau <i>Decision Box</i> avec informations temporelles.	195
B.6	Exemple d’un réseau CYCLONE comportant deux sous-projets.	196
B.7	Exemple de processus modélisé en ANSI Flowcharts.	197
B.8	Les symboles spécialisés du standard ANSI Flowcharts.	197
B.9	Symboles du PFC et illustration d’un processus.	198
B.10	Représentation d’un élément de réseau de Petri	199
B.11	Symboles de YAWL et newYAWL.	200
B.12	Exemple de réseau newYAWL.	201
B.13	Exemple simple de diagramme SADT.	201
B.14	Les éléments de la représentation <i>Systems Dynamics</i>	202
B.15	Exemple de FFBD	203
B.16	Exemple de EFFBD, avec flux de données.	203
B.17	Diagramme IDEF3 en vue PFD (orientée-processus).	204
B.18	Diagramme IDEF3 en vue OSTN (orientée-objet).	204

B.19	Exemple de processus modélisé par EPC.	205
B.20	Exemple simple de BPMN avec deux pistes.	206
B.21	Exemple de diagramme d'activité UML	207
C.1	Représentation ontologique d'une intervention en environnement émet- tant des rayonnements ionisants.	211
C.2	Analyse ontologique des méthodes CPM, PDM, RC-PSP et PERT.	212
C.3	Analyse ontologique de GERT.	212
C.4	Analyse ontologique de VERT.	212
C.5	Analyse ontologique des réseaux d'activités <i>Decision Box</i>	213
C.6	Analyse ontologique des réseaux de Petri.	213
C.7	Analyse ontologique de la DSM.	213
C.8	Analyse ontologique de la méthode <i>System Dynamics</i> de J. Forrester.	214
C.9	Analyse ontologique du standard IDEF3.	214
C.10	Analyse ontologique de la méthode <i>Event-driven Process Chain</i> (EPC).	215
C.11	Analyse ontologique du <i>Process Flow Chart</i> (PFC).	215
C.12	Analyse ontologique de la méthode CYCLONE	216
C.13	Analyse ontologique du EFFBD.	216
C.14	Analyse ontologique de la méthode SADT et du standard IDEFØ.	217
C.15	Analyse ontologique du BPMN.	217
C.16	Analyse ontologique du diagramme d'activité de l'UML 2.0.	218
C.17	Analyse ontologique du standard ebXML-BPSS (version UML).	218
C.18	Analyse ontologique de newYAWL.	219
C.19	Analyse ontologique des Flowcharts de l'ANSI.	219
C.20	Calcul de l'indice de branchement.	220
D.1	Représentation d'une matrice d'évaluation d'AMCD.	221
D.2	Les trois relations du graphe de surclassement	224
E.1	Table de transitivité d'Allen.	231
F.1	Scénario automatisé d'intervention dans le Super-FRS.	245
F.2	Illustration (en anglais) du scénario d'intervention télé-opéré.	249

Liste des tableaux

2.1	Effets biologiques des radiations.	33
2.2	Doses personnelles annuelles au CERN.	37
2.3	ALARA au CERN : dispositions et livrables.	41
3.1	Ontologie de Bunge, Wand, et Weber.	80
3.2	Nôtre échantillon de méthodes de planification et de modélisation.	82
3.3	Résultats de l'AMCD (1/3).	85
3.4	Résultats de l'AMCD (2/3).	85
3.5	Résultats de l'AMCD (3/3).	88
4.1	Correspondance entre PDM et Algèbre d'intervalles d'Allen.	96
4.2	Correspondance entre algèbre d'intervalles d'Allen et DSM Binaire.	106
4.3	Quantification de l'algèbre d'intervalles d'Allen.	107
5.1	Comparaison des trois scenarii d'intervention du Super-FRS.	136
5.2	Estimation des doses reçues.	142
5.3	Récapitulatif des estimations de doses reçues.	150
A.1	Facteurs pour le calcul de la dose équivalente.	182
A.2	Facteurs pour le calcul de la dose efficace.	183
A.3	Effets biologiques déterministes après une exposition locale.	185
A.4	Effets biologiques déterministes après une exposition globale.	185
A.5	ALARA au CERN : dispositifs et livrables.	188
A.6	ALARA au CERN : zonage des installations.	189
C.1	Définitions des éléments de l'ontologie de Bunge, Wand, et Weber.	210
F.1	Séquence d'activités du scénario automatisé.	245
F.2	Séquence d'activités du scénario télé-opéré.	248
F.3	Séquence d'activités additionnelles du scénario télé-opéré.	249
F.4	Séquence d'activités du scénario hybride.	251
F.5	Séquence d'activités additionnelles du scénario hybride.	252

Dosimétrie et effets biologiques des rayonnements ionisants

Ce premier chapitre d'annexes reprend en partie et complète les informations du chapitre 2 sur la radioprotection en ce qui concerne : les grandeurs dosimétriques, les effets biologiques des radiations et les procédures ALARA en vigueur au CERN pour la planification des interventions en environnements présentant des rayonnements ionisants. Des tables contenant les différents coefficients utilisés pour calculer les doses équivalentes et efficaces sont également fournies.

A.1 Liste et description des différentes unités de dosimétrie

Exposition externe aux radiations

La dose absorbée représente la quantité d'énergie absorbée dans un matériau par unité de masse :

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} [J.kg^{-1}] = [Gy] \quad (A.1)$$

Le taux de dose absorbé en est déduit simplement, il représente la quantité d'énergie absorbée dans un matériau par unités de masse et de temps :

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} [Gy.s^{-1}] \quad (A.2)$$

La dose absorbée ne permet pas de différencier le type de rayonnement ionisant absorbé. Cependant, différents types de rayonnements ionisants auront des impacts différents sur la matière comme nous l'avons abordé dans le chapitre 2 du corps de cette thèse. À l'aide de facteurs de pondération fournis en Tableau A.1, il est possible de calculer une grandeur appelée dose équivalente qui permet de prendre en compte dans la dose totale reçue par un organe la part due à chaque type de rayonnement ionisant, compte tenu de ses mécanismes d'interaction avec la matière :

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} [J.kg^{-1}] = [Sv] \quad (A.3)$$

L'unité de la dose équivalente est le sievert. Elle correspond comme pour la dose absorbée à des joules par kilogramme, mais est utilisée exclusivement pour s'intéresser aux effets biologiques des radiations.

Annexe A. Dosimétrie et effets biologiques des rayonnements ionisants

Type de rayonnement	w_R
Photons de toute énergie	1
Électrons et muons de toute énergie	1
Neutrons	moins de 10 keV 5
	de 10 keV à 100 keV 10
	de 100 keV à 2 MeV 20
	de 2 MeV à 20 MeV 10
	plus de 20 MeV 5
Protons	plus de 2 MeV 5
Particules α , noyaux lourds, produits de fission	20

Tableau A.1 – Tableau récapitulant les facteurs de pondération w_R pour le calcul de la dose équivalente tels que définis dans la publication CIPR 60 (1990). Différentes valeurs sont données pour les neutrons en fonction de leur énergie cinétique d'incidence.

Comme pour la dose absorbée, la dose équivalente peut être dérivée et un taux de dose équivalente est ainsi défini :

$$\dot{H}_T = \frac{dH_T}{dt} [Sv.s^{-1}] \quad (A.4)$$

Enfin, la dose efficace permet d'obtenir une dose globale, pour le corps humain dans sa totalité, en prenant en compte la contribution de chacun de ses organes. En effet, chaque organe possède une sensibilité aux radiations qui lui est propre, et l'occurrence de cancers radio-induits y est directement liée [Jimonet 2009]. Pour chaque organe, une dose équivalente est calculée, et un facteur de pondération w_T (valeurs fournies dans le Tableau A.2) est appliqué :

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (A.5)$$

Il faut noter que ces différentes quantités sont malheureusement difficiles sinon impossibles à mesurer (pour rappel, il s'agit de quantités d'énergies absorbées par notre organisme). En pratique, elles sont estimées à l'aide de trois grandeurs opérationnelles qui sont mesurées manuellement ou à l'aide de dosimètres :

- l'équivalent de dose ambiant H^*d , qui est l'équivalent de dose à d mm de profondeur dans la sphère ICRU³⁷, qui est une bonne approximation pour les doses équivalentes reçues par les organes en profondeur en présence d'un rayonnement pénétrant. La valeur de d la plus courante pour cette mesure est 10 mm, et on parle alors dans ce cas de H^*10 ;

37. Qui est, pour rappel, une sphère de 30 cm de diamètre modélisant de façon très simplifiée le corps humain en termes de dimensions et de composition : 76,2% d'oxygène, 11,1% de carbone, 10,1% d'hydrogène, et 2,6% d'azote pour une densité de $1g.cm^3$.

A.1. Liste et description des différentes unités de dosimétrie

Tissu ou organe	w_T CIPR 60 (1990)	w_T CIPR 103 (2007)
Gonades	0.2	0.08
Mœlle osseuse (rouge)	0.12	0.12
Côlon	0.12	0.12
Poumon	0.12	0.12
Estomac	0.12	0.12
Vessie	0.05	0.04
Sein	0.05	0.12
Foie	0.05	0.04
Œsophage	0.05	0.04
Thyroïde	0.05	0.04
Peau	0.01	0.01
Surface des os	0.01	0.01
Cerveau	–	0.01
Glandes salivaires	–	0.01
Autre tissus/organes	0.05	0.12

Tableau A.2 – Valeurs des coefficients w_T pour le calcul de la dose efficace, selon les deux publications CIPRE numéros 60 (actuellement en vigueur dans la plupart des législations nationales) et 103 (recommandations les plus récentes de la CIPR).

- l'équivalent de dose directionnel $H'(d, \Omega)$, qui est l'équivalent de dose obtenu pour les rayonnements faiblement pénétrants, à une profondeur de d mm dans la sphère ICRU. La valeur la plus courante de d pour cette mesure est 0,07 mm ; on parle alors de $H^*(0,07, \Omega)$;
- l'équivalent de dose individuel $H_p(d)$, de fonctionnement identique aux deux grandeurs précédentes utilisée pour la dosimétrie personnelle. Il est notamment un bon estimateur de la dose efficace. Les profondeurs d utilisées en pratique sont les mêmes que celles de H^*d et $H'(d, \Omega)$, à savoir 10 mm et 0,07 mm.

Exposition interne aux radiations

Pour terminer cette rapide liste des différentes quantités dosimétriques, nous mentionnons les quantités concernant l'exposition interne aux radiations, suite à une ingestion ou une inhalation³⁸. En effet, les risques d'exposition aux radiations dans des installations telles que celles du CERN sont presque exclusivement externes à l'exception de quelques zones à risques comme par exemple TDC2 et TCC2 dans les zones cibles au nord du SPS, que nous avons mentionné dans cette thèse. En cas de contamination interne, il existe une quantité décrivant les doses reçues par voies internes : la dose engagée. Par définition, la dose engagée est :

- la dose reçue par l'organisme jusqu'à disparition complète du contaminant pour les radionucléides de période effective courte ;

38. Par exemple, de poussières radioactives ou de particules activées en suspension dans l'air.

Annexe A. Dosimétrie et effets biologiques des rayonnements ionisants

- la dose reçue sur 50 années pour l'exposition d'un adulte à des radionucléides de période effective longue, et sur 70 années pour un enfant.

La période effective mentionnée ci-dessus se calcule à partir de la demi-vie T du radionucléide et de sa période biologique T_b qui est la durée au bout de laquelle l'organisme élimine la moitié du radionucléide incorporé. La période effective est ainsi définie par :

$$T_e = \frac{T \times T_b}{T + T_b} \quad (\text{A.6})$$

Le débit de dose reçu par l'organisme à partir d'un radionucléide ingéré est, à un instant t donné après absorption des radionucléides :

$$\dot{D} = \dot{D}_0 \times e^{-\frac{t \cdot \ln 2}{T_e}} \quad (\text{A.7})$$

Et on en déduit la dose engagée :

$$D = \int_0^t \dot{D}_0 \times e^{-\frac{t \cdot \ln 2}{T_e}} [Gy] \quad (\text{A.8})$$

L'application à cette dose engagée de sommations sur l'ensemble des rayonnements ionisants émis, et sur l'ensemble des organes touchés en utilisant les coefficient multiplicateurs w_R et w_T adéquats permet, comme pour la dose absorbée, d'obtenir une dose équivalente engagée ainsi qu'une dose efficace engagée. Comme pour les quantités précédemment définies, il existe des moyens opérationnels d'estimer ces trois doses engagées qui sont compliquées sinon à mesurer en pratique. Nous ne rentrerons cependant pas plus dans les détails de ces quantités dosimétriques qui sortent déjà du cadre de cette thèse et référons le lecteur intéressé à [Jimonet 2009].

A.2 Effets biologiques

Nous avons vu dans le corps de la thèse que les radiations possèdent des effets stochastiques (mutations, cancers etc.) qui sont par nature imprévisibles et actuellement non reliés à des valeurs précises de doses de radiations absorbées, surtout en ce qui concerne les doses faibles. En revanche, les effets déterministes de radiations (brûlures, mort cellulaire, dommages neurologiques etc.) sont bien connus³⁹, et des valeurs-seuil sont liées à leurs apparitions respectives. C'est cette possibilité de prédire l'apparition qui rend possible l'utilisation de seuils légaux définissant des doses "acceptables" dans le cadre d'activités professionnelles.

Les effets déterministes apparaissent à 0,5 Sv, et la valeur de 20 mSv, largement inférieure, est couramment utilisée comme maximum autorisé dans les lois des différents états et dans les codes d'organisations internationales comme le CERN (hors situations d'urgence, qui peuvent entraîner des doses plus importantes : jusqu'à 250 mSv une seule fois dans la vie si des vies humaines sont en jeu).

39. À partir de l'analyse des données liées à des événements comme Hiroshima et Nagasaki, ainsi que quelques accidents industriels comme Tchernobyl ou, dans un futur proche, Fukushima.

A.2. Effets biologiques

Les tableaux suivants récapitulent les différents effets biologiques déterministes d'une exposition soit locale, soit globale et homogène de l'organisme à des rayonnements ionisants :

Peau	
1 Gy	Atrophie non observable (mort de quelques cellules basales)
5 Gy	Érythème (coup de soleil) et desquamation de l'épiderme
10 Gy	Cloques et ulcération (desquamation exudative) : derme et système vasculaire atteints
Œil	
1 Gy - 2 Gy	Opacité non évolutive
2 Gy - 5 Gy	Développement de la cataracte, précoce ou tardive
Gonades	
0.3 Gy	Stérilité provisoire chez l'homme
2 Gy	Stérilité provisoire chez la femme
5 Gy	Stérilité définitive chez l'homme
7 Gy	Stérilité définitive chez la femme
Embryon	Seuil admis : 0.1 Gy ⁴⁰
Du 1 ^{er} au 9 ^e jour	Tout ou rien : mort ou nidification normale
Du 9 ^e au 60 ^e jour	Risques de malformations
Phase fœtale	Risque de retard mental (surtout entre 60 ^e et 110 ^e jour)

Tableau A.3 – Compilation des effets biologiques déterministes suivant une exposition locale aux radiations. Source : [Jimonet 2009]

0.5 Sv	Seuil d'apparition des effets déterministes
> 0.5 Sv	Douleurs intestinales, perte d'appétit, nausées, diarrhée, vomissements
> 2 Sv	Destruction progressive de la moelle osseuse
> 5 Sv	Érythème et desquamation sèche
5 Sv	LD50 : dose létale pour 50% de la population exposée
6 Sv	Stérilisation définitive pour l'homme
8 Sv	Destruction totale de la moelle osseuse
10 Sv	Destruction de la muqueuse gastro-intestinale
12 Sv	Stérilisation définitive pour la femme
15 Sv	Desquamation avec formation de cloques
20 Sv	Dose létale

Tableau A.4 – Compilation des effets biologiques déterministes suivant une exposition globale et homogène de l'organisme aux radiations. Source : [IRA 2011]

A.3 Récapitulatif des exigences ALARA pour les interventions au CERN

Cette section récapitule les différentes exigences au CERN en termes de classification ALARA des interventions ainsi que les procédures mises en place pour chaque niveau. À partir des données présentées dans la première partie de cette même annexe, différents seuils de doses ont été élaborés afin de classer les interventions du point de vue du risque radiologique auquel elles exposent le personnel qui les effectue. Ces différents seuils sont illustrés dans la Figure A.1, et ils portent sur plusieurs grandeurs mesurées : le débit de dose estimé ou mesuré dans la zone d'intervention, les doses individuelles et collectives estimées ainsi que les contaminations surfacique et atmosphérique (air et matériaux) que l'on est susceptible de rencontrer en cours d'intervention.

Nous avons vu dans le chapitre 2 que le niveau ALARA d'une intervention impliquait différentes mesures dans la phase de planification. Le Tableau A.5, déjà donné dans le chapitre 2 (Tableau 2.3) récapitule ces différentes recommandations et exigences.

Enfin, précisons que cette classification ALARA des interventions s'accompagne d'une classification des différentes zones du CERN, en se basant également sur des valeurs-seuils de débits de doses ainsi que de contamination surfacique ou aérienne. Le document [Forkel-Wirth 2006] détaille cette classification, qui définit de plus les droit d'accès accordés dans les diverses zones aux différentes catégories de personnel, ainsi que les mesures de contrôle dosimétrique à mettre en œuvre dans chaque catégorie de zone. Un tableau récapitulatif extrait de ce document (en anglais) est donné en fin d'annexe (Tableau A.6) afin d'illustrer ce zonage.

A.3. Récapitulatif des exigences ALARA pour les interventions au CERN

CRITÈRE DE DÉBIT DE DOSE

Débit d'équivalent de dose prévisionnel ($\dot{H}$) dans la zone d'intervention :

50 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$		2 $\text{mSv}\cdot\text{h}^{-1}$	
niveau I	niveau II	niveau III	

CRITÈRE DE DOSE INDIVIDUELLE

Équivalent de dose prévisionnel individuel (H_I) pour l'intervention, ou pour l'ensemble des interventions de même nature lorsque celles-ci sont répétées plusieurs fois sur une année :

100 μSv		1 mSv	
niveau I	niveau II	niveau III	

CRITÈRE DE DOSE COLLECTIVE

Équivalent de dose prévisionnel collective (H_C) pour l'intervention, ou pour l'ensemble des interventions de même nature lorsque celles-ci sont répétées plusieurs fois sur une année :

500 μSv		10 mSv	
niveau I	niveau II	niveau III	

CRITÈRE DE CONTAMINATION ATMOSPHÉRIQUE

Activité aérienne spécifique CA :

5 CA		200 CA	
niveau I	niveau II	niveau III	

CRITÈRE DE CONTAMINATION SURFACIQUE

Activité surfacique spécifique CA :

10 CS		100 CS	
niveau I	niveau II	niveau III	

Figure A.1 – Classification des interventions au CERN en trois niveaux ALARA selon des critères dosimétriques [Bonnal 2006a]. Le niveau ALARA d'une intervention déclenche un certain nombre (croissant selon le niveau) de mécanismes de concertation, de réflexion et d'optimisation pour estimer, réduire les doses autant que possible en phase amont, et en mesurer la valeur réelle durant l'intervention ainsi que dans la phase de retour d'information.

Annexe A. Dosimétrie et effets biologiques des rayonnements ionisants

Type d'intervention	répétitives / génériques			ponctuels / unitaires		
Niveau de risque	I	II	III	I	II	III
Dosimétrie individuelle	●	●	●	●	●	●
Dosimétrie opérationnelle avec alarme	●	●	●	●	●	●
Dossier de sécurité	Docts. descriptifs	○	○			○
	Docts. justificatifs	○	●			●
	Docts. d'exploitation	○	○			○
Analyse de risques radiologiques	●	●	●	●	●	●
Calculs radiologiques / codes simples			●			●
Calculs radiologiques / codes élaborés			●			●
Justification par analyses multi-critères		○	●		○	○
Prise en compte du retour d'expérience	●	●	●	●	●	●
Dossier d'intervention en milieu radioactif	DIMR de niveau I	●		●		
	DIMR de niveau II		●		●	
	DIMR de niveau III					●
Cartographie dosimétrique	○	●	●	○	●	●
Relevé de décisions du comité ALARA			●			○
Fiche d'écart / Retour d'expérience	○	○	○	○	○	○

Tableau A.5 – Dispositions et livrables exigés (marques noires) et recommandés (marques blanches) lors de l'estimation du risque radiologique lié à une future intervention au CERN. Source : [Bonnal 2006a].

A.3. Récapitulatif des exigences ALARA pour les interventions au CERN

	Area classification	Dose limit	Ambient dose equivalent rate		Specific airborne radioactivity	Specific surface contamination	Access, Personnel categories	Monitoring, Personal dosimetry
			At permanent workplaces	In low-occupancy areas				
Controlled Radiation Area	Non-designated Area	1 mSv / y	< 0.5 μSv h ⁻¹	< 2.5 μSv h ⁻¹	0.05 CA	-	no restriction, all	passive or active, not required
	Supervised Radiation Area	6 mSv / y	< 3 μSv h ⁻¹	< 15 μSv h ⁻¹	< 0.1 CA		supervised, radiation workers and VCT	passive or active, personal dosimeter
	Simple Controlled Radiation Area	20 mSv / y	< 10 μSv h ⁻¹	< 50 μSv h ⁻¹	< 0.1 CA		controlled, radiation workers	active, personal dosimeter
	Limited Stay Area			< 2 mSv h ⁻¹	<100 CA	< 4000 CS		active, personal dosimeter and operational dosimeter
	High Radiation Area			<100 mSv h ⁻¹	< 1000 CA	< 40000 CS		
	Prohibited Area			> 100 mSv h ⁻¹	> 1000 CA	> 40000 CS		

Tableau A.6 – Tableau récapitulatif du zonage au CERN, défini selon des critères dosimétriques. On y retrouve des seuils de débits de dose et de contamination, ainsi que les droit d'accès des différentes catégories de personnel et les obligations concernant les mesures dosimétriques personnelles. Source : [Forkel-Wirth 2006].

