



HAL
open science

Modélisation et simulation informatique de l'innovation en médecine: Conception d'un outil d'aide à l'évaluation médico-économique des centres de radiothérapie

Anastasiya Shtiliyanova

► **To cite this version:**

Anastasiya Shtiliyanova. Modélisation et simulation informatique de l'innovation en médecine: Conception d'un outil d'aide à l'évaluation médico-économique des centres de radiothérapie. Médecine humaine et pathologie. Université d'Auvergne - Clermont-Ferrand I, 2012. Français. NNT: 2012CLF1MM20 . tel-01166379

HAL Id: tel-01166379

<https://theses.hal.science/tel-01166379>

Submitted on 22 Jun 2015

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

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

N° d'ordre 3785

CLERMONT UNIVERSITÉ, UNIVERSITÉ D'Auvergne

**ÉCOLE DOCTORALE SPI
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR**

T H È S E

présentée pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

Spécialité : Informatique

Par **Anastasiya Shtiliyanova**
Master Informatique

Accueil : Laboratoire ISIT UMR 6284 UdA-CNRS

Titre de la thèse :

**MODÉLISATION ET SIMULATION INFORMATIQUE DE
L'INNOVATION EN MÉDECINE - CONCEPTION D'UN
OUTIL D'AIDE À L'ÉVALUATION MÉDICO-ÉCONOMIQUE
POUR LES CENTRES DE RADIOTHÉRAPIE.**

Soutenue le 26.11.2012

Composition du jury :

Président :

Professeur Jean-Yves Boire

Rapporteurs :

Professeur Pascal Staccini

Professeur David Hill

Directeurs :

Professeur Fabien Feschet

Professeur Pascal Pommier

Résumé :

La thèse porte sur la conception d'un prototype logiciel ayant pour but l'évaluation de l'offre et de la demande pour les centres utilisant des traitements innovants en radiothérapie (hadronthérapie, tomothérapie, stéréotaxie, Cyberknife ...). Le domaine applicatif visé est le domaine médical. L'étude menée porte également sur la modélisation du comportement du patient face à ces nouvelles technologies, sur leur mise en place et leur utilisation au sein des établissements de santé. Dans notre étude, nous modélisons des facteurs très importants tels que la qualité de vie du patient et sa prise en charge au niveau hospitalier. Nous nous intéressons au coût d'installation et d'entretien des nouvelles technologies. Nous comparons les nouvelles techniques utilisées en radiothérapie avec celles déjà existantes et bien évaluées. La comparaison est effectuée sur plusieurs critères, comprenant les critères médicaux et les critères financiers, dont le remboursement par la sécurité sociale en France. L'outil logiciel correspondant est construit en utilisant des techniques de modélisation multi-agents, en intégrant les techniques et le savoir-faire médicaux, ainsi que des modèles épidémiologiques pour caractériser les patients concernés et les thérapies correspondantes dans les centres de radiothérapie. Des méthodes économiques sont implémentées pour évaluer les coûts correspondants.

Mots clés :

modélisation multi-agents, simulation, ordonnancement, radiothérapie, évaluation économique

Abstract :

The main subject of the thesis is the modelling and the implementation of a software prototype for evaluating the supply and the demand for radiotherapy centers using innovative therapies (such as hadrontherapy, tomotherapy, stereotaxy, Cyberknife, ...). The prototype should be used in the medical domain. The patient behaviour with respect to those new technologies is studied as well as their utilization in health institutions. The study takes into account important factors such as the quality of life of the patient and its treatment in a hospital. The costs of installation and maintainance are included in the tool. The new innovative radiotherapy techniques are compared with the existing ones. The comparison is based on medical and financial criteria, including refunding by the French public health insurance system. The software is based on multi-agent systems, and integrates medical knowledge as well as epidemiologic models for characterizing patients and relevant radio-therapies. Economical methods are also implemented for evaluating the associated costs.

Keywords :

multi-agent system, simulation, scheduling, radiotherapy, economic evaluation

Remerciements

Je voudrais commencer par quelques lignes qui, pour moi, caractérisent les années passées en thèse. De mon point de vue, une thèse est une aventure scientifique, mais encore une expérience humaine, et une épreuve des capacités personnelles. Une thèse est bien plus qu'une expérience dans un laboratoire, qu'il soit caractérisé par des manipulations ou par des simulations d'un monde virtuellement construit. Une thèse est un apprentissage sur soi, sur son entourage et le monde.