Méthodes de planification et de modélisation d'interventions

Cette annexe récapitule et décrit sommairement les différentes méthodes de planification de projet et de modélisation de processus qui ont été comprises dans l'analyse ontologique du chapitre 3 (à l'exception de la DSM qui a déjà amplement été traitée).

B.1 Méthodes de planification et de simulation de projet

CPM and PDM

La méthode de la chaîne critique (CPM) puis la méthode des précédences (PDM) ont été développées indépendamment, respectivement dans les années 1950 et 1960 [Kelley 1959, Fondahl 1962, Crandall 1973]. Elles comptent parmi les premières méthodes analytiques de planification de projet.

Basées sur un formalisme de théorie des graphes, leur représentation est très simple : CPM est représentée en potentiel-étapes avec les activités représentées par les axes du graphe tandis que PDM est représentée en potentiel-tâches, où les activités sont sur les nœuds et les axes représentent les contraintes. Cette présence de contraintes dans PDM est d'ailleurs la principale différence entre les deux méthodes : PDM prend en compte quatre types de contraintes (fin-début, début-fin, début-début et fin-fin) quand CPM n'en considère qu'un seul (fin-début). Les deux représentations sont illustrées en Figure B.1.

En termes de calculs, chaque activité est associée à une durée. Le calcul du réseau est ensuite effectué en deux temps : les dates de début et de fin au plus tôt sont calculées par une “passe avant” en allant de la première à la dernière activité,

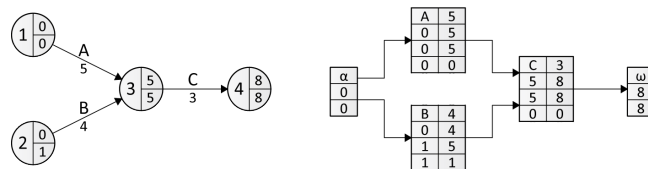


Figure B.1 – Réseaux d'activités CPM (potentiel-étapes) à gauche, et PDM (potentiel-tâches) à droite.

Annexe B. Méthodes de planification et de modélisation d'interventions

puis les dates de début et de fin au plus tard sont calculées en effectuant le chemin inverse (“passe arrière”). On peut alors calculer les marges libres et totales de chaque activité (correspondant aux retards qu’elle peut prendre sans affecter la durée totale du projet). Les activités dont les marges sont nulles sont sur le chemin critique, c’est à dire que toute modification de leur durée ou de leurs dates de début ou de fin aura un impact sur la durée totale du projet. Pour plus de détails sur les calculs, notamment des marges, le lecteur peut se référer à [Bonnal 2015].

RC-PSP

Les problèmes de planification sous contraintes de ressources (ou RC-PSP pour *Resource Constrained Planning and Scheduling Problems*) sont des problèmes basés sur des calculs de type CPM ou PDM (leur formalisme graphique est donc similaire) dans lesquels vient s’ajouter une phase de nivellement des ressources après assignation, ce qui introduit les contraintes logistiques dans la planification. En général, les conflits de ressources y sont résolus par un allongement de la durée estimée du projet.

Nous l’avons vu dans le chapitre 3, la résolution de tels problèmes est complexe et passe par l’établissement d’heuristiques et de règles de priorité pour départager les conflits d’assignation (durées d’exécution les plus longues en premier par exemple dans la méthode du *longest processing time* ou LPT), ce qui a donné lieu à une importante littérature [Brucker 1999, Schwindt 2005, Pinedo 2008]. Des algorithmes génétiques peuvent également être utilisés pour travailler sur ces problématiques. Les calculs de RC-PSP sont souvent coûteux en temps de calcul, et se rapprochent des problèmes de planification en intelligence artificielle.

PERT et autres modèles probabilistes

Créée en 1959 [Malcolm 1959], la méthode PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) a été développée parallèlement à CPM à laquelle elle ressemble en terme de formalisme graphique. Elle est l’une des méthodes de planification les plus populaires, et ce fut également la première à utiliser des données stochastiques en assignant non pas une durée mais une distribution de durée aux activités du réseau (distribution supposée β).

À chaque activité a_j du projet, on associe trois valeurs pour estimer sa durée d_j . Une valeur “réaliste” (d_{mj}), une deuxième valeur “optimiste” (d_{aj}) et la troisième “pessimiste” (d_{bj}) telles que $d_{aj} \leq d_{mj} \leq d_{bj}$. On peut alors calculer les moments statistiques pour chaque d_j :

$$E(d_j) = \frac{d_{aj} + 4d_{mj} + d_{bj}}{6} \text{ et } V(d_j) = \left(\frac{d_{bj} - d_{aj}}{6}\right)^2 \quad (\text{B.1})$$

Une fois ces grandeurs calculées pour chaque tâche du réseau, il est possible comme pour CPM de calculer le chemin critique du projet et d’estimer sa durée. La variance totale de la durée du projet correspond à la somme des variances des activités constituant le chemin critique.

B.1. Méthodes de planification et de simulation de projet

PERT implique cependant certaines hypothèses qui ne sont pas nécessairement toujours vraies : par exemple, pour des projets de petite taille, le chemin critique n'est en général pas suffisamment long pour pouvoir appliquer le théorème de *central limit*. D'autres méthodes probabilistes ont été développées pour remédier à ce problème comme les méthodes utilisant des simulations Monte Carlo pour approcher l'espérance mathématique des durées [Slyke 1963] ou encore la méthode de la chaîne critique (CCPM) [Goldratt 1997].

GERT

GERT fait partie des réseaux généralisés d'activités. Développés dans les années 1960, ces méthodes de simulation de projets cherchent à généraliser CPM, PDM ou PERT trop limitées en termes de représentation stochastique des données [Elmaghraby 1977]. Elle est en effet inexistante dans CPM-PDM et concerne uniquement les durées dans PERT, et non, par exemple, le succès ou l'échec d'une activité, ce qui ne correspond pas suffisamment aux situations réelles comme l'indique Elmaghraby.

La méthode GERT (*Graphical Evaluation and Review Technique*) a été développée par Pritsker et ses collaborateurs [Pritsker 1966a, Pritsker 1966b, Pritsker 1969, Whitehouse 1969] et a donné naissance à tout une famille de méthodes (GERTS, GERTS-R ou GERT-Q). Elle introduit un formalisme graphique comprenant une logique d'entrée et de sortie étendue pour les différents nœuds du réseau (cf. Figure B.2). Les arcs représentent les activités, et sont associés à une distribution de durée, à une probabilité de réalisation, ainsi qu'à une paire unique de nœuds du réseau.

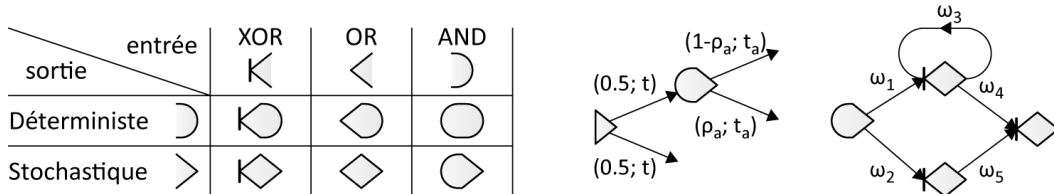


Figure B.2 – La logique de GERT, accompagnée d'exemples de réseau.

Un graphe exprimé en GERT est résolu selon un processus en cinq étapes [Pritsker 1966a]. Il permet de calculer des durées et des probabilités de réalisation moyennes pour les activités et le projet global, et des fonctions comme la *transmittance* permettent d'estimer la performance du modèle.

De nombreuses applications différentes de GERT sont fournies par Pritsker et al. (notamment dans [Pritsker 1966b]) comme la modélisation de procédés de manufacture, les projets de R&D, la signature de contrat ou la modélisation de lois de probabilités et de problèmes mathématiques. Mais comme la plupart des réseaux d'activités généralisés, GERT est assez compliquée à utiliser et son implémentation est restée limitée.

VERT

VERT, acronyme de *Venture Evaluation and Review Technique* est comme GERT une méthode qui simule des projets en utilisant les réseaux d'activités généralisés. Sa particularité à l'époque de son développement en 1972 venait du fait de sa spécialisation dans l'analyse de risques concernant trois facteurs : le temps, le coût et la performance, quand la plupart des méthodes ne se concentraient à l'époque de son développement que sur l'aspect temporel et éventuellement sur le coût des ressources [Moeller 1981].

Comme pour GERT, un réseau VERT est composé d'arcs et surtout de nœuds présentant une logique extrêmement étendue : quatre types en entrée (*INITIAL*, *AND*, *PARTIAL* et *OR*) et six en sortie (*TERMINAL*, *ALL*, *MONTE CARLO*, *FILTER*, *FILTER 2* et *FILTER 3*). Les nœuds comme les arcs sont associés à trois grandeurs qui peuvent être fournies sous forme d'une distribution stochastique (treize distributions sont disponibles) : une durée, un coût et un indice de performance (par exemple une quantité produite, ou n'importe quel autre indice choisi y compris des combinaisons sans dimension de plusieurs facteurs)

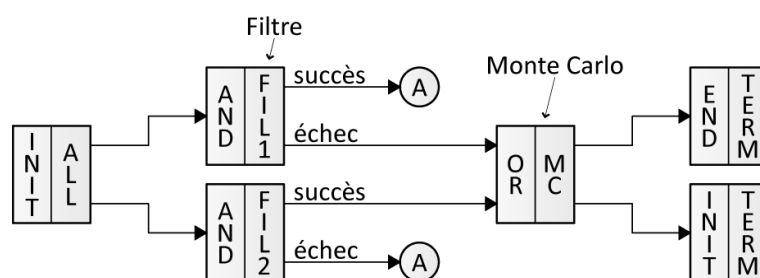


Figure B.3 – Exemple de réseau d'activités VERT.

Un réseau VERT se termine avec des issues multiples (succès et échecs) et les résultats des simulations sont collectés sous forme d'histogramme listant les occurrences de chacune, ce qui permet d'estimer les probabilités de succès ou d'échec du projet modélisé.

Decision Box

Suite au succès de PERT, Howard Eisner a proposé en 1962 la méthode de la *Decision Box*⁴¹ [Eisner 1962]. Quelques années avant les réseaux d'activités généralisés, cette méthode visait déjà à généraliser PERT en prenant des phénomènes stochastiques en compte non pas en termes de coûts ou de performances, mais en considérant que certaines tâches pouvaient échouer ou tout simplement que des choix pouvaient être effectués durant un projet, faisant que certaines tâches pouvaient tout simplement ne jamais être exécutées. Cette méthode visait essentiellement à modéliser des projets incertains comme les projets de recherche et de développement.

41. *Boîte de Décision* en français. Nous conservons le nom original de la méthode dans le texte.

B.1. Méthodes de planification et de simulation de projet

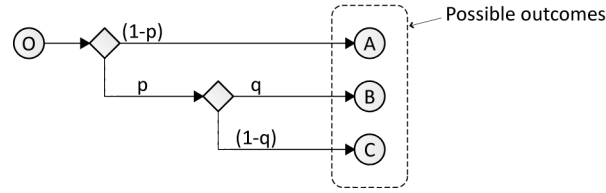


Figure B.4 – Exemple d'un réseau de *Decision Box* à trois issues.

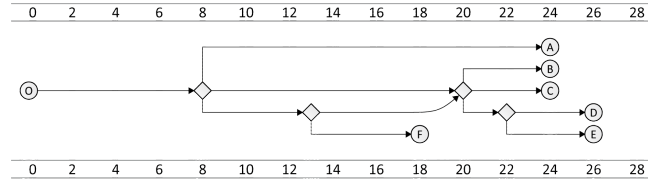


Figure B.5 – Réseau *Decision Box* avec informations temporelles.

Un réseau de *Decision Box* contient trois principaux éléments : des cercles représentant les événements et issues du projet, des losanges représentant les décisions avec de multiples alternatives. La logique de sortie n'est pas clairement définie : des choix exclusifs comme des exécutions simultanées sont possibles mais surtout, ce sont les probabilités d'emprunter un arc qui sont données. Les arcs relient les événements et les décisions, chaque arc étant associé à une probabilité d'exécution et éventuellement à une durée (ou à une distribution temporelle identique à celle du PERT) si une planification doit être effectuée en plus de la simulation.

L'objectif de la simulation est de calculer la probabilité associée à chaque issue du réseau. Un chemin long sur lequel de nombreuses branches sont traversées aboutissant nécessairement sur une probabilité plus basse de succès compte tenu de la probabilité d'échec de chaque arc, Eisner a introduit une quantité qu'il nomme *entropie* permettant de moyenner l'information et de comparer les différents chemins sans tenir compte de leur longueur. Pour un chemin de longueur n , l'entropie s'obtient de la façon suivante (où p_i est la probabilité de réalisation du i^{me} arc du chemin) :

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log(p_i) \quad (\text{B.2})$$

Notons enfin que l'ajout d'informations temporelles permet de représenter le réseau à l'aide d'un calendrier (cf. Figure B.5).

CYCLONE

La simulation de projets de construction a été développée comme la plupart des méthodes présentées ici depuis les années 1960. Son objectif est d'évaluer parmi d'autres grandeurs la productivité, les risques ou l'assignation des ressources sur un chantier de construction. Parmi ces méthodes, *Cyclic Operation Network* (CY-

Annexe B. Méthodes de planification et de modélisation d'interventions

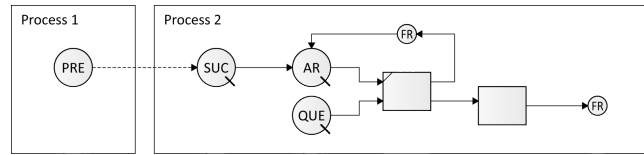


Figure B.6 – Exemple d'un réseau CYCLONE comportant deux sous-projets.

CLONE) développée par Daniel Halpin [Halpin 1973, Sawhney 1998] a donné lieu à quelques applications couronnées de succès dans l'industrie [Halpin 1999].

Un réseau CYCLONE comporte cinq éléments de base dont certains sont illustrés en Figure B.6 au travers desquels les ressources circulent un peu comme des jetons dans les réseaux de Petri (cette méthode CYCLONE, résolument orientée vers la gestion de projet est en ce sens proche de certaines techniques de modélisation de processus que nous abordons dans la section suivante, la plaçant à la limite des deux sections). Le nœud *COMBI* (représenté par un rectangle dont l'angle supérieur gauche est barré) est utilisé pour les tâches dépendant d'au moins une ressource. Le compteur (*COU*, représenté par un petit drapeau triangulaire) sert comme son nom l'indique à compter les unités qui le traversent. La "fonction" (*FUN*, représentée par un cercle) sert de réservoir : des unités peuvent y être accumulées. Enfin, le nœud *NORMAL* (représenté par un rectangle) est utilisé pour les tâches ne présentant pas de contrainte et la queue (*QUE*) collecte les ressources inactives (accompagnant ainsi toujours un nœud *COMBI*).

Quatre nœuds additionnels ont été ajoutés à cet ensemble de base : l'allocation de ressources (*AR*) et inversement leur libération (*FR* pour *free ressource*) qui complètent le fonctionnement des nœuds *QUE* et *FUN*. Enfin, les connecteurs (*Pre*) et (*Suc*) permettent de relier entre eux plusieurs projets ou sous-projets.

B.2 Modélisation et simulation des processus

ANSI Flowcharts

Publiés en 1970, les diagrammes *ANSI Flowcharts* font partie des efforts de standardisation de la conception et de l'utilisation des diagrammes de modélisation de processus. Ces efforts ont été effectués face à la popularité croissante de ces diagrammes pendant les années 1960 dans de nombreux domaines, parmi lesquels l'informatique ou les processus d'affaires [Chapin 1970]. Ce standard distingue trois catégories de symboles de représentation : les symboles basiques, additionnels et spécialisés.

L'exemple de la Figure B.7 n'utilise que des symboles basiques et additionnels. On distingue quatre symboles de base : les symboles *input* et *output* pour la circulation des données (fichiers, informations temporelles, ressources, etc.), le symbole *process* qui est rectangulaire et représente les activités, la *flowline* (ligne de flux) qui est l'arc représentant le flux de travail, et les annotations pour commenter le

B.2. Modélisation et simulation des processus

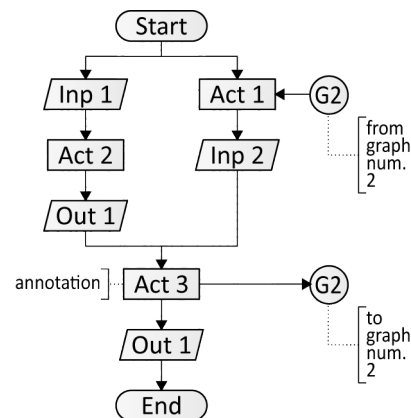


Figure B.7 – Exemple de processus modélisé en ANSI Flowcharts.

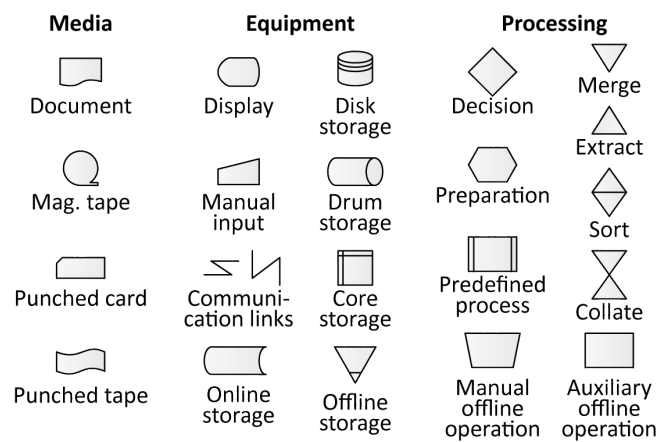


Figure B.8 – Les symboles spécialisés du standard ANSI Flowcharts.

Annexe B. Méthodes de planification et de modélisation d'interventions

processus. Les trois symboles additionnels sont les connecteurs qui permettent de relier plusieurs diagrammes ou plusieurs parties d'un même diagramme (ce qui permet par exemple de détailler sur un autre document un sous-processus), le symbole *terminal* pour marquer le début, la fin ou un point d'arrêt dans le processus, et enfin, le branchement qui permet de représenter des activités parallèles.

Les symboles spécialisés sont représentés en Figure B.8, mais nous ne les décrivons pas en détail car la plupart sont obsolètes : ce standard n'a en effet jamais été mis à jour, la faute à une faible utilisation. On y retrouvait des supports de données et des équipements usuels en 1970, comme les bandes magnétiques et autres cartes perforées, ainsi que quelques compléments à la représentation du flux de travail dans les parties *processing* et *equipment*.

Process Flow Diagram

Première méthode structurée pour représenter les processus, le *Process Flow Chart* (PFC) et ses symboles ont été présentés à l'ASME en 1921 par Franck Gilbreth. Reprise dans les années 1930 par Allan Mogensen dans de nombreuses conférences, puis par un de ses étudiants, Ben Graham, qui l'adapta à la modélisation de systèmes d'information dans les années 1940 [Graham 2003], la notation du PFC est même devenue un standard de l'ASME pour la représentation des opérations et du flux de travail, près de 25 ans après la présentation initiale de Gilbreth.

Le PFC est à l'origine un diagramme linéaire vertical (Graham l'a par la suite adapté en version horizontale) qui utilise cinq symboles principaux comme illustré en Figure B.9. Il se lit de haut en bas, et chaque tâche y est brièvement décrite. Les symboles désignent le type de tâche effectuée : un cercle représente les opérations (modification physique d'un produit), un rectangle une vérification ou une inspection, une flèche un transport (logistique), un triangle le stockage et une sorte de D allongé est utilisé pour les délais dans le processus.

Le PFC est un outil simple et efficace pour retracer les flux d'objets ou de personnes dans un processus. Son objectif premier était d'aider les gens à effectuer

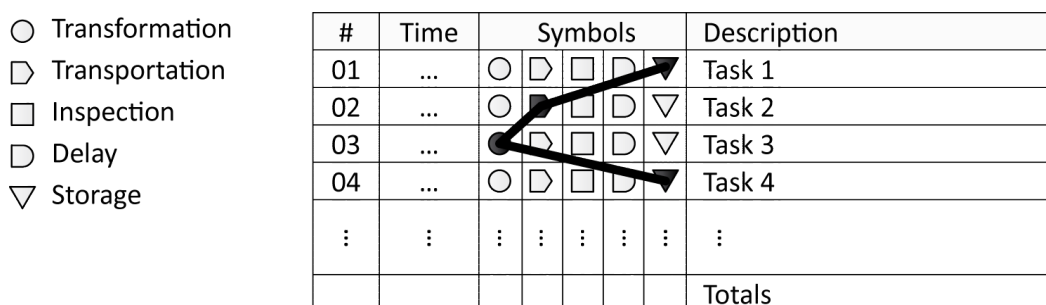


Figure B.9 – Symboles du PFC et illustration d'un processus dans cette représentation.

B.2. Modélisation et simulation des processus

mieux leurs tâches, et de répondre simplement aux questions de base posées sur un processus : “Quel en est l’objectif et comment est-il atteint?”, “Qui fait quoi, où et quand?”. Ses principaux défauts sont cependant l’absence de représentation des ressources, ainsi que des alternatives ou des décisions humaines.

Les réseaux de Petri

Les réseaux de Petri ont été développés en 1962 par Carl Adam Petri. Il s’agit d’une méthode de modélisation à la fois graphique et mathématique pour représenter les systèmes discrets et leurs transitions d’états. Les réseaux de Petri peuvent être utilisés pour modéliser des systèmes stochastiques, fonctionnant en parallèle et de façon asynchrone. Mathématiquement, un réseau de Petri noté (N, M_0) est défini par le quintuplet $PN = (P, T, F, W, M_0)$ tel que :

- $P = \{p1, p1, \dots, pm\}$ est un ensemble de *places* ;
- $T = \{t1, t1, \dots, tm\}$ est un ensemble de *transitions* ;
- $F \subset (P \times T) \cup (T \times P)$ est un ensemble d’arcs (*flow relations*) ;
- $W : F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ est une fonction de pondération ;
- $M_0 : P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ est le *marquage initial* (état initial du système) ;
- $P \cap T = \emptyset$ and $P \cup T \neq \emptyset$.

Ces expressions définissent un graphe binaire pondéré, également appelé réseau P/T ou réseau de *places/transitions* en référence à ses constituants : les *places* représentées circulairement où sont stockés des *jetons*, et les *transitions*, représentées par des barres rectangulaires, qui représentent les activités dans le cas de la modélisation d’un processus. Les arcs relient entre elles exclusivement les *places* et les *transitions* et vice versa, mais jamais deux *places* ou deux *transitions*. Un état du système, également appelé *marquage*, correspond à un placement de jetons dans les différentes *places* à un instant donné.

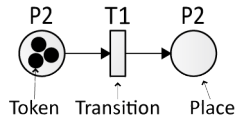


Figure B.10 – Représentation d’un élément de réseau de Petri

Une *transition* peut être déclenchée si la place qui la précède contient le nombre de jetons adéquat à son exécution. Ces derniers sont alors consommés, et la *transition* génère alors dans ses *places* de sortie un nombre défini de *jetons*, ce qui crée un nouveau *marquage*. Bien que les réseaux de Petri puissent modéliser des systèmes stochastiques, l’exécution d’une transition est un phénomène déterministe. Plus de propriétés des réseaux de Petri peuvent être consultées dans [Murata 1989]. Des versions plus élaborées des réseaux de Petri ont été développées. C’est le cas des réseaux de Petri colorés (*Coloured Petri Nets* ou CPN) qui attribuent des valeurs (appelées *couleurs*) aux jetons et associent aux arcs des expressions qui doivent être respectées pour déclencher les transitions [Jensen 1997]. Des réseaux de Petri implémentant des

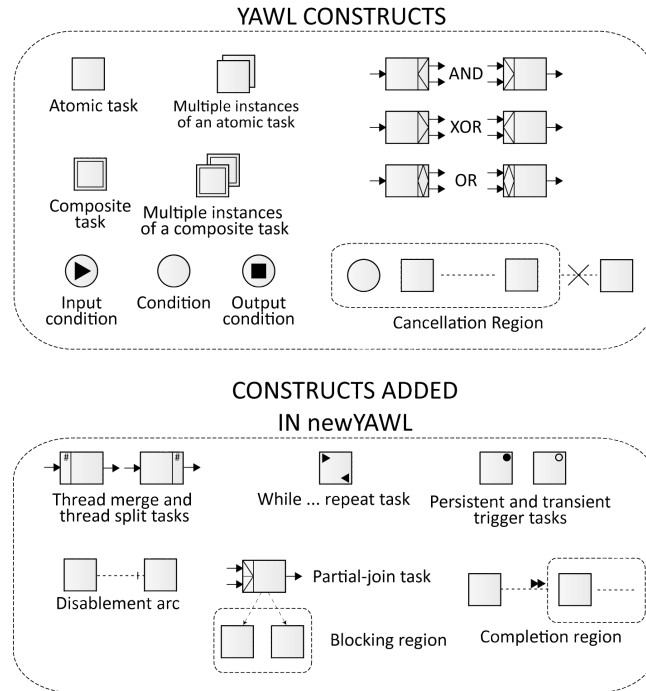


Figure B.11 – Symboles de YAWL et newYAWL.

délais, des durées (réseaux de Petri temporels) et même des distributions de durées (réseaux de Petri stochastiques) existent également.

YAWL

YAWL signifie *Yet Another Workflow Language* (littéralement, “encore un langage de modélisation de flux de travail”). Ses créateurs ont cependant jugé son développement nécessaire pour obtenir une méthode de modélisation basée sur un formalisme mathématique (en l’occurrence celui des CPN mentionnés précédemment) tout en étant résolument tournée vers la modélisation des processus d’affaires, contrairement aux réseaux de Petri bien plus généralistes [Van der Aalst 2005, Van der Aalst 2011]. La méthode obtenue contient environ une vingtaine d’éléments décrivant le flux de travail et échangeant des données. Des connexions logiques *ET*, *OU* et *OU exclusif* (*AND*, *OR* et *XOR*) y sont également disponibles.

YAWL manquant d’éléments pour représenter certaines situations comme les séparations ou les fusions de flux, les déclenchements d’événements, les itérations ou la récursion, les auteurs l’ont révisée pour en créer une seconde version appelée newYAWL [Russell 2007]. La Figure B.11 représente les différents éléments des deux versions de YAWL, et la Figure B.12 illustre un réseau d’activités newYAWL.

B.2. Modélisation et simulation des processus

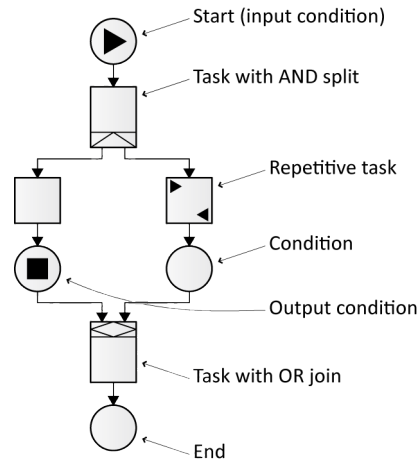


Figure B.12 – Exemple de réseau newYAWL.

SADT/IDEFØ

Le diagramme SADT (*Structured Analysis and Design Technique*) est une méthode graphique développée entre 1969 et 1973 par Douglas T. Ross et SofTech Inc [Ross 1977b, Ross 1977a]. Il s'agit d'une méthode permettant de décomposer les systèmes et les processus. Le standard IDEFØ, qui fait partie de la suite de standards IDEF (*Integration Definition*) est basé sur le SADT et n'en diffère que sur quelques éléments de syntaxe [Kreimeyer 2009].

Le SADT d'un système ou d'un processus est une série de diagrammes ordonnés selon un ordre hiérarchique, du plus global au plus détaillé. Ces diagrammes respectent une structure simple : les éléments structurels (sous-systèmes ou activités) sont des rectangles, et des arcs les relient les uns aux autres. La combinaison de ces éléments simples additionnée à des commentaires descriptifs permet à l'utilisateur de communiquer autour des flux en entrée et en sortie d'un élément structurel (respectivement arcs à gauche et à droite d'une boîte), les mécanismes mis en œuvre (arc arrivant en dessous) ou les contrôles nécessaires (arc arrivant au dessus).

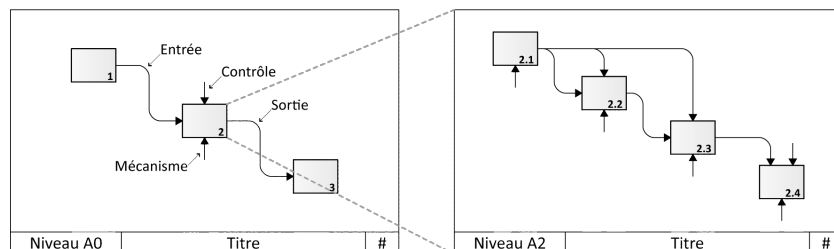


Figure B.13 – Exemple simple de diagramme SADT.

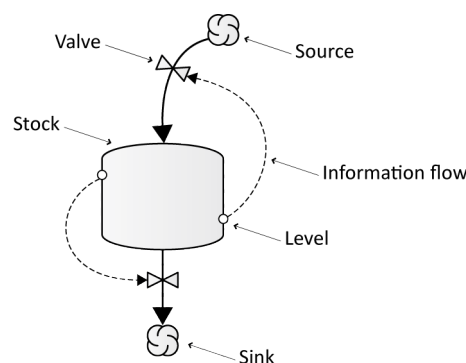


Figure B.14 – Les éléments de la représentation *Systems Dynamics*

De plus, comme mentionné précédemment, chaque élément structurel peut à son tour être décomposé en un diagramme jusqu'à atteindre les éléments de plus bas niveau au sein du système ou du processus. Afin de garder une trace de la décomposition du système, chaque diagramme porte une référence au diagramme de niveau supérieur dont il est issu. Un exemple est donné en Figure B.13.

Systems Dynamics

Dans le cadre de ses travaux sur la dynamique des systèmes complexes, Jay W. Forrester a développé cette méthode de modélisation au cours des années 1950 [Forrester 1961]. D'abord utilisée dans l'industrie, elle a vu son utilisation étendue à d'autres disciplines comme par exemple les sciences sociales. *Systems Dynamics*, ou en français *la dynamique des systèmes* a pour utilité la modélisation des mécanismes qui sous-tendent les comportements et les évolutions complexes et parfois contre-intuitives des systèmes. Elle permet de tester des hypothèses et des scénarii de façon dynamique, et était à sa création l'une des seules méthodes permettant de modéliser des évolutions temporelles et les comportements des systèmes.

L'idée derrière cette méthode est de se débarrasser des équations différentielles, très compliquées à résoudre dans des systèmes complexes (possédant de nombreux couplages entre leurs variables) lorsque l'on considère le temps comme une variable continue, en les remplaçant par un modèle dynamique discrétisé. Ce modèle a pris la forme de quatre éléments graphiquement représentables : des réservoirs qui contiennent des ressources en quantités données (encore une fois un peu comme des jetons), les flux qui font circuler les ressources entre les réservoirs, et enfin les valves qui régulent les flux selon les stocks disponibles (cf. Figure B.14).

FFBD and EFFBD

Dans le manuel d'ingénierie des systèmes de la NASA [NASA 2007], le *diagramme de flux fonctionnel par blocs* (FFBD en anglais pour *Functional Flow Block Diagram*) est indiqué comme l'une des méthodes recommandées pour procéder à

B.2. Modélisation et simulation des processus

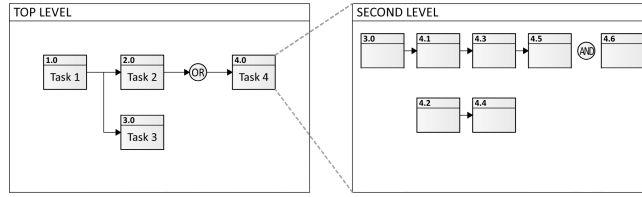


Figure B.15 – Exemple de FFBD

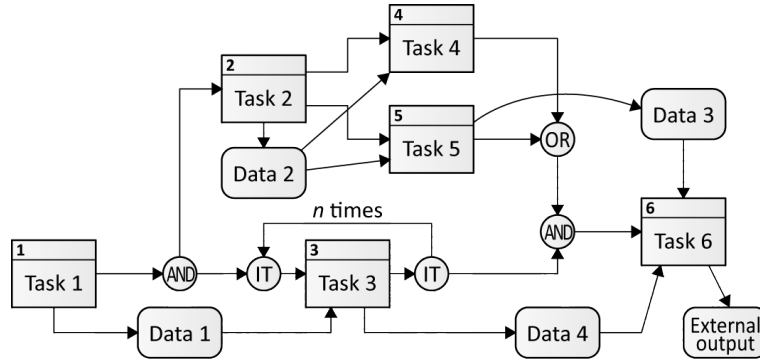


Figure B.16 – Exemple de EFFBD, avec flux de données.

l'analyse fonctionnelle d'un système ou d'un projet, tout particulièrement pour représenter les séquences de tâches et leurs relations internes.

Un FFBD est bâti comme un diagramme contenant les blocs fonctionnels de façon ordonnée et numérotée, ce qui permet ensuite leur décomposition en diagrammes de niveaux hiérarchiques inférieurs tout en gardant une référence de cette décomposition, à la façon d'un SADT. Les blocs sont connectés par des arcs (fléchés ou non) représentant les flux de travail.

Le FFBD propose une logique riche, permettant d'obtenir des flux parallèles (*AND*), de choisir des alternatives (*OR* et *XOR*) ou d'alterner entre plusieurs options (*GO* et *no-GO*, notées aussi *G* et $\overline{G}$). Des fonctions plus avancées sont disponibles comme l'itération, la répétition, et la boucle (respectivement *IT*, *RP* et *LP*).

Le FFBD ne représentant que le flux de travail et non le flux de données, une version améliorée, le EFFBD (*Enhanced FFBD*) a été développée. Elle permet donc d'ajouter aux fonctions et à la logique décrite ci-dessus les flux de données (notamment documentaires, pour les différents livrables) qui accompagnent chaque étape du processus ou chaque élément du système modélisé. Le manuel de la NASA cité précédemment préconise également de combiner l'utilisation du FFBD à celle du diagramme N^2 pour les interactions entre fonctions.

IDEF3 : Process Description Capture Method

IDEF (pour *Integration Definition*) est un ensemble de quinze standards de notations à divers objectifs, orientés essentiellement vers le développement logiciel et

Annexe B. Méthodes de planification et de modélisation d'interventions

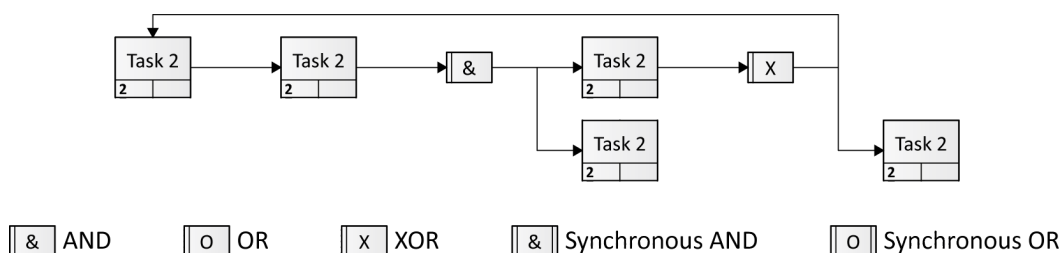


Figure B.17 – Diagramme IDEF3 en vue PFD (orientée-processus).

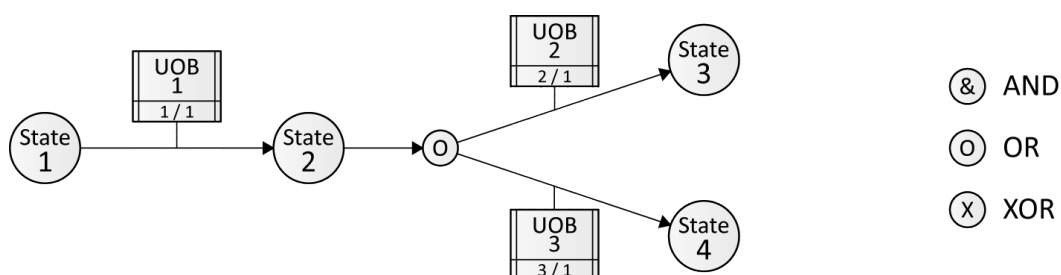


Figure B.18 – Diagramme IDEF3 en vue OSTN (orientée-objet).

l'analyse orientée objet. IDEF3 est en revanche adaptée à la modélisation des processus d'affaire comme indiqué notamment dans [Kreimeyer 2009] et [IDE 2010].

IDEF3 est une notation exclusivement graphique permettant de définir des *descriptions structurées* de processus ou de systèmes. Il existe deux “vues” différentes d'IDEF3 fournissant des informations sur les liens de précédence ainsi que les relations temporelles et causales entre tâches ou objets : une vue orientée-processus (appelée *Process Flow Description* ou PFD) et une vue orientée-objet (appelée *Object State Transition Network* ou OSTN).

La vue PFD d'IDEF3 (Figure B.17) se focalise sur les tâches constituant les processus et leurs relations. Les tâches sont représentées par des boîtes appelées *unités comportementales* (*Units of Behaviour* ou UoB en version originale). Chaque UoB comporte trois parties : sa description, une référence IDEF permettant de décomposer chaque UoB en sous-diagramme, et une numérotation. Ces UoB sont connectées par des arcs appelés *liens* et des opérateurs logiques (*AND*, *OR*, *AND synchrone*, *OR synchrone*, et *XOR*) sont également disponibles.

La vue OSTN (Figure B.18) s'intéresse aux différents états successifs occupés par un objet au cours d'un processus. Dans cette représentation, l'objet dans ses différents états est représenté par des cercles reliés entre eux par les arcs représentant les transitions entre états. Une UoB peut être attachée à un arc de transition pour donner des informations sur l'activité qui en est à l'origine. Les liens logiques disponibles dans la vue orientée-processus sont également utilisables.

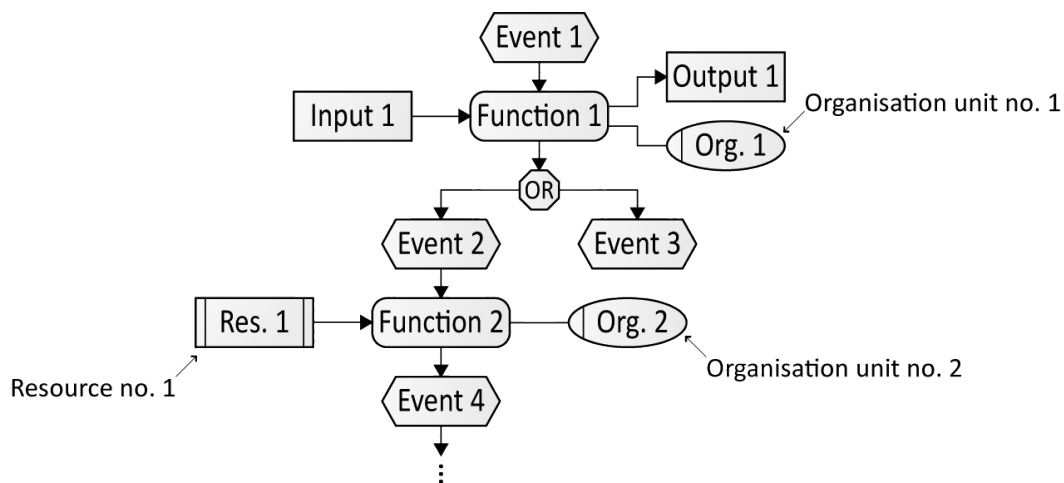


Figure B.19 – Exemple de processus modélisé par EPC.

EPC

La méthode EPC (*Event-Driven Process Chain*) est une méthode de modélisation de flux de travail et de processus. Très utilisée dans l'industrie allemande, elle est, comme YAWL, une extension du formalisme des réseaux de Petri [Kreimeyer 2009, Scheer 2005].

EPC utilise un nombre restreint d'éléments graphiques (cf. Figure B.19) dans lesquels circulent des *jetons*. Les événements sont des éléments passifs, représentés par des hexagones. Ils décrivent les préconditions à l'exécution d'une fonction et les conséquences qui en résultent. Ils sont aussi utilisés pour représenter les états initial et final du processus. Les fonctions sont des rectangles aux angles arrondis. Elles représentent les activités du processus modélisé, et peuvent comme pour le SADT ou le FFBD être décomposées en un EPC plus détaillé. Enfin, à chaque fonction est associée une *unité organisationnelle* (représentée par un ovale) qui modélise la personne ou le service au sein de l'organisation qui sera responsable de son exécution.

À ces éléments s'ajoutent des flux de données représentés à l'aide de rectangles qui modélisent les données entrantes et sortantes des fonctions, mais aussi les ressources nécessaires. Des connecteurs logiques *AND* (*branch/merge*), *OR* et *XOR* (*split/join*) sont également utilisables.

Enfin, comme IDEF3, EPC possède une vue orientée-objet dans lequel un objet et ses différents états sont suivis tout au long d'un processus.

ebXML-BPSS

ebXML (*Electronic Business using eXtensible Markup Language*) est un ensemble de spécifications pour le e-business, développées par une des filiales des Nations unies (UN/CEFACT) et l'organisation OASIS (Organization for the Advancement of Structured Information Standards) [UN/CEFACT and OASIS 2001]. Parmi ces

Annexe B. Méthodes de planification et de modélisation d'interventions

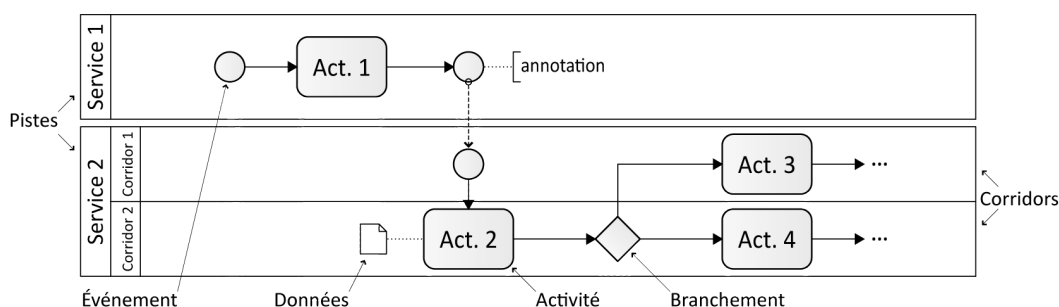


Figure B.20 – Exemple simple de BPMN avec deux pistes.

spécifications se trouvent trois standards de modélisation en XML, dont le *ebXML Business Process Specification Schema* (ebXML-BPSS) servant à modéliser les collaborations et les processus d'affaires.

Il ne s'agit donc pas d'une méthode graphique à proprement parler, mais elle permet de spécifier efficacement des collaborations entre acteurs qui occupent différents rôles. Une collaboration de base est une collaboration binaire, dans laquelle des documents (des requêtes, des réponses, des notifications, des conversations, etc.) sont échangés au cours de *transactions* entre les rôles. La transaction représente ainsi l'activité élémentaire du processus. Une collaboration est associée une succession ordonnée de transactions appelée *chorégraphie* de la collaboration.