Je voudrais maintenant remercier les personnes qui ont été présentes durant cette aventure et qui m'ont aidée.

En premier je remercie mes directeurs de thèse Mr Fabien Feschet et Mr Pascal Pommier pour les conseils durant ces années de thèse. Ils ont été présents et m'ont expliqué ce qu'est la recherche. Ils m'ont également beaucoup soutenue lors de mes propositions et m'ont accordé une grande liberté. Je voudrais remercier Mr. Feschet pour son implication dans ce projet, pour la grande confiance qu'il m'a accordée. Je voudrais remercier M.Pommier pour sa patience lors des nombreuses réunions et son implication pour me faire comprendre le fonctionnement et les spécificités du monde médical. Enfin, je voudrais leur adresser mes vœux de réussites pour leur projets futurs.

Je voudrais exprimer également mes remerciements à toute l'équipe de radiothérapie du centre Léon-Bérard dans laquelle travaille Mr Pascal Pommier. Lors de mes visites ils ont été toujours très accueillants et ils m'ont permis de découvrir ce côté chaleureux qui compte pour les patients lors des soins. Je ne voudrais pas oublier le centre ETOILE de Lyon qui était en train de se construire lorsque j'ai commencé ma thèse et qui m'a accueilli pour présenter ce travail de recherche.

Je voudrais remercier Mr David Hill et Mr Pascal Staccini qui ont chaleureusement accepté de faire partie du jury. Un grand merci pour leur réponse rapide et le temps qu'ils ont pris pour le consacrer à mes travaux.

Je voudrais remercier Mr Jean-Yves Boire, qui a chaleureusement accepté de présider le jury de la thèse, ainsi que pour ses conseils durant les années passées au sein du laboratoire ISIT.

Je voudrais remercier l'équipe de Mr Tchernev, qui m'a beaucoup aidée durant la dernière année. Ils ont répondu présent pour travailler sur ce projet et notre collaboration m'a aidée à sur les aspects concernant la recherche opérationnelle. J'adresseDes tout spécialement mes remerciements à Sylverin Tchompté et Nikolay Tchernev.

Mes remerciements vont également pour toute l'équipe de mon laboratoire ISIT de l'Université d'Auvergne : Florian Dubuisson, Benoît Compte, Amir Avari, Abed Malti, Pablo Fernandez, Jean-Marie Favreau, Emilie Perry, Marc Chevaldonné, Carine Simon, Laurent Provot, Laurent Sarry, Adrien Bartolli, Jean-Yves Boire, Lemlih Ouchchane, Sylvie Roux et si j'ai oublié de mentionner quelqu'un sachez que ce

n'est pas volontaire et que je ne vous oublie pas. Vous avez été là, au quotidien, lors des pauses cafés et des entraînements sportifs, votre présence a compté énormément pour moi.

Un grand merci, accompagné d'une pensée émue pour ma famille. Elle a toujours été présente pour moi. Je sais que même loin de moi, leurs cœurs étaient en train de battre avec le mien, et qu'ils n'ont pas oublié un seul instant que je suis aussi avec eux en pensée. Merci à ma mère pour son soutien de tous les instants et merci à mon père pour ses précieux conseils. Merci à ma soeur d'avoir été là. Merci à mes grand-parents d'avoir cru en cette aventure. Merci à tous les membres de ma famille qui m'ont toujours apporté de la sérénité et de la confiance, du bonheur et de la joie. Un mot également pour quelqu'un qui se reconnaîtra en lisant ces dernières lignes. Merci pour ton soutien et pour ta présence à mes côtés. Merci pour la sérénité que tu m'apportes.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Pourquoi modéliser	7
2.1	La modélisation en Informatique	7
2.2	Qu'est-ce qu'un modèle? Les différents types de modèles	8
2.3	La simulation	11
2.4	Les différents types d'agents et les systèmes multi-agents	13
2.4.1	Différence entre agent et objet	15
2.5	La simulation par agents et leur organisation	16
2.5.1	Comment expliquer les organisation et les types d'organisations	17
2.5.2	Organisations individuelles	23
2.5.3	Conclusion	29
2.6	La modélisation et les agents	29
2.6.1	La modélisation des agents et de leurs actions	29
2.6.2	Modéliser un SMA communicant et son environnement	32
2.7	Les agents dans la modélisation	34
2.7.1	Les états des agents et leurs intentions	34
2.7.2	La communication entre les agents	38
2.7.3	La collaboration	41
2.7.4	La coordination	50
2.7.4.1	Le problème de la coordination	51
2.7.4.2	Les différentes formes de la coordination	53
2.8	Conclusion	55
3	Introduction à la problématique globale	57
3.1	Se situer dans le contexte de l'étude	57
3.2	Les problèmes à résoudre	59
3.3	Les solutions apportées	61
4	Modélisation Prototype : Modèle de recrutement	65
4.1	Ontologie	66
4.1.1	Qu'est-ce qu'une ontologie et son utilité	66
4.2	L'ontologie de ce projet	68
4.3	Le niveau de détail nécessaire	70
4.3.1	Les détails de l'ontologie médicale	71
4.3.2	Les détails de l'ontologie économique	75
4.3.3	Les détails de l'ontologie médico-économique	76
4.4	Agents du prototype et Modèle de recrutement	78
4.4.1	Introduction sur la méthode de modélisation	78
4.4.2	L'analyse spatio-temporelle du prototype	79