Le formalisme d'ebXML-BPSS n'est pas graphique comme nous venons de le voir. Cependant, il en existe deux versions, une version XML exécutable et une version UML qui s'apparente à un diagramme de classes UML permettant d'établir des correspondances entre un formalisme purement XML et des diagrammes graphiques, par exemple de classes ou d'activités présents dans UML [UN/CEFACT and OASIS 2001].

BPMN

BPMN signifie *Business Process Modeling and Notation*. Ce standard géré par l'*Object Management Group* (OMG) a été publié en 2004 pour la première fois, et sa version 2.0 a été publiée en mars 2011 [Object Management Group 2011].

Le BPMN sert à spécifier le flux de travail lors de processus d'affaires. Son objectif est de permettre une représentation intuitive de processus complexes sous forme de diagrammes. Des liens avec des langages XML tel que le BPEL (*Business Process Execution Language*) existent, ce qui permet de créer des modèles exécutables à partir du BPMN. Sans aller jusqu'à cette conversion en XML, le BPMN est également une méthode exécutable dans le style des réseaux de Petri, avec la possibilité dans certaines applications logicielles d'utiliser une circulation de jetons dans les modèles.

Le BPMN comprend quatre catégories d'éléments graphiques : les *objets de flux*, les *connexions*, les *voies* et les *artefacts*. Les objets de flux concernent les événements (début, fin, intermédiaire), les activités (tâches élémentaires, boucles, instances mul-

B.2. Modélisation et simulation des processus

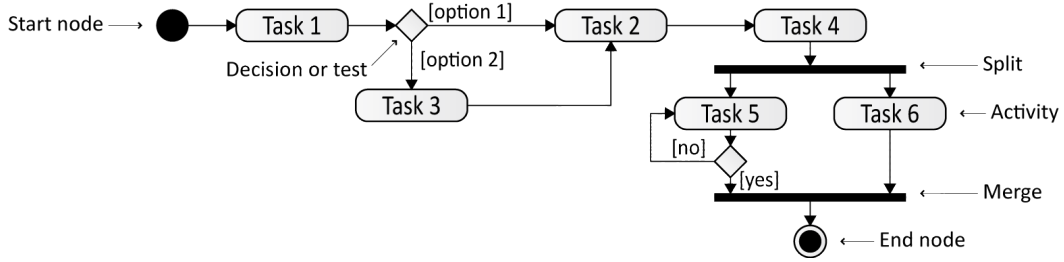


Figure B.21 – Exemple de diagramme d'activité UML

tiples, etc.) mais aussi une grande variété de connexions logiques appelées *branchements*⁴² (décisions, séparation et fusion de flux). Les connexions désignent les différents types d'arcs reliant les éléments du modèle. Elles peuvent représenter les flux de travail et de données, et parfois simplement relier des informations additionnelles à un élément donné. Les voies, appelées pistes ou corridors (*pools et lanes* en anglais) représentent les différents services et entités responsables des différents éléments du processus modélisé. Enfin, les artefacts représentent les différentes informations supplémentaires comme les annotations ou les groupes d'activités associés. Un schéma récapitulatif est donné en Figure B.20.

Le BPMN permet une représentation extrêmement complète des processus réels à l'aide de son important nombre d'outils de modélisation. Cependant, cela mène simultanément à des interprétations très différentes de personne à personne, et la clarté des modèles BPMN est souvent leur point faible [Recker 2009].

UML 2.0 Activity Diagram

Le standard Unified Modeling Language (UML) a été créé en 1997 et est géré comme le BPMN par l'OMG. [OMG 2011]. Il s'agit d'un ensemble de quatorze diagrammes destinés à modéliser chaque étape de développement d'un nouveau logiciel. Les diagrammes proposés sont séparés en deux catégories : sept diagrammes dits *de structure*, qui s'intéressent à la structure statique des données et du logiciel, et les diagrammes dits *de comportement*, dynamiques et représentant les interactions et les comportements du système et de ses éléments.

Le diagramme d'activité UML appartient à la seconde catégorie, et peut également être utilisé non seulement pour modéliser les différentes étapes d'un processus computationnel, mais aussi, compte tenu des outils qu'il met à disposition, pour représenter des activités au sein de processus d'affaires [Kreimeyer 2009]. C'est particulièrement vrai depuis la version 2.0 du standard. Il est en effet possible de modéliser à la fois les flux de travail et de contrôle, mais également les flux de données et les unités organisationnelles responsables d'un processus ou d'une de ses parties à l'aide de systèmes proches des pistes du BPMN.

42. Ou *gateways*, dans la version originale.

Annexe B. Méthodes de planification et de modélisation d'interventions

Le diagramme d'activités UML permet ainsi la modélisation d'événements et d'activités (séquentielles ou parallèles, à l'aide de fourches et de jonctions). Les activités peuvent être étendues dans un diagramme UML de niveau inférieur, et sont composées d'actions élémentaires. Les décisions sont également modélisées (sous forme de losanges) et permettent de séparer le flux selon plusieurs issues. Enfin, les objets associés aux activités ou plus généralement au processus sont également représentables sous la forme de rectangles.

La Figure B.21 fournit un exemple très basique de diagramme d'activité UML, mais de nombreuses options sont disponibles pour la représentation des activités (boucles, activités complexes, paramètres d'activités etc.). Voir par exemple [Visual-Paradigm 2014].

Ontologie de Bunge Wand et Weber : définitions et évaluations

L'ontologie de Bunge, Wand et Weber (ontologie BWW) nous a servi de méta-modèle pour évaluer et comparer les différentes méthodes de modélisation et de planification présentées dans le chapitre 3 de cette thèse ainsi que dans l'annexe B.

Cette annexe fournit dans un premier temps la définition des éléments de cette ontologie, puis les évaluations ontologiques des diverses méthodes comparées. Ces travaux ont été effectués en anglais.

C.1 Définitions des éléments de l'ontologie

Le Tableau C.1 suivant liste et définit les éléments de l'ontologie BWW. On y retrouve les grandes catégories d'éléments d'une ontologie :

- les objets ;
- les classes d'objets ;
- les attributs des objets et des classes ;
- les états pris par les objets ;
- les événements et transformations qui modifient les attributs des objets et affectent ainsi leur état.

La méthode d'évaluation par l'ontologie BWW des méthodes de modélisation de processus d'affaires a été employée dans de nombreux travaux. L'article [Recker 2009] en reprend un nombre important et effectue une comparaison de taille conséquente qui a pu en partie nous servir de base de comparaison.

L'ontologie BWW a été employée dans ces travaux principalement pour deux grandes raisons : sa vision systémique de l'ontologie (en particulier, les éléments de cet ontologie qui décrivent les systèmes et leur décomposition ne sont pas présents dans toutes les ontologies), ainsi que sa clarté et la bonne formalisation de sa définition (malgré tout, une part de subjectivité subsiste dans l'interprétation que chacun peut parfois en faire, comme nous l'avons constaté au cours de nos travaux). Le nombre relativement important de travaux utilisant cette méthode ajoute à ces deux avantages un nombre conséquent de résultats obtenus, ce qui permet de comparer de nouveaux résultats avec ceux, plus anciens, obtenus par différents groupes de chercheurs. Dans une discipline aussi subjective, c'est un atout non négligeable.

Annexe C. Ontologie de Bunge Wand et Weber : définitions et évaluations

Ontological construct	Explanation
Thing ^a	A thing is the elementary unit in the BWW ontological model. The real world is made up of things. Two or more things (composite or simple) can be <i>associated</i> into a <i>composite</i> thing
Property ^a :	Things possess properties. A property is modelled via a function that maps the thing into some value. For example, the attribute “weight” represents a property that all humans possess. In this regard, weight is an attribute standing for a property <i>in general</i> . If we focus on the weight of a specific individual, however, we would be concerned with a property <i>in particular</i> . A property of a composite thing that belongs to a component thing is called an <i>hereditary</i> property. Otherwise it is called an <i>emergent</i> property. Some properties are inherent properties of individual things. Such properties are called <i>intrinsic</i> . Other properties are properties of pairs or many things. Such properties are called <i>mutual</i> . <i>Non-binding mutual properties</i> are those properties shared by two or more things that do not “make a difference” to the things involved; for example, order relations or equivalence relations. By contrast, <i>binding mutual properties</i> are those properties shared by two or more things that do “make a difference” to the things involved. <i>Attributes</i> are the names that we use to represent properties of things
In general	
In particular	
Hereditary	
Emergent	
Intrinsic	
Non-binding mutual	
Binding mutual	
Attributes	
Class	A class is a set of things that can be defined via their possessing a single property
Kind	A kind is a set of things that can be defined only via their possessing two or more common properties
State ^a	The vector of values for all property functions of a thing is the state of the thing
Conceivable state space	The set of all states that the thing might ever assume is the conceivable state space of the thing
State law	A state law restricts the values of the properties of a thing to a subset that is deemed lawful because of natural laws or human laws
Lawful state space	The lawful state space is the set of states of a thing that comply with the state laws of the thing. The lawful state space is usually a proper subset of the conceivable state space
Event	A change in state of a thing is an event
Conceivable event space	The event space of a thing is the set of all possible events that can occur in the thing
Transformation ^a	A transformation is a mapping from one state to another state
Lawful transformation	A lawful transformation defines which events in a thing are lawful
Lawful event space	The lawful event space is the set of all events in a thing that are lawful
History	The chronologically-ordered states that a thing traverses in time are the history of the thing
Acts-on	A thing acts on another thing if its existence affects the history of the other thing
Coupling: binding mutual property	Two things are said to be coupled (or interact) if one thing acts on the other. Furthermore, those two things are said to share a binding mutual property (or relation); that is, they participate in a relation that “makes a difference” to the things
System	A set of things is a system if, for any bi-partitioning of the set, couplings exist among things in the two subsets
System composition	The things in the system are its composition
System environment	Things that are not in the system but interact with things in the system are called the environment of the system
System structure	The set of couplings that exist among things within the system, and among things in the environment of the system and things in the system is called the structure
Subsystem	A subsystem is a system whose composition and structure are subsets of the composition and structure of another system
System decomposition	A decomposition of a system is a set of subsystems such that every component in the system is either one of the subsystems in the decomposition or is included in the composition of one of the subsystems in the decomposition
Level structure	A level structure defines a partial order over the subsystems in a decomposition to show which subsystems are components of other subsystems or the system itself
External event	An external event is an event that arises in a thing, subsystem, or system by virtue of the action of some thing in the environment on the thing, subsystem, or system
Stable state ^a	A stable state is a state in which a thing, subsystem, or system will remain unless forced to change by virtue of the action of a thing in the environment (an external event)
Unstable state	An unstable state is a state that will be changed into another state by virtue of the action of transformations in the system
Internal event	An internal event is an event that arises in a thing, subsystem, or system by virtue of lawful transformations in the thing, subsystem, or system
Well-defined event	A well-defined event is an event in which the subsequent state can always be predicted given that the prior state is known
Poorly defined event	A poorly defined event is an event in which the subsequent state cannot be predicted given that the prior state is known

Tableau C.1 – Liste et définition des éléments de l’ontologie BWW qui sert à analyser la qualité de modèles de représentation de l’information, ce qui en fait un excellent méta-modèle pour analyser les méthodes de modélisation de l’échantillon présenté en annexe B. Source : [Green 2006].

C.2. Évaluations ontologiques des méthodes de planification et de modélisation

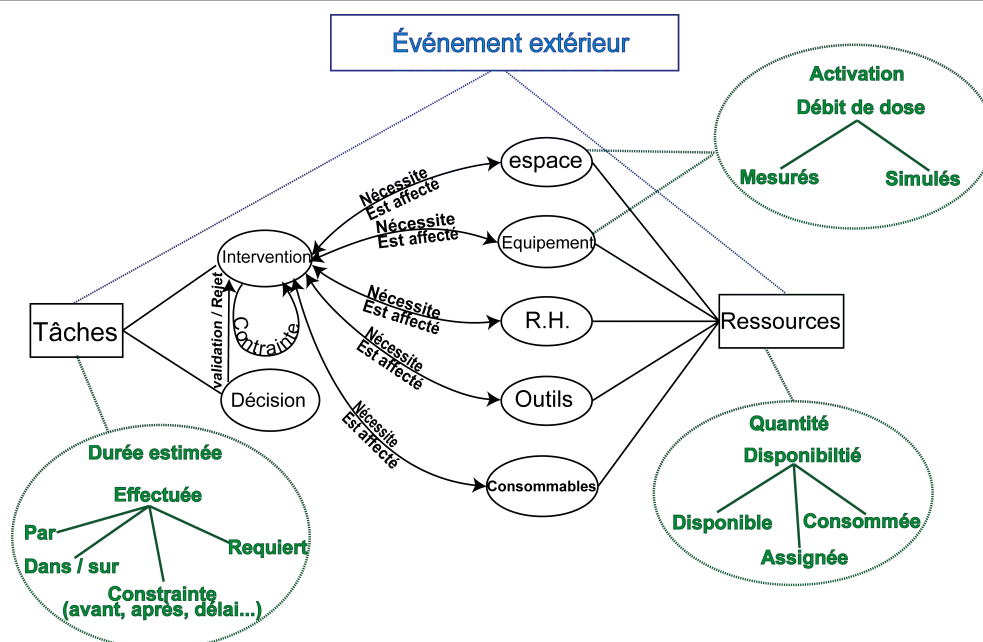


Figure C.1 – Représentation ontologique d'une intervention en environnement émettant des rayonnements ionisants.

C.2 Évaluations ontologiques des méthodes de planification et de modélisation

À partir du modèle BWB, nous avons identifié les éléments ontologiques apparaissant dans notre modèle d'intervention présenté dans le chapitre 3 (et que nous rappelons Figure C.1) pour établir une ontologie réduite.

Nous n'avons donc pris en compte dans nos évaluations que les éléments du modèle BWB présents dans notre modèle d'intervention. Les analyses ontologiques obtenues sont données dans les tableaux qui suivent dans cette annexe. Elles ont toutes été effectuées indépendamment par au moins deux personnes (et jusqu'à quatre, avec l'aimable participation de Pierre Bonnal, Peter Schubert et Adrian Rosemann) avant concertation et unification des résultats. Certaines de ces évaluations ont également déjà été effectuées dans la littérature, ce qui a permis de comparer (et dans la mesure du possible d'unifier) nos résultats avec des analyses antérieures (cf. [Keen 1996, Rosemann 2000, Green 2005, Recker 2005, Green 2006, Recker 2009]).

L'analyse ontologique présente cependant le principal défaut de demeurer subjective malgré tous les efforts d'objectivité entrepris, comme le signalent systématiquement tous les travaux consultés dans ce domaine. Elle permet toutefois d'établir des bases de comparaison entre méthodes de modélisation et de planification en obtenant différentes évaluations que l'on peut ensuite analyser, typiquement à l'aide d'une comparaison multicritère comme dans cette thèse.

Annexe C. Ontologie de Bunge Wand et Weber : définitions et évaluations

PERT - CPM - PDM				
Grammar constructs				DoO
start	1			
finish	2			
lag	3			
earliest start	4			
earliest finish	5			
latest start	6			
latest finish	7			
activity	8			
arc	9			
constraint	10			1
TOTAL	10			10.00
				90.00
BWW constructs	PERT/CPM/PDM	DoC	DoR	DoE
Property				
Class				
State				
State Law				
Lawful State Space				
Event	1, 2	1	1	
Conceivable Event Space	1,2,3,4,5,6,7	1		
Lawful Event Space	3,4,5,6,7	1	4	
External Event				
Internal Event	1, 2	1		
Well-defined event	1, 2	1		
Poorly-defined event				
Transformation	8	1		
Lawful transformation	10	1		
Acts on	9, 10	1	1	
Coupling	9	1		
System				
System environment				
Subsystem				
Construct excess		X	X	
Results	X	47.37	60.00	0.00
Inverse	X	X	40.00	100.00

Figure C.2 – Analyse ontologique des méthodes CPM, PDM, RC-PSP et PERT.

GERT				
Grammar constructs				DoO
Realization	1			
input logic	2			
output logic	3			
arc	4			
arc realization probability	5			
arc duration	6			
node	7			1
TOTAL	7			14.29
				85.71
BWW constructs	GERT	DoC	DoR	DoE
Property				
Class				
State	7	1		
State Law				
Lawful State Space				
Event	2, 3	1	1	
Conceivable Event Space	2,3	1		
Lawful Event Space				
External Event				
Internal Event				
Well-defined event				
Poorly-defined event	2, 3			
Transformation	4	1		
Lawful transformation	5, 6	1	1	
Acts on	7	1		
Coupling	7	1		
System				
System environment				
Subsystem				
Construct excess	1	X	X	1
Results	X	36.84	28.57	14.29
Inverse	X	X	71.43	85.71

Figure C.3 – Analyse ontologique de GERT.

VERT				
Grammar constructs				DoO
node	1			1
arc	2			
input logic	3			
output logic	4			
single unit logic	5			
arc duration	6			
arc cost	7			
arc performance	8			
histograms	9			
TOTAL	9			11.11
				88.89
BWW constructs	VERT	DoC	DoR	DoE
Property				
Class				
State	1	1		
State Law				
Lawful State Space				
Event	3, 4	1	1	
Conceivable Event Space	3, 4	1		
Lawful Event Space				
External Event				
Internal Event				
Well-defined event				
Poorly-defined event	3, 4	1		
Transformation	2	1		
Lawful transformation	6, 7, 8	1	2	
Acts on	1	1		
Coupling	1	1		
System				
System environment				
Subsystem				
Construct excess	9	X	X	1
Results	X	42.11	33.33	11.11
Inverse	X	X	66.67	88.89

Figure C.4 – Analyse ontologique de VERT.

C.2. Évaluations ontologiques des méthodes de planification et de modélisation

Decision box				
Grammar constructs				DoO
Starting event	1			
event	2			
decision box	3			1
outcome	4			1
conjunctive path	5			
disjunctive path	6			
conjunctive path dependency	7			
conjunctive path merge point	8			
outcome probability	9			
arc	10			
arc probability	11			
arc duration	12			
TOTAL	12			16,67
				83,33
BWW constructs	Decision Box	DoC	DoR	DoE
Property				
Class				
State	4, 3	1	1	
State Law	9	1		
Lawful State Space				
Event	1, 2, 3, 4	1	2	
Conceivable Event Space	1,2,3,4,5,6,7,8	1		
Lawful Event Space	3, 4, 5, 6, 7, 8	1	4	
External Event				
Internal Event				
Well-defined event	3, 4	1		
Poorly-defined event	1, 2	1		
Transformation	10	1		
Lawful transformation	11, 12	1	1	
Acts on	3	1		
Coupling				
System				
System environment				
Subsystem				
Construct excess		X	X	
Results	X	52,63	66,67	0,00
Inverse	X	X	33,33	100,00

Figure C.5 – Analyse ontologique des réseaux d'activités *Decision Box*.

Petri Nets				
Grammar constructs				DoO
place	1			1
token	2			
initial marking	3			
place capacity	4			1
transition	5			1
arc	6			
arc weight	7			
TOTAL	7			42,86
				57,14
BWW constructs	Petri Net	DoC	DoR	DoE
Property				
Class	1	1		
State	1,2, 3	1	2	
State Law	4	1		
Lawful State Space	4	1		
Event	5	1		
Conceivable Event Space				
Lawful Event Space				
External Event				
Internal Event	5	1		
Well-defined event	5	1		
Poorly-defined event				
Transformation	5	1		
Lawful transformation	7	1		
Acts on	6	1		
Coupling	6	1		
System				
System environment				
Subsystem				
Construct excess		X	X	
Results	X	57,89	28,57	0,00
Inverse	X	X	71,43	100,00

Figure C.6 – Analyse ontologique des réseaux de Petri.

DSM				
Grammar constructs				DoO
row, column, activity	1			1
mark	2			
DSM	3			
partition, cluster	4			
TOTAL	4			25,00
				75,00
BWW constructs	DSM	DoC	DoR	DoE
Property				
Class				
State				
State Law				
Lawful State Space				
Event	1	1		
Conceivable Event Space	1	1		
Lawful Event Space				
External Event				
Internal Event				
Well-defined event				
Poorly-defined event				
Transformation	1	1		
Lawful transformation	1	1		
Acts on	2	1		
Coupling	2	1		
System	3	1		
System environment				
Subsystem	4	1		
Construct excess		X	X	
Results	X	42,11	0,00	0,00
Inverse	X	X	100,00	100,00

Figure C.7 – Analyse ontologique de la DSM.

Annexe C. Ontologie de Bunge Wand et Weber : définitions et évaluations

System Dynamics				
Grammar constructs				DoO
stocks	1			
stock levels	2			1
flows	3			1
valves	4			1
information channels	5			
sources, sinks	6			
TOTAL	6			50.00
				50.00
BWW constructs		DoC	DoR	DoE
Property				
Class	1	1		
State	2	1		
State Law	2, 4	1	1	
Lawful State Space	2	1		
Event	4	1		
Conceivable Event Space	4	1		
Lawful Event Space	4	1		
External Event				
Internal Event	4	1		
Well-defined event	4	1		
Poorly-defined event				
Transformation	3	1		
Lawful transformation	3, 4, 5	1	2	
Acts on	3	1		
Coupling	3	1		
System				
System environment	6	1		
Subsystem				
Construct excess		X	X	0
Results	X	68.42	50.00	0.00
Inverse	X	X	50.00	100.00

Figure C.8 – Analyse ontologique de la méthode *System Dynamics* de J. Forrester.

IDEF 3				
Grammar constructs				DoO
objects	1			
attributes	2			
states	3			
Unit of Behaviour	4			1
logic operators	5			
arc	6			
Process flow diagram	7			
annotations	8			
TOTAL	8			12.50
				87.50
BWW constructs	IDEF 3	DoC	DoR	DoE
Property	2	1		
Class				
State	3	1		
State Law				
Lawful State Space				
Event	4	1		
Conceivable Event Space				
Lawful Event Space				
External Event				
Internal Event				
Well-defined event				
Poorly-defined event				
Transformation	4	1		
Lawful transformation	5	1		
Acts on	6	1		
Coupling	6	1		
System	7	1		
System environment				
Subsystem				
Construct excess	1, 8	X	X	2
Results	X	42.11	0.00	25.00
Inverse	X	X	100.00	75.00

Figure C.9 – Analyse ontologique du standard IDEF3.