4.4.3	L'agent du modèle de recrutement	81
4.4.3.1	Le générateur de patients	83
4.4.3.2	Le gestionnaire des patients par groupes	84
4.4.4	Le patient et son agent dans le modèle de recrutement	86
4.4.4.1	Représentation de l'indication et du protocole	86
4.4.4.2	L'ordonnancement des traitements	87
4.4.4.3	La loi pour l'urgence du traitement	88
4.4.4.4	Les <i>concurrents</i> du patient	90
4.4.4.5	Recherche d'un traitement	91
4.4.5	Le centre et son agent dans le modèle de recrutement	98
4.4.5.1	La position géographique du centre	99
4.4.5.2	Modélisation de la spécialité du centre	100
4.4.5.3	L'agent de la politique médicale	101
4.4.5.4	L'agent de la liste d'attente	106
4.4.5.5	L'agent de planification	110
4.4.6	Les interactions des agents du modèle de recrutement	113
4.4.6.1	L'utilité d'un méta-modèle et le rôle de l'environnement	114
4.4.6.2	Description du processus de simulation	116
4.4.7	Conclusion	120
5	Modèle de Planification et Modélisation Économique	123
5.1	La planification	124
5.2	Les problèmes nécessitant l'optimisation des ressources utilisées	126
5.3	Modélisation du modèle de planification	131
5.3.1	Modélisation mathématique	131
5.3.1.1	Premier modèle	134
5.3.1.2	Proposition d'un deuxième modèle	136
5.3.1.3	Troisième modèle	139
5.4	Modèle économique	142
5.4.1	La méthode ABC et son interprétation	142
5.4.2	Les éléments essentiels de la modélisation	145
5.4.3	Modélisation Mathématique du coût du protocole	150
5.5	Modèle médico-économique	154
5.5.1	Comparaison des stratégies	154
5.5.2	Les éléments retenus pour la modélisation	155
5.5.3	Le modèle mathématique	156
5.6	Conclusion	161
5.6.1	Utilisation du modèle de planification pour le modèle de recrutement	161
5.6.2	Les modèle économiques	161
5.6.3	De l'intérêt d'un modèle de planification pour améliorer les modèles économiques	162

6	Implémentation du Prototype et Résultats	165
6.1	Généralités sur le prototype	165
6.2	Le Modèle de recrutement	168
6.2.1	Implémentation	168
6.2.2	Les diagrammes de classes	168
6.2.2.1	Les patients et les centres	168
6.2.2.2	La spatialisation et le déplacement des patients . . .	171
6.2.3	Les diagrammes de séquences	175
6.2.4	Diagramme d'états/activités du patient	176
6.2.5	Résultats et Tests	178
6.2.6	Résultats généraux de la modélisation	178
6.2.7	Tests	180
6.3	Le Modèle de planification	188
6.3.1	Implémentation	188
6.3.2	Résultats	191
6.4	Les Modèles Économiques	193
6.4.1	Implémentation du Modèle Économique	193
6.4.2	Implémentation du Modèle Médico-économique	196
6.4.3	Résultats	197
6.5	L'interface Utilisateur	199
6.6	Conclusion	204
7	Conclusion et Perspectives	207
	Bibliographie	211
	Index	223
8	Annexe 1 : Schémas de définition des documents XML	225
8.1	Exemples de schémas de définition des données médicales pour le modèle de recrutement	225
8.1.1	Exemple de fichier XSD Géographie	225
8.1.2	Exemple de fichier XSD Indication	225
8.1.3	Exemple de fichier XSD Données Épidémiologiques	226
8.1.4	Exemple de fichier XSD Données d'Attractivité	227
8.2	Exemples de schémas de définition de données économiques	227
8.2.1	Exemple de fichier XSD Protocol	227
8.2.2	Exemple de fichier XSD Centre	229
8.3	Exemples de schémas de définitions des données médico-économiques	230
8.3.1	Exemple de fichier XSD Protocol	230
8.3.2	Exemple de fichier XSD Therapie	231
9	Annexe 2 Exemple de fichier xml	235
9.1	Fichier XML pour le modèle de recrutement	235