C.2. Évaluations ontologiques des méthodes de planification et de modélisation

EPC				
Grammar constructs				DoO
organization unit	1			
resources	2			
input-output	3			
event	4			1
function	5			1
logic operators	6			
control flow	7			
information flow	8			
TOTAL	8			25.00
				75.00
BWW constructs	EPC	DoC	DoR	DoE
Property				
Class	2, 3	1	1	
State	4	1		
State Law	5	1		
Lawful State Space				
Event	4	1		
Conceivable Event Space				
Lawful Event Space				
External Event	4	1		
Internal Event	4	1		
Well-defined event				
Poorly-defined event				
Transformation	5	1		
Lawful transformation	5, 6	1	1	
Acts on	7, 8	1	1	
Coupling	7, 8	1		
System				
System environment				
Subsystem				
Construct excess	1	X	X	1
Results	X	52.63	37.50	12.50
Inverse	X	X	62.50	87.50

Figure C.10 – Analyse ontologique de la méthode *Event-driven Process Chain* (EPC).

Process Flow Chart				
Grammar constructs				DoO
time	1			
sequence	2			
storage	3			
delay	4			
transportation	5			
inspection	6			
operation	7			1
description	8			
total	9			
TOTAL	9			11.11
				88.89
BWW constructs	PFC	DoC	DoR	DoE
Property				
Class				
State	3	1		
State Law				
Lawful State Space				
Event	4, 5, 7, 6	1	3	
Conceivable Event Space				
Lawful Event Space				
External Event				
Internal Event	5, 4, 3, 6	1	1	
Well-defined event				
Poorly-defined event	7	1		
Transformation	7	1		
Lawful transformation				
Acts on				
Coupling				
System				
System environment				
Subsystem				
Construct excess	1, 2, 8, 9	X	X	4
Results	X	26.32	44.44	44.44
Inverse	X	X	55.56	55.56

Figure C.11 – Analyse ontologique du *Process Flow Chart* (PFC).

Annexe C. Ontologie de Bunge Wand et Weber : définitions et évaluations

CYCLONE				
Grammar constructs				DoO
allocate resource	1			1
free resource	2			1
queue	3			
counter	4			
function	5			
normal task	6			
COMBI task	7			
arcs	8			
predecessor process	9			1
successor process	10			1
TOTAL	10			40.00
				60.00
BWW constructs	CYCLONE	DoC	DoR	DoE
Property				
Class	3	1		
State	1, 2, 5	1	2	
State Law	1, 2	1		
Lawful State Space	1, 2	1		
Event	1, 2	1		
Conceivable Event Space	1, 2	1		
Lawful Event Space	1, 2	1		
External Event				
Internal Event	1, 2	1		
Well-defined event	1, 2	1		
Poorly-defined event				
Transformation	6, 7	1	1	
Lawful transformation				
Acts on	8	1		
Coupling	8	1		
System	9, 10	1	1	
System environment				
Subsystem	9, 10	1		
Construct excess	4	X	X	1
Results	X	73.68	40.00	10.00
Inverse	X	X	60.00	90.00

FFBD-EFFBD				
Grammar constructs				DoO
data	1			
function	2			1
control flow	3			
data flow	4			
Logic (AND, OR)	5			
Recursive (LP, IT, RP)	6			
completion criterion (go or no-go)	7			
data trigger	8			1
annotation	9			
TOTAL	9			22.22
				77.78
BWW constructs	FFBD-EFFBD	DoC	DoR	DoE
Property	8	1		
Class	1	1		
State				
State Law				
Lawful State Space				
Event	2	1		
Conceivable Event Space	2,5,6,7,8	1		
Lawful Event Space	5, 6, 7, 8	1	3	
External Event				
Internal Event	2, 5, 6, 7, 8	1		
Well-defined event	2, 5, 6, 7, 8	1		
Poorly-defined event				
Transformation	2	1		
Lawful transformation	7, 8	1		
Acts on	3, 4	1	1	
Coupling	3, 4	1		
System				
System environment				
Subsystem				
Construct excess	9	X	X	1
Results	X	57.89	44.44	11.11
Inverse	X	X	55.56	88.89

Figure C.12 – Analyse ontologique de la méthode de simulation de construction CYCLONE.

Figure C.13 – Analyse ontologique du *Enhanced Functional Flow Block Diagram* (EFFBD).

C.2. Évaluations ontologiques des méthodes de planification et de modélisation

SADT-IDEFO				
Grammar constructs				DoO
input-output	1			
control	2			
mechanism	3			
branch	4			
join	5			
bundle	6			
spread	7			
OR-branch	8			
OR-join	9			
chronological creation	10			
box	11			1
arrow	12			
to all	13			
from all	14			
2 way arrow	15			
pair of boxes	16			
model Name	17			
node number	18			
parent connexion	19			
call on support	20			
note	21			
footnote	22			
meta note	23			
glossary	24			
node index	25			
text	26			
squiggle	27			
TOTAL	27			3,70
				96,30
BWW constructs	SADT-IDEFO	DoC	DoR	DoE
Property				
Class	1, 2, 3	1	2	
State				
State Law				
Lawful State Space				
Event	4, 5, 6, 7, 11, 8, 9	1	6	
Conceivable Event Space	4, 5, 6, 7, 11, 8, 9	1		
Lawful Event Space	4, 5, 6, 7, 11, 8, 9	1		
External Event				
Internal Event				
Well-defined event	4, 5, 6, 7, 8, 9			
Poorly-defined event	11			
Transformation	11	1		
Lawful transformation				
Acts on	12, 13, 14	1	2	
Coupling	15, 16	1	1	
System	17	1		
System environment		1		
Subsystem	18	1		
Construct excess	10, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	X	X	10
Results	X	52,63	40,74	37,04
Inverse	X	X	59,26	62,96

Figure C.14 – Analyse ontologique de la méthode SADT et du standard IDEFØ.

BPMN				
Grammar constructs				DoO
pool	1			1
lane	2			1
attributes of pools and lanes	3			
data object	4			
start event	5			1
intermediate event	6			1
end event	7			1
message	8			1
timer	9			
error	10			1
cancel	11			1
compensation	12			1
terminate	13			1
activity	14			
task	15			
collapsed sub-process	16			
nested sub-process	17			
expanded sub-process	18			
transaction	19			
default flow	20			1
uncontrolled flow	21			1
exception flow	22			1
conditional flow	23			1
rule	24			
exception task	25			
compensation activity	26			
sequence flow	27			
message flow	28			
link	29			
off-page connector	30			
gateway types	31			
association flow	32			
text annotation	33			
group	34			
activity looping	35			
multiple instances	36			
normal flow	37			
event supertype	38			
gateway supertype	39			
TOTAL	39			35,90
				64,10
BWW constructs	BPMN	DoC	DoR	DoE
Property	3	1		
Class	1, 2, 4	1	2	
State				
State Law				
Lawful State Space				
Event	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1	8	
Conceivable Event Space	38	1		
Lawful Event Space	31, 39	1	1	
External Event	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13	1		
Internal Event	5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13	1		
Well-defined event	10, 11, 12, 13	1		
Poorly-defined event	5, 6, 8, 9	1		
Transformation	14, 15, 16, 17, 18, 19	1	5	
Lawful transformation	24, 25, 26, 35, 36	1	4	
Acts on	20, 21, 22, 23, 27, 28	1	5	
Coupling	20, 21, 22, 23, 27, 28	1		
System	1, 2	1		
System environment	1, 2	1		
Subsystem	1, 2	1		
Construct excess	29, 30, 32, 33, 34, 37	X	X	6
Results	X	84, 21	64, 10	15, 38
Inverse	X	X	35, 90	84, 62

Figure C.15 – Analyse ontologique du BPMN.

Annexe C. Ontologie de Bunge Wand et Weber : définitions et évaluations

UML 2.0 Activity Diagram				
Grammar constructs				DoO
activity parameter	1			1
object node	2			1
input pin	3			1
output pin	4			1
central buffer node	5			1
data store node	6			1
initial node	7			
activity final node	8			
flow final node	9			
constraint	10			
interruptible activity region	11			
exception handler	12			
SendSignalAction	13			
action	14			
activity	15			
sequence node	16			
StructuredActivity node	17			
loop	18			
AcceptEventAction	19			
AcceptTimeEventAction	20			
conditional node	21			
decision node	22			
merge node	23			
fork node	24			
join node	25			
control flow	26			
object flow	27			
swimlane	28			1
expansion region	29			
note	30			
value pin	31			
expansion node	32			1
TOTAL	32			25,00
				75,00
BWW constructs	UML	DoC	DoR	DoE
Property	1,3,4,5,6,32	1		
Class	2	1		
State	1,2,3,4,5,6,32	1	6	
State Law	22,23,24,25	1	3	
Lawful State Space	22,23,24,25	1		
Event	7,8,9,13,11	1	4	
Conceivable Event Space	7,8,9,11,13	1		
Lawful Event Space	11,13	1		
External Event				
Internal Event				
Well-defined event	11,13	1		
Poorly-defined event	7,8,9	1		
Transformation	14,15,29	1	2	
Lawful transformation	16,17,18,19,20	1	4	
Acts on	10,12,26,27	1	3	
Coupling	26,27	1		
System	28	1		
System environment				
Subsystem	28	1		
Construct excess	30,31	X	X	2
Results	X	84,21	68,75	6,25
Inverse	X	X	31,25	93,75

Figure C.16 – Analyse ontologique du diagramme d'activité de l'UML 2.0.

ebXML-BPSS				
Grammar constructs				DoO
business partner role	1			
authorized role	2			
business document	3			
document envelope	4			
attachment	5			
start	6			
success	7			
failure	8			
fork	9			
join	10			
wellformedness rules	11			1
choreography	12			
RequestingBusinessActivity	13			
RespondingBusinessActivity	14			
business transaction	15			
<precondition> on business transaction	16			
<postcondition> on business transaction	17			
<precondition> on binary collaboration	18			
<postcondition> on binary collaboration	19			
<beginsWhen> on binary collaboration	20			
<beginsWhen> on business transaction	21			
<endsWhen> on binary collaboration	22			
<endsWhen> on business transaction	23			
transition	24			
BusinessTransactionActivity	25			
CollaborationActivity	26			
binary collaboration	27			1
multiparty collaboration	28			
performs	29			
BusinessActivity	30			
BusinessState	31			
BusinessAction	32			
DocumentSecurity	33			
CompletionState	34			
EnumerationStatus	35			
TOTAL	35			5,71
				94,29
BWW constructs	ebXML	DoC	DoR	DoE
Property	1,2	1	1	
Class	3,4,5	1	2	
State	6,7,8,9,10	1	4	
State Law	11	1		
Lawful State Space	11, 6,7,8,9,10	1		
Event	13,14,15	1		
Conceivable Event Space	13,14,15	1		
Lawful Event Space	11, 13, 14, 15, 16, 17, 18,19	1	6	
External Event	13,20,21,22	1	2	
Internal Event	14,15,23	1	1	
Well-defined event	13	1		
Poorly-defined event	14,15	1		
Transformation	24	1		
Lawful transformation	11	1		
Acts on	25,26	1	1	
Coupling	25,26	1		
System	27,28	1	1	
System environment				
Subsystem	27	1		
Construct excess	12, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35	X	X	8
Results	X	94,74	51,43	22,86
Inverse	X	X	48,57	77,14

Figure C.17 – Analyse ontologique du standard ebXML-BPSS (version UML).

C.2. Évaluations ontologiques des méthodes de planification et de modélisation

YAWL				
Grammar constructs				DoO
condition	1			
input condition	2			
output condition	3			
atomic task	4			
composite task	5			
multiple instances atomic task	6			
multiple instances composite	7			
AND-split task	8			
XOR-split task	9			
OR-split task	10			
AND-join task	11			
XOR-join task	12			
OR-join task	13			
cancellation region	14			1
thread split task	15			
thread merge task	16			
repetitive task	17			
partial-join task	18			
blocking region	19			1
persistent trigger task	20			1
transient trigger task	21			1
completion region	22			1
disablement arc	23			
arc	24			
TOTAL	24			20,83
				79,17
BWW constructs	YAWL	DoC	DoR	DoE
Property				
Class				
State	1, 2, 3	1	2	
State Law				
Lawful State Space				
Event	14, 19, 20, 21, 22	1	4	
Conceivable Event Space	14, 19, 20, 21, 22	1		
Lawful Event Space	14, 19, 20, 21, 22	1		
External Event				
Internal Event				
Well-defined event	14, 19, 20, 21, 22	1		
Poorly-defined event				
Transformation	4, 5, 6, 7	1	3	
Lawful transformation	8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 20, 21	1	9	
Acts on	14, 24, 23, 22, 21, 20, 19	1	2	
Coupling	14, 24, 23, 22, 21, 20, 19	1		
System				
System environment				
Subsystem				
Construct excess		X	X	
Results	X	47,37	83,33	0,00
Inverse	X	X	16,67	100,00

Figure C.18 – Analyse ontologique de newYAWL.

ANSI Flowcharts				
Grammar constructs				DoO
terminal	1			
input - output	2			1
processing	3			
preparation	4			
predifined process	5			1
manual offline operation	6			
auxiliary offline operation	7			
decision	8			
merge	9			
extract	10			
sort	11			
collate	12			
parallel mode	13			
flowline	14			
communication link	15			
annotation	16			
connector	17			
equipment	18			
equipment	19			
equipment	20			
equipment	21			
equipment	22			
equipment	23			
equipment	24			
media	25			
media	26			
media	27			
media	28			
TOTAL	28			7,14
				92,86
BWW constructs	ANSI	DoC	DoR	DoE
Property				
Class				
State				
State Law				
Lawful State Space				
Event	1, 2, 8	1	1	
Conceivable Event Space				
Lawful Event Space				
External Event	2	1		
Internal Event	2	1		
Well-defined event				
Poorly-defined event	1, 2	1		
Transformation	3, 4, 5, 6, 7	1	4	
Lawful transformation	8, 9, 10, 11, 12, 13	1	5	
Acts on	14, 15	1	1	
Coupling	14, 15	1		
System				
System environment				
Subsystem	5	1		
Construct excess	16 - 28	X	X	13
Results	X	47,37	39,29	46,43
Inverse	X	X	60,71	53,57

Figure C.19 – Analyse ontologique des Flowcharts de l’ANSI (les éléments “spécialisés”, souvent obsolètes, sont regroupés sous une seule catégorie).

Annexe C. Ontologie de Bunge Wand et Weber : définitions et évaluations

Modelling methods	Decision modelling constructs	Feedback and looping constructs	Decision Total	Decision Index	Stochastic event handling constructs	Stochastic Total	Stochastic Index	Total	Branching Index
CPM / PDM / RCPSP	Concurrency	X	1	10.00	X	0	0.00	1	6.67
PERT	Concurrency	X	1	10.00	Time distribution	1	16.67	2	13.33
GERT	AND, OR, XOR, Concurrency	Looping	5	50.00	Realization probability, time distribution	3	50.00	8	53.33
VERT	AND, ALL, OR, XOR, MC, FILT1, FILT2, FILT3, compare, preferred	X	10	100.00	Time, cost, performance, Monte Carlo output	5	83.33	15	100.00
Decision Box	Decision Box	X	1	10.00	Decision probability, outcome probability	2	33.33	3	20.00
CYCLONE	Concurrency	Looping	2	20.00	X	0	0.00	2	13.33
DSM	X	Looping	1	10.00	Variability of exchanged information, probability of repetition (num. DSM)	2	33.33	3	20.00
ANSI Flowcharts	Decision, Concurrency	Looping, multiple instances	4	40.00	X	0	0.00	4	26.67
Process Flow Chart	X	X	0	0.00	X	0	0.00	0	0.00
Petri Nets	Concurrency, Decision	Looping	3	30.00	Duration, state proba, condition proba, expected value of token number, mean number of firing... (stochastic PN)	6	100.00	9	60.00
YAWL	AND, OR, XOR, partial-join	Repetitive task, thread merge, thread split	8	80.00	X	0	0.00	8	53.33
UML	Conditional node, Decision, merge, fork, join	Loop, Decision	7	70.00	X	0	0.00	7	46.67
BPMN	AND, OR, XOR, Complex	Looping, multiple instances	6	60.00	X	0	0.00	6	40.00
FFBD / EFFBD	AND, OR, RP	IT, LP, RP	6	60.00	X	0	0.00	6	40.00
SADT / IDEFO	Branch, join, bundle, spread, OR-branch, OR-join	Feedback, two-way	8	80.00	X	0	0.00	8	53.33
EPC	AND, OR, XOR	X	3	30.00	X	0	0.00	3	20.00
IDEF3	AND, OR, XOR	Looping	4	40.00	X	0	0.00	4	26.67
ebXML-BPSS	Fork, Join	X	2	40.00	X	0	0.00	2	13.33
System Dynamics	Concurrency	Feedback, looping, multiple instances	4	40.00	X	0	0.00	4	26.67

Figure C.20 – Calcul de l'indice de branchement (*Branching Index*) utilisé dans le choix des méthodes de modélisation. VERT obtient le plus haut score par son plus grand nombre d'éléments utilisables pour le branchement et la gestion de la stochasticté. Les autres méthodes obtiennent un score en pourcentage par comparaison avec VERT.

Aide à la décision multicritère avec la méthode ELECTRE I

D.1 Rapide introduction à l'Aide à la Décision Multicritère (AMCD)

L'aide à la décision multicritère⁴³ est une discipline des mathématiques appliquées qui permet d'évaluer plusieurs alternatives envisagées pour résoudre un problème en se basant sur différents critères. Chacun d'entre eux possède un facteur de pondération propre, et les différentes évaluations permettent d'établir des classements ou des relations de dominance entre les différentes alternatives, en accordant plus ou moins d'importance à chaque critère. Le problème d'AMCD peut se poser de la façon suivante :

- Soit $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ l'ensemble des n alternatives considérées ;
- Soient $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ les p critères d'évaluation, de poids respectifs $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p\}$ tels que $\sum_{j=1}^p \alpha_j = 1$;
- $\forall (i, j) \in [1, \dots, n] \times [1, \dots, p]$, e_{ij} est l'évaluation de l'alternative x_i pour le critère C_j .

Les évaluations sont rassemblées dans une matrice dite "matrice d'évaluation" comme indiquée en Figure D.1.

Critères Alternatives						
	C_1	C_2	.....	C_k	.....	C_p
	α_1	α_2	.....	α_k	.....	α_p
x_1	e_{11}	e_{12}	.....	e_{1k}	.....	e_{1p}
x_2	e_{21}	e_{22}	.....	e_{2k}	.....	e_{2p}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
x_j	e_{j1}	e_{j2}	.....	e_{jk}	.....	e_{jp}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
x_n	e_{n1}	e_{n2}	.....	e_{nk}	.....	e_{np}

Figure D.1 – Représentation d'une matrice d'évaluation d'AMCD.

43. Souvent aussi rencontrée sous le terme d'*aide multicritère à la décision*, à l'origine de l'acronyme *AMCD*.

Annexe D. Aide à la décision multicritère avec la méthode ELECTRE I

Une fois les évaluations effectuées, il s'agit de procéder à l'analyse de la matrice de surclassement, en établissant des comparaisons entre les alternatives à partir de leurs évaluations. Il existe deux grandes catégories de méthodes pour traiter le problème :

- **L'agrégation totale** : approche populaire en Amérique du nord, qui consiste à agréger pour chaque alternative tous les jugements obtenus pour tous les critères en calculant une fonction critère unique. C'est le cas par exemple d'une moyenne pondérée, ou de l'AHP (*Analytic Hierachy Process*) de Saaty . Ce sont typiquement des méthodes dites *compensatoires* car elles permettent en agrégeant tous les critères (tout en tenant compte des coefficients de pondération) de compenser un mauvais résultat sur un critère par un bon résultat sur un autre. Elles ont pour objectif principal d'établir un classement complet des alternatives.
- **L'agrégation partielle ou méthode de surclassement** : approche populaire dans les pays francophones (France, Belgique, Suisse) qui consiste à établir des relations de surclassement entre alternatives. Concrètement, il s'agit de comparer les alternatives uniquement deux à deux sur tous les critères afin d'établir un graphe de dominance. Ce sont des approches non-compensatoires, dans le sens où un très mauvais résultat sur un critère peut être considéré comme rédhibitoire pour une alternative même si elle obtient de bons scores dans tous les autres critères. On n'obtient dans ces méthodes pas nécessairement de classement complet des alternatives. On peut en effet rechercher simplement des relations de dominance entre sous-ensembles d'alternatives ou à distinguer un certains nombre d'alternatives qui surclassent les autres.

Dans cette thèse, c'est l'agrégation partielle qui a été choisie car un classement complet des alternatives de notre échantillon n'était pas nécessaire, mais aussi parce que l'objectif de l'analyse était plus de faire ressortir les forces et les faiblesses relatives des méthodes comparées pour sélectionner les plus adaptées à notre problème. Nous avons donc adopté une approche basée sur la problématique dite "*alpha*", qui est une des trois problématiques que cherche à résoudre l'agrégation partielle :

- **Alpha** : choisir, sélectionner. Cette problématique consiste à identifier un sous-ensemble le plus restreint possible contenant les meilleures ou à défaut les plus satisfaisantes des alternatives de l'échantillon.
- **Bêta** : trier, segmenter. Cette problématique de *tri* cherche à diviser l'échantillon en catégories pré-définies (les meilleures alternatives, les alternatives intermédiaires et les alternatives les moins intéressantes).
- **Gamma** : ranger, classer. Cette problématique est la plus proche de celle de l'agrégation totale dans le sens où elle vise à classer les alternatives de la meilleure à la moins bonne afin de choisir une solution parmi les meilleures (et pas forcément *la* meilleure).

Nous avons précédemment annoncé que cette thèse a adopté la problématique *alpha*. Une des méthodes les plus populaires pour cette problématique est la méthode ELECTRE I, que nous avons utilisée. Nous allons à présent procéder à sa description.

D.2 La Méthode ELECTRE I

Calcul des indices de concordance et discordance

Comme la plupart des méthodes de surclassement, ELECTRE I nécessite dans un premier temps le calcul de deux indices aux valeurs comprises entre 0 et 1 : l'indice de concordance et l'indice de discordance, qui vont permettre l'établissement des relations de surclassement entre les alternatives. Mais tout d'abord, définissons pour chaque paire d'alternatives (x_i, x_j) deux ensembles $K^+(i, j)$ et $K^-(i, j)$ qui permettront de simplifier les notations par la suite :

- $K^+(i, j) = \{k \in [1, \dots, p] \text{ tel que } e_{ik} > e_{jk}\}$: ensemble des indices des critères où x_i fait mieux ou aussi bien que x_j ;
- $K^-(i, j) = \{k \in [1, \dots, p] \text{ tel que } e_{ik} < e_{jk}\}$: ensemble des indices des critères où x_j fait mieux que x_i .

L'indice de concordance indique à quel point l'alternative x_i domine l'indice x_j . Il se calcule de la façon suivante :

$$C(i, j) = \sum_{k \in K^+} \alpha_k \quad (D.1)$$

$$\text{ou } C(i, j) = \frac{\sum_{k \in K^+(i, j)} \alpha_k}{\sum_{k=1}^p \alpha_k} \quad \text{si } \sum_{k=1}^p \alpha_k \neq 1$$

Inversement, l'indice de discordance quantifie la domination de x_i par x_j , mais pas sur l'ensemble des éléments de K^- . On considère dans cet indice uniquement le critère pour lequel x_j domine le plus x_i . À noter, dans l'équation ci-dessous, L_k représente l'étendue de l'échelle d'évaluation. Cette annexe se place en effet dans le cas où elle est la même pour tous les critères.

$$D(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{si } K^- = \emptyset \\ \max_{k \in K^-(i, j)} \frac{|e_{jk} - e_{ik}|}{L_k} & \text{sinon,} \\ \text{avec } L_k = \max_{1 \leq i, j \leq n} |e_{ik} - e_{jk}|, \quad k \in [1, \dots, p] \end{cases} \quad (D.2)$$

En résumé, une concordance $C(i, j)$ proche de 1 signifiera que x_i domine x_j sur un grand nombre de critères, et une discordance proche de 1 signifiera que x_j domine x_i fortement sur un seul critère, celui où la différence est la plus importante. C'est cet indice de concordance qui fait d'ELECTRE I une méthode non compensatoire : l'alternative x_i peut dominer largement x_j sur une grande majorité de critères, et malgré tout être rejetée si x_j la domine très fortement sur un seul d'entre eux.

Analyse des résultats

Une fois les indices calculés, il ne reste plus qu'à en déduire les relations de surclassement et à rechercher l'ensemble des meilleures solutions. Pour cela, l'utilisateur définit deux seuils : un seuil de concordance q_1 et un seuil de discordance q_2 qui permettent de définir la relation de surclassement :

$$x_i S x_j \Leftrightarrow \begin{cases} C(i, j) \geq q_1 \\ D(i, j) \leq q_2 \end{cases} \quad (D.3)$$

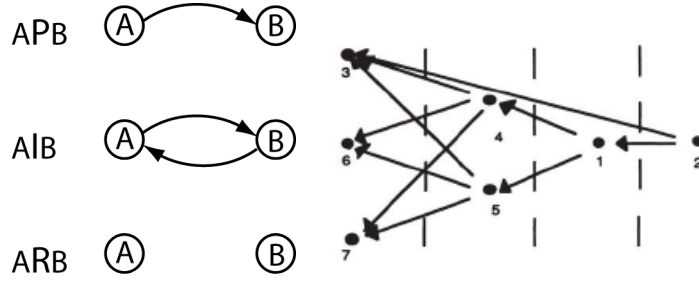


Figure D.2 – Les trois relations possibles entre chaque paire au sein d'un graphe de surclassement (à gauche) et un exemple de graphe de surclassement extrait de [Vidal 1990] (à droite).

Nous avons mentionné dans les chapitres 2 et 3 que la relation de surclassement n'est pas transitive d'une part, et que pour une paire (q_1, q_2) donnée, la relation $x_i S x_j$ n'exclue pas la relation $x_j S x_i$. Par conséquent, trois relations sont possibles entre deux alternatives :

- si $x_i S x_j$ est vraie et $x_j S x_i$ fausse : x_i est préférable à x_j , et on note la préférence $x_i P x_j$;
- si $x_i S x_j$ et $x_j S x_i$ sont vraies : c'est la relation d'indifférence notée $x_i I x_j$;
- si $x_i S x_j$ et $x_j S x_i$ sont fausses : x_i et x_j sont incomparables. L'incomparabilité est notée $x_i R x_j$.

En utilisant les conventions illustrées en Figure D.2, on peut alors construire un graphe appelé graphe de surclassement (à droite sur la figure). À ce stade, le résultat est presque à portée de main : il ne reste plus qu'à délimiter le sous-ensemble des alternatives qui dominent l'échantillon.

Pour cela, il faut chercher ce qui, en théorie des graphes, et appelé le *noyau* du graphe (*kernel* en anglais et allemand). La définition n'est pas très aisée à appréhender à première vue car il s'agit d'une définition négative : le noyau est l'ensemble des éléments de X incomparables entre eux, tel que toute alternative x n'y appartenant pas est surclassée par au moins un de ses éléments. En langage mathématique, nous obtenons :

$$Ker = \left\{ \begin{array}{l} \forall x_j \in X \setminus Ker, \exists x_i \in Ker \text{ tel que } x_i S x_j \\ \forall (x_i, x_k) \in Ker^2, x_i R x_k \end{array} \right\} \quad (D.4)$$

Sur le graphe en Figure D.2, ce noyau est donc $Ker = \{2, 4, 5\}$. En effet, l'élément 1 est dominé par le 2 ce qui l'élimine du noyau. Donc le 4 et le 5 qui ne sont pas comparables avec le 2 (car la relation de surclassement n'est pas transitive) ne sont pas dominés par un élément de Ker . Ils ne sont pas comparables entre eux, et peuvent donc en faire partie. Les trois dernières alternatives (3, 6, et 7) sont quant à elles toutes surclassées par au moins une alternative du noyau. On pourrait cependant discuter du fait que l'élément 1 domine le 4 et le 5, ce qui fait qu'il devrait logiquement mieux figurer dans le choix sachant qu'en l'absence de l'alternative 2, le

D.2. La Méthode ELECTRE I

noyau serait entièrement changé : les éléments 4 et 5 en sortiraient, et il contiendrait les éléments 1, 3, 6 et 7. C'est une des faiblesses de la méthode ELECTRE I qui tend à ignorer les “brillants seconds”. Il existe des algorithmes pour tenir compte de ce problème, notamment dans les autres méthodes ELECTRE développées par Bernard Roy [Roy 1985].

Nous allons cependant en rester là car l'objectif de cet annexe est de décrire la méthode ELECTRE I utilisée dans ce travail de thèse et non de développer l'immense panel de méthodes d'AMCD existantes. Le lecteur intéressé est redirigé vers les ouvrages suivants : [Roy 1985, Schärli 1985, Vincke 1989, Schärli 1996].

Notons cependant que pour être complète, et afin d'assurer la qualité des résultats obtenus, l'analyse que nous venons d'effectuer peut être affinée en variant les poids des critères, en agrégeant les évaluations de plusieurs *juges* et en faisant varier les seuils de concordance et de discordance à des valeurs plus ou moins strictes : plus q_1 sera proche de 1 et q_2 de zéro, plus les relations de surclassement obtenues seront fortes. En revanche, une trop grande exigence introduit dans le graphe un plus grand nombre de relations d'incomparabilité qui n'apportent que peu d'information.

Et concluons enfin en rappelant qu'au terme de l'analyse, la décision revient à l'humain, et qu'ELECTRE I n'effectue pas le choix à la place de l'utilisateur à qui le soin revient de choisir son ou ses alternatives de prédilection dans le noyau.

Les algorithmes de la DSM Collaborative

Cette annexe fournit quelques-uns des algorithmes au cœur du fonctionnement de l'application prototype *Matplan - Interveneering* utilisée dans cette thèse. Afin de pouvoir les afficher sans problème sur la largeur des pages de cette thèse, certaines lignes ont dûes être séparées en plusieurs parties.

Pour des raisons de compréhension, nous allons dans un premier temps expliciter un peu la structure des données que nous utilisons car la plupart des algorithmes présentés ici sont des méthodes de la classe *Intervention* de l'application prototype dont le langage de développement est le *Python*.

E.1 Structure de données : la classe *Intervention*

Cette classe contient toutes les informations nécessaires à la planification d'une intervention telle que décrite dans cette thèse. Ses principaux attributs sont :

- une liste d'objets *activités* : *self.ActList* ;
- des dates de début et de fin : *self.Start* et *self.End* qui sont des objets *datetime* (bibliothèque Python) ;
- une matrice contenant les vecteurs contraintes temporelles : *self.Constraints* dont un vecteur non nul à l'intersection entre la colonne *i* et la ligne *j* correspond à une contrainte temporelle de l'activité n°*i* sur l'activité n°*j* ;
- une liste contenant ces mêmes contraintes mais avec plus d'informations disponibles (activités prédécesseur et successeur, propriétaire de la contrainte, informations temporelles additionnelles, etc.) : *self.Dependencies*.

Cependant, nous avons vu au cours de cette thèse notamment dans le chapitre 4 qu'une contrainte de l'algèbre d'Allen pouvait être une contrainte multiple, et que certaines contraintes entrées dans la matrice *self.Constraints* pouvaient entraîner des conflits lors de leur propagation. Une même intervention peut donc avoir plusieurs alternatives en cas de conflit. De plus, nous avons également vu que la solution d'un problème de planification avec l'algèbre d'intervalles d'Allen ne pouvait pas contenir de contraintes multiples et que plusieurs solutions pouvaient être proposées.

Ce sont les diverses méthodes de la classe *Intervention* permettant de gérer l'ajout de nouvelles contraintes, de rechercher des compromis et de lister les solutions que nous présentons dans cette annexe. Il s'agit des méthodes :

- *propagate* qui propage les nouvelles contraintes et identifie les conflits si besoin ;

- *self.findCompromise* qui, en cas de conflit, édite une liste de matrices de contraintes alternatives appelée *self.Alternatives* ;
- *self.solveCSP* qui édite deux listes : une liste de matrices de contraintes solutions, appelée *self.SolutionsCSP*, et une liste contenant les séquences d'activités associées appelée *self.SolutionsSequences*. Cette seconde liste est nécessaire, car selon la matrice solution choisie, la DSM associée peut aboutir sur une séquence d'activités ordonnée différemment.

E.2 Propagation

La version de la fonction de propagation que nous présentons ici n'est pas la version attachée à la classe *Intervention* que nous venons de décrire précédemment. Il s'agit de la version que nous avons généralisée pour pouvoir propager une contrainte dans toute matrice formatée de la même façon que la matrice *self.Constraints* de la classe *intervention*.

Autrement dit, nous présentons ici la fonction *propagate(C, a, b)* où *C* est une matrice de contraintes, et *a* et *b* les indices de la nouvelle contrainte propagée. La méthode associée à la classe *Intervention*, *self.propagate(a, b)* est équivalente dans le cas que nous présentons à *propagate(self.Constraints, a, b)*.

Avant de passer au code, définissons deux fonctions qui sont au cœur du processus de propagation de l'algèbre d'intervalles d'Allen et qui sont nommées dans le code ci-dessous *AllenTransi* et *AllenAdd*. Il s'agit respectivement des opérations de multiplication et d'addition de deux vecteurs de contraintes comme définies dans [Vilain 1989]. La fonction de multiplication n'est pas détaillée ici étant donné sa simplicité et sa longueur importante. C'est une fonction qui utilise le tableau de transitivité d'Allen (donné en Figure E.1) de la façon suivante : pour trois intervalles *A*, *B* et *C* et deux vecteurs de contraintes *r*₁ et *r*₂ tels que *Ar*₁*B* et *Br*₂*C*, *AllenTransi*(*r*₁, *r*₂) retourne le vecteur *r*₃ des contraintes autorisées tel que *Ar*₃*C*. De son côté, la fonction *AllenAdd*(*r*₁, *r*₂) retourne l'intersection de deux vecteurs de contraintes.

Voici à présent le code de la fonction de propagation de contraintes :

```

1 def propagate (C, a, b):
2     n = len(C)
3     ''' Initialisation de la queue de contraintes à propager.
4     La queue liste les indices des activités concernées '''
5     ToDo = [[a,b]]
6     Temp = []
7     # Récupération des indices de la première paire de la queue
8     while (len(ToDo) != 0):
9         i = ToDo[0][0]
10        j = ToDo[0][1]
11
12        # Recherche d'activités k reliées à la fois à i et j
13        for k in range (n) :
14            # Si k est reliée à i
15            if (Comparable(C, i, k) and k != j) :
```

E.2. Propagation

```
16         # Si k est reliée à i mais pas à j
17         if (not Comparable(C, k, j)):
18             if(C[k][i] == []):
19                 Temp = AllenInverse(C[i][k])
20             else:
21                 Temp = C[k][i]
22         # Si k est reliée i et j : test de transitivité
23         elif(C[k][j] == [] and C[j][k] != []):
24             Valid = AllenTransi(C[k][i], C[j][k])
25             if (Valid == []):
26                 Temp = C[k][i]
27             else:
28                 Temp = AllenAdd(C[j][i], Valid)
29         else:
30             Valid = AllenTransi(C[j][i], C[k][j])
31             if (Valid == []):
32                 Temp = C[k][i]
33             else:
34                 Temp = AllenAdd(C[k][i], Valid)
35
36         ''' Mise à jour des conflits si besoin,
37         mise à jour de la queue si besoin '''
38         if (len(Temp) == 0):
39             return(False)
40
41         else :
42             if (C[k][i] != Temp):
43                 C[k][i] = Temp
44                 ToDo.append([k,i])
45
46         # Recherche d'activité k reliée à la fois à j et à i
47         if (Comparable(C, k, j) and k != i) :
48             # Si k est reliée j mais pas à i
49             if (not Comparable(C, k, i)):
50                 if(C[j][k] == []):
51                     Temp = AllenInverse(C[j][k])
52                 else:
53                     Temp=C[j][k]
54             # Si k est reliée à j et à i : test de transitivité
55             elif(C[i][k] == [] and C[k][i] != []):
56                 Valid = AllenTransi(C[k][i], C[j][k])
57                 if (Valid == []):
58                     Temp = C[j][k]
59             else :
60                 Temp = AllenAdd(C[j][i], Valid)
61         else:
62             Valid = AllenTransi(C[i][k], C[j][i])
63             if (Valid == []) :
64                 Temp = C[j][k]
65             else :
66                 Temp = AllenAdd(C[j][k], Valid)
67
68         ''' Mise à jour des conflits si besoin,
69         mise à jour de la queue si besoin '''
```


Annexe E. Les algorithmes de la DSM Collaborative

```
70         if (len(Temp) == 0):
71             return(False)
72
73         else :
74             if (C[j][k] != Temp):
75                 C[j][k] = Temp
76                 ToDo.append([j,k])
77             # La paire (i, j) est supprimée de la queue
78             ToDo.remove(ToDo[0])
79             print('Transitive closure Complete')
80             return(True)
81
82 # Méthodes appelées dans propagate(a, b)
83 def Comparable (Constraints, i, j):
84     if (j != i and Constraints[j][i] != []):
85         return (True)
86     else :
87         return (False)
88
89 def AllenAdd (V1, V2):
90     Res = []
91     for i in range(len(V1)) :
92         if (V1[i] in V2):
93             Res.append(V1[i])
94     return(Res)
```

E.2. Propagation

B r2 C A r1 B	b	bi	d	di	o	oi	m	mi	s	si	f	fi
b before	b	no info	b, o, m, d, s	b	b	b, o, m, d, s	b	b, o, m, d, s	b	b	b, o, m, d, s	b
bi after	no info	bi	bi, oi, mi, d, f	bi	bi, oi, mi, d, f	bi	bi, oi, mi, d, f	bi	bi, oi, mi, d, f	bi	bi	bi
d during	b	bi	d	no info	b, o, m, d, s	bi, oi, mi, d, f	b	bi	d	bi, oi, mi, d, f	d	b, o, m, d, s
di contains	b, o, m, di, fi	bi, oi, di, mi, si	o, oi, d, di, e	di	o, di, fi	oi, di, si	o, di, fi	oi, di, si	di, fi, o	di	di, si, oi	di
o overlaps	b	bi, oi, di, mi, si	o, d, s	b, o, m, di, fi	b, o, m	o, oi, d, di, e	b	oi, di, si	o	di, fi, o	d, s, o	b, o, m
oi overlapped-by	b, o, m, di, fi	bi	oi, d, f	bi, oi, mi, di, si	o, oi, d, di, e	bi, oi, mi	o, di, fi	bi	oi, d, f	oi, bi, mi	oi	oi, di, si
m meets	b	bi, oi, mi, di, si	o, d, s	b	b	o, d, s	b	f, fi, e	m	m	d, s, o	b
mi met-by	b, o, m, di, fi	bi	oi, d, f	bi	oi, d, f	bi	s, si, e	bi	d, f, oi	bi	mi	mi
s starts	b	bi	d	b, o, m, di, fi	b, o, m	oi, d, f	b	mi	s	s, si, e	d	b, m, o
si started-by	b, o, m, di, fi	bi	oi, d, f	di	o, di, fi	oi	o, di, fi	mi	s, si, e	si	oi	di
f finishes	b	bi	d	bi, oi, mi, di, si	o, d, s	bi, oi, mi	m	bi	d	bi, oi, mi	f	f, fi, e
fi finished-by	b	bi, oi, mi, di, si	o, d, s	di	o	oi, di, si	m	si, oi, di	o	di	f, fi, e	fi

Figure E.1 – Table de transitivité d'Allen.

E.3 Compromis

L'algorithme de compromis est appliqué si un conflit apparait lors de la propagation de contraintes. Sachant que l'algorithme de propagation que nous utilisons est identique ou presque à celui proposé par Allen ([Allen 1983a]), un conflit concernera uniquement un sous-réseau de trois intervalles et l'ensemble des trois contraintes qui les relient. Pour résumer le code qui va suivre, l'algorithme fonctionne de la façon suivante, pour chacune des trois contraintes en conflit :

- On construit un nouveau vecteur de contraintes. Dans cette thèse, nous avons travaillé sur le relâchement des contraintes qui imposent des égalités, et la fonction *AllenRelax* utilisée pour construire un vecteur de contraintes relâchées est donnée en dessous de l'algorithme de compromis principal. Il est également possible d'utiliser le vecteur obtenu dans la table de transitivité (fonction *AllenTransi* précédemment utilisée dans l'algorithme de propagation) pour les deux autres contraintes du conflit.
- La matrice de contraintes initiale est sauvegardée afin de ne pas perdre les données entrées par les utilisateurs en premier lieu.
- La contrainte est remplacée par le nouveau vecteur et propagée. En cas de conflit, le processus s'interrompt.
- Si la propagation est couronnée de succès, et que la matrice de contrainte obtenue n'est pas déjà dans la liste des alternatives, elle y est ajoutée.
- La matrice de contraintes originale est restaurée et on passe à la contrainte suivante du conflit si elles n'ont pas toutes été traitées.

Cet algorithme a été implémenté dans *Matplan - Interveneering* comme indiqué dans le code ci-dessous. Certaines lignes de code un peu longues ont été divisées sur plusieurs lignes en utilisant le symbole `\\`.

Pour information, les éléments de la liste de conflits se présentent de la façon suivante (pour le $n^{\text{ème}}$ conflit de la liste) :

$self.Conflicts[n] = [[i, j, k], [r_1, r_2, r_3], [N_1, N_2, N_3]]$, où :

- i, j , et k sont les rangs des trois activités concernées ;
- r_1, r_2 , et r_3 sont les vecteurs contraintes respectivement entre i et j , j et k , i et k ;
- N_1, N_2 , et N_3 sont les natures respectives des contraintes (potentielles ou logistiques) r_1, r_2 , et r_3 .