10 Annexe 3 : Algorithmes de planification

245

Table des figures

2.1	Exemple de simulation pour les proies et prédateurs. On observe le comportement des deux espèces et leurs évolutions, au cours de la simulation.	9
2.2	Exemple de simulation en chimie. On reproduit l'interaction entre les atomes pour affirmer/réfuter des hypothèses.	9
2.3	Objet qui est chargé de répondre à une requête pour base de données	16
2.4	Agent qui perçoit le monde extérieur et a des objectifs et des contraintes à satisfaire. Il doit, en fonction de ses besoins, d'effectuer la meilleure requête.	16
2.5	Structure hiérarchique, organisationnelle et sociale. Différents niveaux d'organisation dans le système peuvent être identifiés. Ils sont tous composés d'agents qui sont reliés. Les agents collaborent entre eux par le biais des liens existant et ceci pour chaque niveau.	18
2.6	Exemple de subsumption entre les agents. Un des agents possède la priorité pour le passage des messages.	25
2.7	Réseaux de neurones et différentes couches le constituant. La première couche est celle des entrées, ensuite la couche intermédiaire et enfin la couche qui définit les sorties.	27
2.8	Entrées et sorties d'un agent d'un système. Un autre agent a besoin des résultats produits par le premier agent, mais il faut les mettre sous la bonne forme pour qu'il soit capable de les lire.	33
2.9	Envoi d'un message codé d'un agent à un autre. Le destinataire seul peut voir le message.	40
2.10	Arbre résumant les principaux types d'allocation des tâches dans les systèmes multi-agents	42
2.11	Organisation d'un système multi-agents utilisant un médiateur. Le premier agent est occupé, ce qui laisse le médiateur à choisir un agent parmi les deux autres, qui sont tous deux capable d'effectuer la tâche D	43
2.12	Graphe d'adjacence pour les tâches T_1, T_2 et T_3 désignées à être faites par les agents A, B ou C	44
2.13	Processus par appel d'offre. Étape 1. diffusion de l'offre. Étape 2. récupération des réponses. Étape 3 évaluation des réponses. Étape 4 décision. L'agent A est l'administrateur et T_1 la tâche à effectuer par les agents B, C et D	47
2.14	Décomposition d'une tâche D en sous tâches T_1, T_2 et T_3 . L'agent X contacte ses sous-contractants X_1, \dots, X_n	49
2.15	Relations entre les actions	51