Voici le code de l'algorithme de recherche de compromis :

```

1 def findCompromise (self):
2     self.Alternatives = []
3     for k in range (len(self.Conflicts)):
4         ''' Construction d'un nouveau vecteur contrainte
5         pour chaque contrainte impliquée '''
6         Relax = [AllenRelax(self.Conflicts[k][1][0]), \\
7                 AllenRelax(self.Conflicts[k][1][1]), \\
8                 AllenRelax(self.Conflicts[k][1][2])]
9

```

E.3. Compromis

```
10     # Récupération des rangs des trois activités concernées
11     A = self.Conflicts[k][0][0]
12     B = self.Conflicts[k][0][1]
13     C = self.Conflicts[k][0][2]
14
15     ''' Suppression de la mise à jour des conflits pour les tests
16     l'objectif est de tester, pas d'ajouter des contraintes '''
17     self.ConflictsUpdate = False
18
19     for n in range(3): # Les trois contraintes relâchées sont testées
20         ''' Prise en compte de l'ordre des trois activités
21         et de la contrainte relâchée '''
22         if (self.Conflicts[k][2][n] == 'R' and Relax[n] != []):
23             if (n == 0):
24                 I = A
25                 J = B
26                 K = C
27             elif (n == 1):
28                 I = B
29                 J = C
30                 K = A
31             elif (n == 2):
32                 I = A
33                 J = C
34                 K = B
35
36         # Booléen de test pour la propagation
37         prop = False
38         # Sauvegarde de la contrainte initiale
39         memory = self.Constraints[J][I]
40         # Remplacement par le nouveau vecteur
41         self.Constraints[J][I] = Relax[n]
42         if (self.Constraints[I][J] == AllenInverse(memory)):
43             self.Constraints[I][J] \
44                 = AllenInverse(self.Constraints[J][I])
45
46         #Test de propagation de la nouvelle contrainte
47         if (self.propagate(I, J) and self.Constraints \
48             not in self.Alternatives):
49             prop = True
50         elif (self.propagate(J, K) and self.Constraints \
51             not in self.Alternatives):
52             prop = True
53         elif (self.propagate(I, K) and self.Constraints \
54             not in self.Alternatives):
55             prop = True
56
57         # Création d'une nouvelle alternative en cas de succès
58         if (prop):
59             self.Alternatives.append(zeros(self.Nact, self.Nact))
60             nAlt = len(self.Alternatives)
61             for i in range (self.Nact):
62                 for j in range (self.Nact):
63                     self.Alternatives[nAlt-1][j][i] \
```

```

64         = self.Constraints[j][i]
65
66         # Restauration de la contrainte initiale
67         if(self.Constraints[I][J] \
68            == AllenInverse(self.Constraints[J][I])):
69             self.Constraints[I][J] = AllenInverse(memory)
70             self.Constraints[J][I] = memory
71
72         # Restauration de la mise à jour des conflits
73         self.ConlictsUpdate = True
74
75     self.nAlt = len(self.Alternatives)
76
77     return(None)
78
79     ''' Méthode qui construit un nouveau vecteur de contraintes
80     en relâchant les égalités '''
81     def AllenRelax (char):
82         Si la contrainte est un caractère elle est relâchée
83         if(str(char.__class__) == "<type 'str'>"):
84             Relax = []
85             if (char in ['b', 'd', 'o', 'bi', 'di', 'oi']):
86                 pass
87             elif (char == 'e'):
88                 Relax = ['e', 's', 'f', 'd', 'o', 'si', 'fi', 'di', 'oi']
89             elif (char == 's'):
90                 Relax = ['s', 'd', 'o']
91             elif (char == 'f'):
92                 Relax = ['f', 'd', 'oi']
93             elif (char == 'si'):
94                 Relax = ['si', 'di', 'oi']
95             elif (char == 'fi'):
96                 Relax = ['fi', 'di', 'o']
97             elif(char == 'm'):
98                 Relax = ['m', 'b', 'o']
99             elif(char == 'mi'):
100                 Relax = ['mi', 'bi', 'oi']
101
102         ''' Si la contrainte est un vecteur, chaque élément est relâchée
103         en évitant les doublons.'''
104         if(str(char.__class__) == "<type 'list'>"):
105             Relax = []
106             for i in range(len(char)):
107                 for j in range(len(AllenRelax(char[i]))):
108                     if(AllenRelax(char[i])[j] not in Relax):
109                         Relax.append(AllenRelax(char[i])[j])
110         return(Relax)

```

E.4 Résolution du CSP

Nous avons vu dans le chapitre 4 que la résolution d'un réseau de contraintes temporelles obtenu avec l'algèbre d'intervalles d'Allen se faisait en recherchant des ordres totaux sur l'ensemble des intervalles. Cela signifie que l'on cherche à résoudre un problème de satisfaction de contraintes en associant à chaque paire d'intervalles une et une seule relation de l'algèbre.

Cependant, ces problèmes sont coûteux en mémoire et en temps de calcul, et en utilisant la DSM avec l'algèbre d'intervalles d'Allen, nous évitons de rechercher une relation pour chaque paire d'activités. Cependant, cette démarche ne nous dispense pas de devoir éliminer les contraintes multiples.

L'algorithme qui suit est donc l'algorithme utilisé dans notre programme pour lister les différentes solutions constituées uniquement de contraintes singletons. Il est encore loin d'être optimisé d'un point de vue computationnel, mais il permet au moins de ne manquer aucune solution existante. Son fonctionnement est le suivant :

- On recherche une contrainte multiple dans la matrice de contraintes. Si on en trouve, pour chaque élément r_i dans cette contrainte, les étapes qui suivent sont appliquées.
 - 1** - La contrainte multiple est sauvegardée et remplacée par r_i seule qui est propagée dans la matrice.
 - 2** - Si la propagation échoue, on passe au r_i suivant. Sinon, on recherche d'autres contraintes multiples.
 - 3a** - Si on n'en trouve pas, la solution est ajoutée à la liste.
 - 3b** - Si on en trouve, un appel récursif de la fonction est effectué sur la matrice avec r_i à la place de la contrainte multiple originale.
- Si aucune solution n'a été trouvée, un message d'erreur est retourné à l'utilisateur.
- En cas de succès, les différentes caractéristiques des solutions sont mises à jours (liste de durées, de doses de radiations, etc.).

Le code est donné et commenté ci-dessous. Certaines lignes trop longues ont dues être divisées en utilisant le symbole `\\`.

```
1 def solveCSP (self, C):
2     # Initialisation d'une matrice solution
3     N = len(C)
4     Sol = zeros (N, N)
5     # Copie des données de contraintes initiales
6     for i in range (N):
7         for j in range (N):
8             Sol[j][i] = C[j][i]
9     #recherche de contraintes multiples
10    for i in range (self.Nact):
11        for j in range (self.Nact):
12            if (len(Sol[j][i]) > 1):
13                NoSolution = True
14                memory = Sol[j][i]
```

```

15         ''' Test de propagation de chaque élément
16         de la contrainte multiple dans la matrice Sol '''
17         for n in range (len(memory)):
18             Sol[j][i] = [memory[n]]
19
20             test = propagate (Sol, i, j)
21
22             ''' En cas de succès,
23             recherche d'autres contraintes multiples '''
24             if(test):
25                 Finish = True
26                 for k in range (N):
27                     for l in range (N):
28                         if (len(Sol[k][l]) > 1):
29                             Finish = False
30                 # S'il n'y en a plus, ajout de la solution
31                 if (Finish):
32                     NoSolution = False
33                     if(Sol not in self.SolutionsCSP):
34                         self.SolutionsCSP.append(zeros(N, N))
35                         self.SolutionsSequences.append(v_zeros(N))
36                         nSol = len(self.SolutionsCSP)
37
38                     for k in range(N):
39                         self.SolutionsSequences[nSol-1][k] \
40
41                         for l in range(N):
42                             self.SolutionsCSP[nSol-1][k][l] \
43
44                             Sol[j][i] = memory
45                 # Appel récursif sur Sol sinon
46                 else:
47                     if(self.solveCSP(Sol)):
48                         NoSolution = False
49
50             ''' En cas d'échec,
51             récupération de la contrainte multiple d'origine '''
52             else:
53                 Sol[j][i] = memory
54
55             # Message d'erreur en cas d'absence de solution
56             if (NoSolution):
57                 print('No singleton solution was found !')
58                 return(False)
59
60             # Mise à jour des diverses listes associées aux solutions
61             self.nSol = len(self.SolutionsCSP)
62             self.SolutionsDurations = v_zeros(self.nSol)
63             self.CollectiveDoses = v_zeros(self.nSol)
64             self.IndividualDoses = []
65             for i in range(self.nSol):
66                 self.IndividualDoses.append([0, 0])
67
68             return(True)

```

E.5 Séquençage de la DSM

L'algorithme de séquençage de la DSM est largement documenté dans la littérature (voir par exemple [Gebala 1991]) mais difficile à trouver en détails notamment à cause du fait qu'il est utilisé dans des applications commerciales. La version que nous présentons ici a donc été développée par nos soins et ses résultats comparés à maintes reprises à ceux obtenus avec la macro Microsoft Excel distribuée sur le site de la communauté académique DSM [Lindemann 2009].

Sachant que nous avons déjà bien décrit le procédé de séquençage dans cette thèse, nous en rappelons rapidement le fonctionnement :

- les activités sans données entrantes (lignes vides) sont placées en tête de matrice ;
- les activités sans données sortantes (colonnes vides) sont placées en fin de matrice ;
- la matrice restante est testée pour rechercher des boucles ;
 - succès** : les activités de la boucle sont fusionnées et la procédure répétée récursivement sur la nouvelle DSM obtenue ;
 - échec** : on vérifie l'ordre des activités et on retourne la DSM obtenue comme résultat.
- la boucle est développée, éventuellement à un nouvel emplacement s'il y a eu réorganisation ;
- la DSM obtenue est retournée comme résultat.

Dans le code ci-dessous, nous réorganisons à la fois la DSM et la séquence d'activités associée. L'algorithme utilisé pour la recherche de boucles (*pathSearch*) retourne une liste contenant les rangs des activités contenues dans cette boucle. Son objectif est de parcourir les chemins de la matrice de contrainte en contrainte en partant d'une extrémité jusqu'à retrouver un nœud déjà parcouru. Plusieurs différents algorithmes ont été testés (y compris certains avec des heuristiques simples afin de choisir quel nœud parcourir en premier, un peu à la façon de l'algorithme de recherche A*) et pour des raisons de synthèse, ils ne sont pas détaillés ici.

Les algorithmes pour tester si une colonne ou une ligne est vide (*testCol* et *testRow*) ne sont pas fournis ici, de même que ceux utilisés pour fusionner ou développer les boucles qui sont des manipulations matricielles simples.

```
def sequenceDSM (DSM) :
    n = len(DSM)
    # Initialisation d'une matrice résultat
    Res = zeros(n, n)

    for i in range(n) :
        for j in range(n) :
            Res[i][j] = DSM[i][j]

    k = 0
    l = n
    # Variable vérifiant le nombre de tâches à traiter
```



```

count = 0
# Séquence contenant les rangs d'origine des activités
Sequence = range(n)

''' Placement des lignes vides en début de matrice'''
for i in range(n):
    if (testRow(Res, i) and i == 0):
        k += 1
        count += 1
    elif (testRow(Res, i) and i != 0):
        Res.insert(k, Res[i])
        Sequence.insert(k, Sequence[i])
        del(Res[i+1])
        del(Sequence[i+1])
        for j in range(n):
            Res[j].insert(k, Res[j][i])
            del(Res[j][i+1])
        k += 1
        count += 1
''' Placement des colonnes vides en fin de matrice'''
for i in range(n-k):
    if(testCol(Res, k+i) and k+i != n-1):
        Res.insert(l, Res[k+i])
        Sequence.insert(l, Sequence[k+i])
        del(Res[k+i])
        del(Sequence[k+i])
        for j in range(n):
            Res[j].insert(l, Res[j][k+i])
            del(Res[j][k+i])
        l += 1
        count += 1

# Si toutes les activités ont été concernées, retourner le résultat
if (count == n):
    return([Res, Sequence])
# Sinon, création d'une matrice réduite M avec les activités restantes
else:
    M = zeros(l-k, l-k)
    for i in range(l-k):
        for j in range(l-k):
            M[i][j] = Res[k+i][k+j]

    Seq1 = [] # Ainsi que la séquence réduite correspondante
    for i in range(len(M)):
        Seq1.append(Sequence[k+i])

    # Recherche d'une boucle dans la matrice réduite
    Loop = pathSearch(M)
    ''' Si la boucle est non vide
    ou ne contient pas toutes les activités restantes :'''
    if (len(Seq1) != len(Loop) and Loop != []):
        '''Étape 1 : placement de la boucle en tête
        afin de simplifier sa fusion'''
        Seq2 = [] # création d'une séquence d'activités correspondante

```

E.5. Séquençage de la DSM

```
for i in range(len(Seq1)):
    if (i in Loop):
        if(i == Loop[0]):
            Seq2.insert(0, Seq1[i])
        else :
            Seq2.append(Seq1[i])

newseq1 = []
for i in range(len(Loop)) :
    newseq1.append(Seq1[Loop[i]])
for i in Seq1:
    if(i not in newseq1):
        newseq1.append(i)
for i in range(len(Seq1)):
    Seq1[i] = newseq1[i]

'''Étape 2 : fusion des activités de la boucle
dans une nouvelle matrice réduite M1'''
M1 = collapseLoop(M, Loop)

P = partitionDSM(M1)
temp = v_zeros(len(Seq2))
for i in range(len(Seq2)):
    temp[i] = Seq2[P[1][i]]
Seq2 = temp
# Recherche de la position de la boucle si elle a été déplacée'''
Loop[0] = Seq2.index(Seq1[0])

# Expansion de la boucle dans la matrice et la séquence
Seq2 = List_expandLoop(Seq2, Seq1, Loop)

M = Matrix_expandLoop(M, Seq1, Seq2)

# Procédure si aucune boucle n'a été trouvée précédemment
elif(Loop == []):
    Seq2 = Seq1
    orderSequence(M, Seq2)
else:
    Seq2 = Seq1

# Récupération des positions des activités en cas de réorganisation
for i in range(len(Seq1)) :
    Sequence[k+i] = Seq2[i]

Res = Matrix_expandLoop(DSM, range(n), Sequence)
# Retourne la matrice résultat de la séquence correspondante
return([Res, Sequence])
```

E.6 Construction du Gantt à partir de la DSM

L'ultime algorithme que nous décrivons dans cette annexe est celui que nous utilisons pour construire un diagramme de Gantt à partir d'une matrice de contraintes donnée (ou de la matrice de contraintes d'origine si l'on n'a rencontré auparavant ni de conflit, ni de contrainte multiple).

Son principe est le suivant : sachant que la matrice DSM a été séquencée, les activités sont déjà ordonnées les unes par rapport aux autres. Pour chacune, deux listes, une de prédécesseurs et une de successeurs, ont été établies. Cependant, il faut récupérer les différentes contraintes de l'algèbre d'Allen afin de positionner les dates respectives de début et de fin de toutes les activités tout en respectant toutes les contraintes en présence. Pour cela, on part de la première activité de la séquence et on procède de la façon suivante :

- On parcourt la liste de ses prédécesseurs. Pour chacun :
 - a) on récupère la contrainte qui les lie ;
 - b) on calcule les dates de début et de fin que l'on stocke dans une liste puis, si nécessaire, on décale la date de début au plus tôt.
- On choisit la date de début la plus proche possible du début au plus tôt.
- On parcourt la liste de ses successeurs et pour chacun on met à jour ses positions afin de respecter la contrainte qui les lie.

Cet algorithme permet de tenir compte du fait qu'une même activité peut recevoir des contraintes de plusieurs autres, et sachant que les boucles dans la DSM peuvent parfois induire des placements hasardeux des activités, il permet aussi de modifier *a posteriori* la position d'activités pour prendre toutes les contraintes en compte, notamment si l'unique prédécesseur d'une activité est placée après elle dans la séquence.

Comme pour certains des algorithmes précédemment présentés, les lignes de code trop longues pour figurer sur la page sont interrompues et réparties sur plusieurs lignes en utilisant le symbole `\\`.

```
def DSM2Dates (self):
    # Choix de la matrice de contraintes
    if(self.SolutionsCSP == []):
        ActList = self.ActList
        Constraints = self.Constraints
        self.computePrecursors()
    else :
        ActList = self.SolutionsSequences[self.SelectedSolution]
        Constraints = self.SolutionsCSP[self.SelectedSolution]

    # Initialisation des activités (début et début au plus tôt à 0)
    for act in ActList:
        act.setStart(0)
        act.setEnd(act.Duration)
        act.EarliestStart = 0
```

E.6. Construction du Gantt à partir de la DSM

```
# Chaque activité est considérée à partir de la première de la séquence
for act in ActList:
    # Elle est d'abord placée par rapport à ses prédécesseurs
    if act.Precursors != []:
        positions = [[act.Start, act.End]]
        for act1 in act.Precursors:
            # Récupération de la contrainte
            dep = self.findDependency(act1, act)
            constraint = Constraints[dep.Suc][dep.Prec][0]

            ''' Cas : ``before'', vérification du délai (obligatoire
            ou compressible), mise à jour des début/fin et début au plus tôt'''
            if (constraint == 'b' and \
                act1.Start+act1.Duration*dep.TauDelay ≥ act.EarliestStart):
                if (act1.End > act.EarliestStart and dep.Nature == 'R'):
                    act.EarliestStart = act1.End
                elif (act1.Start+act1.Duration*dep.TauDelay ≥ \
                    act.EarliestStart and dep.Nature == 'T'):
                    act.EarliestStart = act1.Start+act1.Duration*dep.TauDelay
                positions.append([act1.Start+act1.Duration*dep.TauDelay, \
                    act1.Start + act1.Duration*dep.TauDelay + act.Duration])

            ''' Pour les autres contraintes, on modifie si besoin
            le début au plus tôt et on note les dates de début/fin. '''
            elif (constraint != 'b' and \
                act1.Start + act1.Duration*dep.TauDelay ≥ act.EarliestStart):
                act.EarliestStart = act1.Start + act1.Duration*dep.TauDelay
                positions.append(\
                    [act1.Start + act1.Duration*dep.TauDelay,\
                    act1.End - act.Duration*dep.DeltaDelay])

            ''' Les différentes options sont parcourues et
            la plus proche du début au plus tôt est sélectionnée. '''
            act.setStart(positions[0][0])
            act.setEnd(positions[0][1])
            for pos in positions:
                if (act.Start < act.EarliestStart and pos[0] > act.Start and \
                    pos[0] ≥ act.EarliestStart):
                    act.setStart(pos[0])
                    act.setEnd(pos[1])

                elif (act.Start > act.EarliestStart and pos[0] < act.Start and \
                    pos[0] ≥ act.EarliestStart):
                    act.setStart(pos[0])
                    act.setEnd(pos[1])

# La liste de ses successeurs est ensuite parcourue pour les replacer
if act.Successors != []:
    for act1 in act.Successors:
        # Récupération de la contrainte
        dep = self.findDependency(act, act1)
        constraint = Constraints[dep.Suc][dep.Prec][0]

        ''' Cas : ``before'', vérification du délai (obligatoire
```

Annexe E. Les algorithmes de la DSM Collaborative

```
ou compressible), mise à jour des début/fin et début au plus tôt'''
if(constraint == 'b' and \\
    act.Start + act.Duration*dep.TauDelay > act1.EarliestStart):
    if(act.End > act1.EarliestStart):
        act1.EarliestStart = act.End
    if(act1.EarliestStart > act1.Start):
        act1.setStart(act.Start + act.Duration*dep.TauDelay)
        act1.setEnd(act1.Start + act1.Duration)

''' Pour les autres contraintes, on modifie si besoin
le début au plus tôt et on note les dates de début/fin.'''
elif(constraint != 'b' and \\
    act.Start + act.Duration*dep.TauDelay ≥ act1.EarliestStart):
    act1.EarliestStart = act.Start + act.Duration*dep.TauDelay
    act1.setStart(act.Start + act.Duration*dep.TauDelay)
    act1.setEnd(act.End - act1.Duration*dep.DeltaDelay)

return(None)
```

Scenarii d'intervention au Super-FRS de FAIR

Cette annexe détaille les trois solutions envisagées pour remplacer les inserts de la ligne de faisceau du Super-FRS au niveau des points focaux, et éventuellement effectuer des opérations de maintenance dans la foulée.

Comme nous l'avons décrit dans le chapitre 5 du corps de la thèse, trois scenarii sont considérés : le premier totalement automatisé, le deuxième entièrement télé-opéré et le troisième hybride, combinant des éléments des deux premiers. Remarquons que pour l'instant, seules les durées du scénario télé-opéré ont été estimées.

F.1 Scénario automatisé

Matériel nécessaire

Ce scénario entièrement automatisé nécessite le matériel suivant (illustration fournie en Figure F.1) :

- deux plateformes KUKA *omnimove*, l'une portant le bras robotisé (désigné par le terme *Bras Mobile* (BM) dans la suite de la description) et la seconde pour le stockage temporaire et le transport des inserts (*Cellule Chaude Mobile*, notée CCM) ;
- un bras robotisé KUKA ;
- la grue mobile télé-opérée UNIC Eco-095 (notée GM dans la suite de la description) comme système redondant utilisé en cas de panne.

Nous rappelons le budget estimé pour l'achat de ce matériel est d'environ 1,45 M€ : 200 k€ pour la grue mobile et de 1,25 M€ pour les deux *omnimoves* et le bras robotisé.

Remarquons que la grue mobile est présente dans les trois scenarii même si elle n'est parfois utilisée que comme système de secours comme c'est le cas ici. En effet, son acquisition sera de toute façon effectuée par la GSI pour la maintenance sur les systèmes de vide au sein de l'accélérateur.

Séquence d'activités

N°	Description	Ressources	Commentaires
1	Déplacement du bras mobile (BM) sur le lieu d'intervention	BM (+ humain)	Séquence automatisée ou pilotée à distance
2	Stationnement BM et mise en position	BM (+ humain)	Séquence automatique ou pilotée à distance
3	Calibration des coordonnées, inspection visuelle avec le BM	BM	Changement d'outil : caméra pour l'inspection
4	Déplacement de la CCM sur le lieu d'intervention	CCM (+ humain)	Séquence automatisée ou pilotée à distance
5	Stationnement et mise en position de la CCM	BM (+ humain)	Séquence automatisée ou pilotée à distance
6	Le BM déconnecte le panneau de raccordement de l'insert et le stocke sur la CCM	BM, CCM	Tâche automatisée, avec changement d'outil du BM
7	Le BM retire l'insert de la ligne de faisceau	BM	Changement d'outil pour agripper l'insert
8a	Maintenance requise : BM stocke l'insert dans la CCM	BM et CCM	Tâche automatisée
8b	Maintenance non requise : BM va stocker l'insert dans un stockage sur site	BM et site de stockage local	Tâche automatisée
9	Le BM récupère le nouvel insert dans la CCM et le monte sur la ligne de faisceau	BM et CCM	Séquence automatisée
10	Le BM effectue une inspection visuelle	BM	Changement d'outil : caméra pour l'inspection
11	Le BM reconnecte le panneau de raccordement	BM	Changement d'outil pour branchement
12	Le BM effectue une nouvelle inspection visuelle	BM	Changement d'outil : caméra pour l'inspection
13	Préparation pour retour et sortie de stationnement de la CCM	CCM	Séquence automatisée ou pilotée à distance
14	Préparation pour retour et sortie de stationnement du BM	BM (+ humain)	Séquence automatisée ou pilotée à distance
15	Retour du BM à l'entrée du FRS	BM (+ humain)	Séquence automatisée ou pilotée à distance

F.1. Scénario automatisé

N°	Description	Ressources	Commentaires
16	Inspection RP ⁴⁴ et éventuelle décontamination du BM	BM et agent RP	
17	Le BM est conduit en position de stockage	BM et opérateur	Tâche télé-opérée
18	La CCM rapporte les équipements activés en cellule chaude	CCM et opérateur	Tâche automatisée pour le retour puis télé-opérée hors installation

Tableau F.1: Séquence d'activités du scénario automatisé.

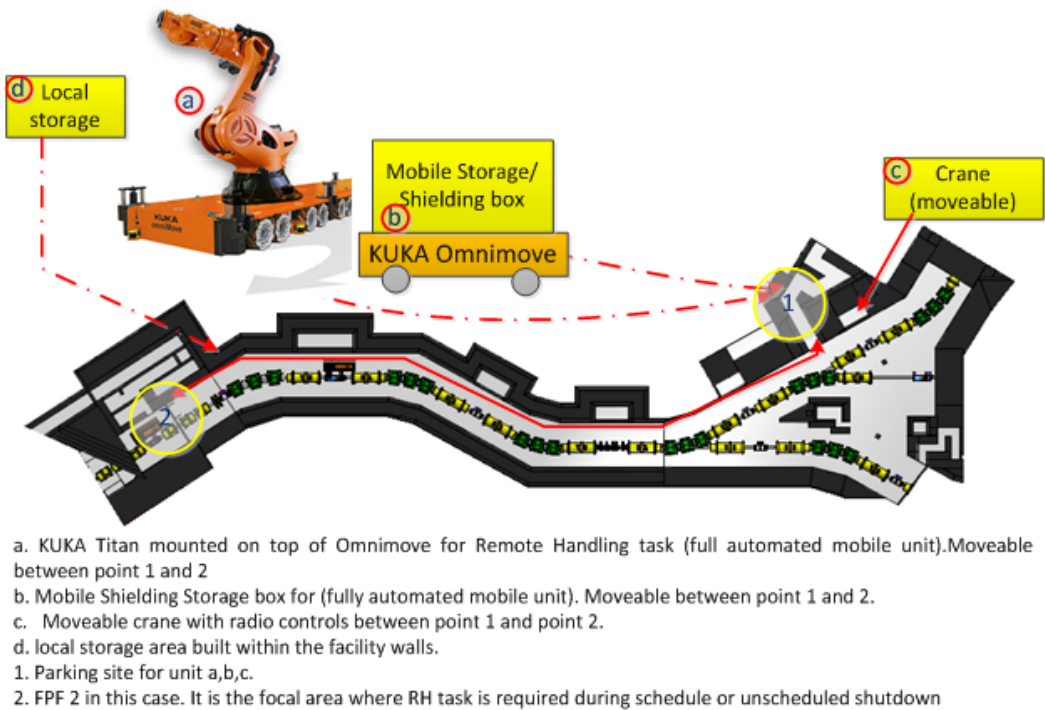


Figure F.1 – Illustration (en anglais) du scénario automatisé. Le même scénario est adopté pour la procédure hybride avec ajout d’une séquence de maintenance additionnelle.

44. Radioprotection

F.2 Scénario télé-opéré

Matériel nécessaire

Le matériel nécessaire à la réalisation du scénario télé-opéré est illustré en Figure F.2). Ce scénario nécessite :

- un robot télé-opéré *Exo-Hands*, de marque Festo ;
- une plateforme KUKA *omnimove* servant à la fois de cellule chaude mobile (CCM) et de station de travail pour l'opérateur et l'*Exo-Hands* ;
- la grue mobile (GM) télé-opérée UNIC Eco-095.

Le budget estimé pour l'acquisition de ce matériel est de 800 k€ environ, avec de 500 à 600 k€ pour l'*omnimove*, l'*Exo-Hands* et le blindage à positionner sur la CCM (en cours de dimensionnement en juin 2014), et 200 k€ pour la grue mobile. Il s'agit à priori du scénario le moins coûteux des trois, mais c'est également celui qui expose le plus le personnel aux radiations.

Séquence d'activités

N°	Description	Durée	Ressources	Commentaires
1	Déplacement de la CCM au point d'intervention	30 min	CCM (+ opérateur)	Tâche automatisée ou télé-opérée à distance ⁴⁵
2	Stationnement de la CCM et placement adéquat pour l'intervention	15min	CCM (+ opérateur)	Tâche automatisée ou télé-opérée à distance
3	L'opérateur-GM conduit la GM au point d'intervention	20 min	GM + opérateur-GM	Tâche télé-opérée à distance
4	Stationnement de la GM et placement adéquat pour l'intervention	15 min	GM + opérateur-GM	Tâche télé-opérée à distance
5	L'opérateur (opérateur-CCM) de l' <i>Exo-Hands</i> (EH) se rend sur le lieu d'intervention	5 min	Opérateur-CCM	L'opérateur-CCM reçoit une dose
6	Inspection visuelle (par caméra) et déconnexion du panneau de raccordement	10 min	EH et Opérateur-CCM	L'opérateur-CCM reçoit une dose
7	L'opérateur-CCM regagne la sortie	5 min	Opérateur-CCM	L'opérateur-CCM reçoit une dose

45. Le terme à *distance* signifie ici qu'aucune dose n'est reçue, l'opérateur restant hors de la zone radioactive.

F.2. Scénario télé-opéré

N°	Description	Durée	Ressources	Commentaires
8	L'opérateur-GM se rend sur le lieu d'intervention	5 min	Opérateur-GM	L'opérateur-GM reçoit une dose
9	Démontage et retrait de l'insert de la ligne de faisceau. Stockage sur la CCM	30 min	GM + opérateur-GM	L'opérateur-GM reçoit une dose
10	Récupération du nouvel insert sur la CCM et montage sur la ligne de faisceau	30 min	GM + opérateur-GM	L'opérateur-GM reçoit une dose
11	L'opérateur-GM quitte la zone et regagne la sortie	5 min	Opérateur-GM	L'opérateur-GM reçoit une dose
12	L'opérateur-CCM se rend de nouveau sur le lieu d'intervention	5 min	Opérateur-CCM	L'opérateur-CCM reçoit une dose
13	Reconnexion du panneau de raccordement et inspection visuelle (par caméra)	10 min	EH et Opérateur-CCM	L'opérateur-CCM reçoit une dose
14	L'opérateur-CCM regagne la sortie	5 min	Opérateur-CCM	L'opérateur-CCM reçoit une dose
15	La GM est préparée pour retour et sortie du stationnement	15 min	GM (+ opérateur)	Tâche télé-opérée à distance
16	La GM est conduite hors de la zone contrôlée	20 min	GM (+ opérateur)	Tâche télé-opérée à distance
17	Inspection RP de la GM et éventuelle décontamination	2 h	Agent RP et GM	Une dose faible peut être reçue
18	La GM est conduite à son parking de stockage	10 min	GM (+ opérateur)	Tâche télé-opérée à distance
19	La CCM est préparée pour le retour et sortie de son stationnement	15 min	CCM (+ opérateur)	Tâche automatisée ou télé-opérée à distance
20	Retour de la CCM hors de la zone contrôlée	20 min	CCM (+ opérateur)	Tâche automatisée ou télé-opérée à distance
21	Inspection RP de la CCM et éventuelle décontamination	2 h	Agent RP et CCM	Une dose faible peut être reçue

Annexe F. Scenarii d'intervention au Super-FRS de FAIR

N°	Description	Durée	Ressources	Commentaires
22	La CCM est conduite à son parking de stockage	10 min	CCM et opérateur	Tâche télé-opérée

Tableau F.2: Séquence d'activités du scénario télé-opéré.

Procédure de maintenance additionnelle

Dans le cas où une maintenance doit être effectuée dans la foulée, une séquence de tâches additionnelles peut être insérée dans la procédure. Si c'est le cas, cela se déroule au niveau de la tâche 17, c'est à dire que la grue mobile ne passe pas le contrôle de radioprotection et est placée en attente en cellule chaude (les tâches n°17 et 18 ne sont pas effectuées). Une fois la cellule chaude mobile sortie du Super-FRS pour rapporter l'insert à réparer, (tâches n°19 et 20 de la séquence ci-dessus, qui deviennent n°17 et 18), la séquence suivante est effectuée pour terminer l'intervention :

N°	Description	Durée	Ressources	Commentaires
19	La GM est conduite à proximité de la CCM	10 min	GM + opérateur-GM	Tâche télé-opérée
20	L'insert à réparer est récupéré depuis sa position de stockage sur CCM et placée sur l'aire de travail (toujours sur la CCM)	15 min	GM, MCC et opérateur-GM	Dose faible reçue par opérateur GM
22	L'opérateur-MCC rejoint la MMC	5 min	Opérateur-MCC	Pas ou peu de dose reçue
23	Maintenance, remplacement ou stockage définitif de l'insert à l'aide du robot EH	10 min	EH, MCC et opérateur-MCC	Dose faible reçue par opérateur MCC. Les déchets produits sont stockés dans un container adapté
24	L'opérateur-MCC quitte la cellule chaude	5 min	Opérateur-MCC	Pas ou peu de dose reçue
25	La GM récupère les déchets radioactifs pour stockage	20 min	GM, MCC et Opérateur-GM	Dose faible reçue par opérateur GM
26	Inspection RP de la GM et éventuelle décontamination	2 h	Agent RP et GM	Une dose faible peut être reçue
27	Inspection RP de la CCM et éventuelle décontamination	2 h	Agent RP et CCM	Une dose faible peut être reçue

F.2. Scénario télé-opéré

N°	Description	Durée	Ressources	Commentaires
28	La GM est conduite à son parking abrité du faisceau	10 min	GM et opérateur	Tâche télé-opérée
29	La CCM est conduite à son parking abrité du faisceau	10 min	CCM et opérateur	Tâche télé-opérée

Tableau F.3: Séquence d'activités de maintenance additionnelles du scénario télé-opéré.

On remarque que des doses de radiations sont susceptibles d'être reçues, notamment parce que l'insert rapporté est activé. Cependant, ces doses sont difficiles (sinon impossibles) à simuler à l'aide de FLUKA, et des mesures manuelles ainsi que des retours d'expérience seront nécessaires pour estimer les doses reçues dans cette séquence additionnelle. Elles devraient toutefois rester bien inférieures à celles de la première partie du scénario, étant donné que les travaux de cette séquence additionnelle sont effectués hors de la zone contrôlée.

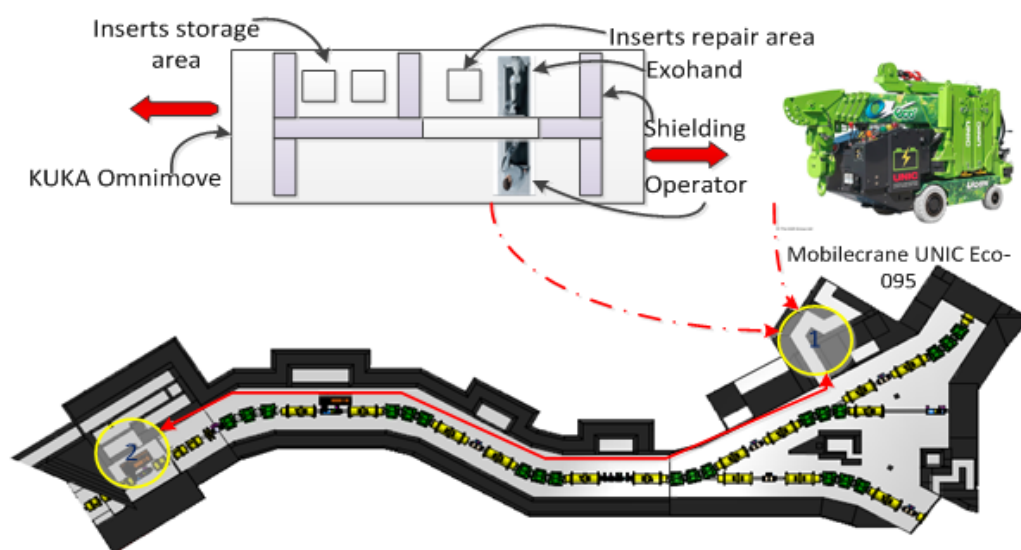


Figure F.2 – Illustration (en anglais) du scénario d'intervention télé-opéré.

F.3 Scénario hybride

Matériel nécessaire

Ce scénario hybride nécessite la totalité du matériel utilisé dans les deux autres scenarii :

- deux plateformes KUKA *omnimove*, l'une portant le bras robotisé (désigné par le terme *Bras Mobile* dans la suite de la description) et la seconde pour le stockage temporaire et le transport des inserts (*Cellule Chaude Mobile*, notée CCM) ;
- un bras robotisé KUKA ;
- uUn robot télé-opéré *Exo-Hands*, de marque Festo ;
- la grue mobile (GM) télé-opérée UNIC Eco-095.

Il est par conséquent le scénario le plus coûteux des trois (environ 2 M€) mais permet également une plus grande flexibilité sur les séquences de tâches à effectuer, tout en n'exposant le personnel qu'à des doses de radiations limitées.

Séquence d'activités

N°	Description	Ressources	Commentaires
1	Déplacement du bras mobile (BM) sur le lieu d'intervention	BM (+ humain)	Séquence automatisée ou pilotée à distance
2	Stationnement BM et mise en position	BM (+ humain)	Séquence automatique ou pilotée à distance
3	Calibration des coordonnées, inspection visuelle avec le BM	BM	Changement d'outil : caméra pour l'inspection
4	Déplacement de la CCM sur le lieu d'intervention	CCM (+ humain)	Séquence automatisée ou pilotée à distance
5	Stationnement et mise en position de la CCM	BM (+ humain)	Séquence automatisée ou pilotée à distance
6	Le BM déconnecte le panneau de raccordement de l'insert et le stocke sur la CCM	BM, CCM	Tâche automatisée, avec changement d'outil du BM
7	Le BM retire l'insert de la ligne de faisceau	BM	Changement d'outil pour agripper l'insert
8a	Maintenance requise : BM stocke l'insert dans la CCM	BM et CCM	Tâche automatisée
8b	Maintenance non requise : BM va stocker l'insert dans un stockage sur site	BM et site de stockage local	Tâche automatisée
9	Le BM récupère le nouvel insert dans la CCM et le monte sur la ligne de faisceau	BM et CCM	Séquence automatisée

F.3. Scénario hybride

N°	Description	Ressources	Commentaires
10	Le BM effectue une inspection visuelle	BM	Changement d'outil : caméra pour l'inspection
11	Le BM reconnecte le panneau de raccordement	BM	Changement d'outil pour branchement
12	Le BM effectue une nouvelle inspection visuelle	BM	Changement d'outil : caméra pour l'inspection
13	Préparation pour retour et sortie de stationnement de la CCM	CCM	Séquence automatisée ou pilotée à distance
14	Préparation pour retour et sortie de stationnement du BM	BM (+ humain)	Séquence automatisée ou pilotée à distance
15	Retour du BM à l'entrée du FRS	BM (+ humain)	Séquence automatisée ou pilotée à distance
16	Inspection RP et éventuelle décontamination du BM	BM et agent RP	
17	Le BM est conduit en position parking abritée du faisceau	BM et opérateur	Tâche télé-opérée

Tableau F.4: Séquence d'activités du scénario hybride.

Procédure de maintenance additionnelle

Comme le scénario télé-opéré, le scénario hybride offre la possibilité d'effectuer des opérations de maintenance des inserts en cellule chaude grâce à l'utilisation du robot *Exo-Hands*. Le cas échéant, la séquence d'activités est également modifiée en fin de réalisation, et le tableau présenté ci-dessous représente les tâches à effectuer une fois la CCM placée en attente dans la cellule chaude. Dans ce cas cependant, la totalité de la séquence précédente est effectuée, y compris l'inspection de radioprotection sur le bras mobile qui n'est plus utilisé.

N°	Description	Ressources	Commentaires
19	La CCM est préparée avec mise en place du robot EH pour la maintenance	CCM, humain	Tâche télé-opérée et installation manuelle. Pas ou peu de dose reçue
20	La GM est conduite à proximité de la CCM	GM et Opérateur-GM	Pas ou peu de dose reçue
21	Stationnement, positionnement et préparation de la GM pour attraper l'insert	GM et opérateur-GM	Tâche télé-opérée, faible dose possible pour l'opérateur-GM

Annexe F. Scenarii d'intervention au Super-FRS de FAIR

N°	Description	Ressources	Commentaires
22	L'insert est agrippé, sorti de son container et déposé sur l'aire de maintenance sur la CCM	Gm et opérateur-GM	Tâche télé-opérée, faible dose possible pour l'opérateur-GM
23	L'opérateur-CCM se rend dans la cellule chaude	Opérateur-CCM	Pas ou peu de dose reçue
24	Maintenance, remplacement ou stockage définitif de l'insert à l'aide du robot EH	EH, MCC et opérateur-MCC	Dose faible reçue par opérateur MCC. Les déchets produits sont stockés dans un container adapté
25	L'opérateur-MCC quitte la cellule chaude	Opérateur-MCC	Pas ou peu de dose reçue
26	Le container de déchets est récupéré avec la GM et placé dans le stockage de la cellule chaude mobile	GM, CCM et opérateur-GM	Tâche télé-opérée, faible dose possible pour l'opérateur-GM
27	La CCM utilisée pour transférer le container au stockage dans la cellule chaude principale	CCM et opérateur	Tâche télé-opérée
28-29	Inspection RP et éventuelle décontamination pour la CCM et la GM	CCM, GM, agents RP	Faibles doses reçues possibles
30-31	GM et CCM conduites en positions de parking abritées du faisceau	CCM, GM et opérateurs	Tâches télé-opérées

Tableau F.5: Séquence d'activités de maintenance additionnelles du scénario hybride.

Comme pour le scénario télé-opéré, cette partie optionnelle du scénario hybride peut exposer le personnel à de faibles doses de radiations dues à l'activation des équipements sur lesquels la maintenance est effectuée. Il est à l'heure actuelle impossible d'estimer ces données, mais les doses reçues devraient être nettement inférieures aux doses simulées pour le scénario télé-opéré, étant donné que ces opérations sont effectuées hors de la zone contrôlée.

PILOTER LA COMPLEXITE : UTILISATION DE DSM ET DE L'ALGEBRE D'INTERVALLES D'ALLEN POUR LA PLANIFICATION COLLABORATIVE

RESUME : Cette thèse propose une méthodologie de pilotage d'organisations complexes, en s'intéressant à de nouvelles méthodes de planification collaborative et d'optimisation d'interventions en environnements soumis à des rayonnements ionisants. En nous basant sur l'étude d'installations scientifiques et technologiques complexes tels que celles du CERN à Genève (Suisse) et de la GSI à Darmstadt (Allemagne), nous y analysons les besoins et contraintes de planification imposés par les environnements à risques en général, et par les rayonnements ionisants en particulier. Les implications liées à la collaboration sont ensuite détaillées, et un modèle ontologique d'intervention est proposé afin de sélectionner les méthodes les plus adaptées au problème étudié. La méthode proposée dans cette thèse repose sur des techniques éprouvées en planification de projets ainsi qu'en conception de produits comme la Design Structure Matrix (DSM). Elle introduit en revanche dans ces domaines des méthodes habituellement rencontrées en intelligence artificielle : les algèbres temporelles qualitatives et la propagation des contraintes temporelles, ainsi que la recherche de compromis en cas de conflit. Cette « DSM Collaborative » a été implémentée dans une application prototype testée sur des cas pratiques au CERN et à la GSI, dont le premier est décrit dans l'ultime chapitre de cette thèse. C'est une approche qui place la ressource (essentiellement humaine) et les contraintes temporelles au cœur du processus de planification. Elle met l'accent sur la collaboration entre les différents participants, ainsi que sur la simulation et la comparaison multicritère de multiples scénarii plutôt que sur la recherche d'un unique optimum souvent irréalisable sur le plan pratique.

Mots clés : Collaboration, planification d'intervention, rayonnements ionisants, Design Structure Matrix (DSM), Algèbre d'intervalles d'Allen, complexité

HANDLING COMPLEXITY: THE USE OF DSM AND ALLEN'S INTERVAL ALGEBRA FOR COLLABORATIVE PLANNING AND SCHEDULING.

ABSTRACT: This work proposes a methodology to handle complexity in organizations by focusing on innovative and collaborative planning and scheduling methods dedicated to the optimization of interventions in environments emitting ionizing radiations. By taking as work environment highly complex and technological scientific facilities such as the ones of CERN in Geneva (Switzerland) and GSI in Darmstadt (Germany), we analyze the needs and requirements induced in intervention planning and scheduling by hazardous environments in general, and then more specifically by ionizing radiations. The implications of collaborative work are then scrutinized, and an ontological model for interventions is designed in order to select the methods best suited to our problem. The framework we present in this work relies on methods successfully used in project planning and scheduling and innovative product design like the Design Structure Matrix (DSM). It also introduces in these fields methods borrowed to artificial intelligence planning and scheduling such as the temporal qualitative algebras, constraint propagation, and the search of compromises in case of conflicts. This so called "Collaborative DSM" has been implemented in a prototype software application tested at CERN and GSI on practical applications. The very first one and its results are presented in the final chapter of this thesis. This framework aims at placing resources (mostly human resources) and temporal constraints at the heart of the planning and scheduling process. It focuses on collaboration between the different actors involved, from coordinators to technicians, and on simulation and multiple-criteria comparison of several scenarios, rather than searching for a unique optimum, which often tends to be non-practical, should one even be found.

Keywords : Collaboration, intervention planning and scheduling, ionizing radiations, Design Structure Matrix (DSM), Allen's interval algebra, complexity