4.1	Division de la connaissance commune en trois sous-parties principales : La connaissance médicale, la connaissance économique et la connaissance médico-économique.	69
4.2	Représentation de la connaissance médicale, concernant le patient et le centre traitant, ainsi que leur localisation géographique et attractivité.	69
4.3	Représentation schématique de la connaissance économique nécessaire pour la modélisation des processus implémentant le calcul de prix par traitement pour un centre hospitalier.	70
4.4	Représentation schématique de la connaissance médico-économique représentant le vocabulaire nécessaire pour la comparaison de différentes stratégies thérapeutiques.	70
4.5	Exemple de géographie et sa décomposition.	72
4.6	Exemple de géographie et les incidences des indications présentes dans ces éléments.	72
4.7	Schéma de la relation entre la géographie et les indication. Le lien est donné par les données épidémiologiques, représentées par une loi de Poisson/Gauss.	73
4.8	Relation entre l'indication et le protocole. Nous utilisation la connaissance médicale et principalement le bénéfice médical attendu.	74
4.9	Schéma de la relation entre la géographie et les centres.	74
4.10	Ontologie Économique, description du centre.	75
4.11	Ontologie Économique, description d'un protocole.	76
4.12	Ontologie Médico-économique, description d'un protocole.	77
4.13	Ontologie Médico-économique, description d'une thérapie.	78
4.14	Schéma général de l'utilisation des trois modèles. Les patients sont générés et partent à la recherche de traitements dans des centres convenables. Ils sont ensuite planifiés pour ces traitement lorsque les conditions nécessaires et suffisantes sont remplies. Les modèles économiques peuvent être utilisés ensuite.	82
4.15	Les incidences d'une indication, pour chaque pas de temps, peuvent être différentes en fonction des données.	83
4.16	Chaque patient se présente aux centres susceptibles de prendre en charge un ou plusieurs de ses traitements équivalents. Ensuite, les patients de toutes les indications, et venant de toutes les régions, sont mélangés pour former des groupes de patients, pour les centres de soin.	85
4.17	Exemple de groupes de patients devant les centres. Le patient α peut être soigné dans plusieurs centres, le patient β dans un seul.	85
4.18	Représentation succincte du patient. Cette représentation peut être complétée par des caractéristiques supplémentaires.	86
4.19	Utilisation du protocole pour la description du patient. Partie spécifique du protocole d'un patient. Les spécificités, si elles existent, sont créées uniquement selon les besoins dans la description du patient.	87

4.20	Groupes de priorité et ordre de changement des groupes de priorité. Pour chaque groupe de priorité le patient dispose de centres hospitaliers susceptibles de le prendre en charge. Il peut exister des groupes de priorité sans centres hospitaliers disponibles. Les groupes de priorité sont en nombre limité par l'indication du patient et les protocoles associés.	87
4.21	L'agent du patient, caractérisée par la Date de Début de Traitement.	89
4.22	Loi du comportement du patient en fonction de temps avant sa date de début de traitement. L'exemple est basé sur 51 pas de temps selon l'axe x et six groupes de priorité sur l'axe y . Sur l'axe z on trouve la probabilité de choix de groupe de priorité.	90
4.23	L'agent du patient doit ordonner les centres pour pouvoir chercher un traitement.	91
4.24	L'agent du patient doit ordonner les centres pour chercher un traitement.	92
4.25	Ordonnancement des centres en fonction de la distance par rapport au domicile du patient et du groupe de priorité.	93
4.26	Le patient rajoute l'ordonnancement des centres dans son processus de recherche.	93
4.27	L'agent du patient demande un traitement aux centres ordonnés. . .	94
4.28	L'agent du patient évalue les offres reçues.	94
4.29	L'agent du patient évalue les offres reçues par rapport aux dates proposées. Les dates sont ordonnées en fonction de la date courante. a, b, c sont des décalages dans le temps par rapport à la date courante, désignant trois réponses positives.	95
4.30	Évaluation de l'état du patient lorsqu'il se trouve dans une liste d'attente. Étape 1 : nouveaux arrivants. Étape 2 : futur classement. Étape 3 : évaluation par le patient.	97
4.31	Centres et couronnes, situation de concurrence des centres.	100
4.32	L'ontologie du centre de radiothérapie permet de décrire les différentes situations de thérapie en fonction des machines et des traitements correspondants.	101
4.33	Modélisation et implémentation de la partie spécifique des centres de radiothérapie.	101
4.34	Le rôle de la politique médicale dans un centre.	105
4.35	La politique médicale dans un centre et sa conséquence directe, la liste d'attente.	107
4.36	L'agent de la liste d'attente, (1) - arrivée des nouveaux patients, (2) évaluation, départ et réordonnancement de la nouvelles liste d'attente.	108
4.37	Discussions entre les agents de la liste d'attente, du centre, et de l'environnement du prototype.	109
4.38	Évaluation de l'état d'un patient dans la liste d'attente, dirigée par l'agent du centre.	109
4.39	Les actions du centres et le modèle de planification.	112

4.40	Les processus dans le modèle de recrutement. Initialisation et spatialisation des patients et des centres. Création des liens entre les agents. Processus de recherche.	113
4.41	Méta-modèle construit avec un schéma UML. L'environnement est en relation avec les agents. Il peut gérer leurs perceptions et leurs interactions.	115
4.42	Le modèle de recrutement est initialisé en fonction des spécificités des centres.	116
4.43	Répartition des patients en groupes dès lors genèse.	118
5.1	Modélisation des coûts suivant la méthode ABC. Les activités consomment des biens. On attribue des coûts directs/indirects aux activités/biens.	144
5.2	Le modèle d'une stratégie thérapeutique.	158
6.1	Diagramme de classe pour l'implémentation des structures gérant les fichiers d'entrée/sortie XML.	167
6.2	Diagramme de classe pour le modèle concernant une ontologie spécifique.	167
6.3	Diagramme de classe d'un Modèle d'une thérapie quelconque (centre, salle de traitement ou protocole), et trois instances d'un exemple. . .	169
6.4	Structure de données d'une classe typique du prototype.	169
6.5	Diagramme de classe du Centre	170
6.6	Diagramme de classe du protocole avec une caractéristique de thérapie. Diagramme de classe de l'objet référençant tous les protocoles. .	171
6.7	Diagramme de classe d'une indication.	171
6.8	Diagramme de classe d'un patient.	171
6.9	Diagramme de classe de la structure de la géographie.	172
6.10	Diagramme de classe de la structure d'une incidence.	172
6.11	Diagramme de classe de la structure d'un groupe de priorité	173
6.12	Diagramme de classe de la structure des couronnes d'un centre . . .	174
6.13	Diagramme de classe pour l'ordonnancement des centres par rapport aux zones géographiques.	174
6.14	Diagramme de classe de la structure de l'attractivité.	174
6.15	Diagramme de séquences Générateur des patients, Gestionnaire par groupes des patients vs un groupe quelconque de patients.	176
6.16	Diagramme de séquences du dialogue Patient vs Centre	176
6.17	Diagramme de séquences du dialogue Patient vs Centre avec la politique médicale et l'agent de planification.	177
6.18	Diagramme de transitions du patient.	177
6.19	Diagramme de classe de l'objet gérant la simulation pour chacun des modèles.	178
6.20	Diagramme de classe de la structure gérant toutes les données d'un modèle quelconque.	179

6.21	Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre C (CPO), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 3 jours, pour une répartition du traitement sur 20 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l'urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.	184
6.22	Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre C (CPO), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 7 jours, pour une répartition du traitement sur 40 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l'urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.	185
6.23	Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre E (ETOILE), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 3 jours, pour une répartition du traitement sur 20 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l'urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.	186
6.24	Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre E (ETOILE), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 7 jours, pour une répartition du traitement sur 40 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l'urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.	186
6.25	Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre N (NICE), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 3 jours, pour une répartition du traitement sur 20 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l'urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.	187
6.26	Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre N (NICE), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 7 jours, pour une répartition du traitement sur 40 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l'urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.	187
6.27	Modélisation de la répartition des séances du traitement d'un patient et suivant les contraintes médicales.	189

6.28	Structure d'une date pour le planning des centres de traitement.	189
6.29	Diagramme de classe pour la politique médicale et structure commune d'un planning.	189
6.30	Diagramme de classe de la structure d'un planning.	189
6.31	Diagramme de séquences entre l'agent de la politique médicale et l'agent de planification.	190
6.32	Diagramme de Gantt pour le placement des séances des patients.	193
6.33	Diagramme de classe de la clé de répartition et d'un item du modèle de coût.	194
6.34	Diagramme de classe pour le centre et l'objet contenant tous les centres. Modèle de coût.	194
6.35	Diagramme de classes pour la construction du protocole et le modèle de coût.	195
6.36	Diagramme de classe d'une thérapie.	196
6.37	Diagramme de classes de la description de la phase post-thérapeutique.	197
6.38	Diagramme de classe de la structure gérant toutes les données d'un modèle quelconque.	199
6.39	Diagramme de classe de l'objet gérant la simulation pour chacun des modèles.	199
6.40	Fonctionnement général d'un Modèle Vue Contrôleur	200
6.41	Interface graphique donnant accès aux données du modèle de recrutement.	201
6.42	Interface graphique pour la description du centre pour le modèle de recrutement.	201
6.43	Interface graphique pour la description des phases de préparation et d'irradiation du modèle de coût, partie interface graphique.	202
6.44	Interface graphique pour la description d'un centre pour le modèle de coût.	203
6.45	Interface graphique de description des protocoles pour le modèle médico-économique.	203
6.46	Interface graphique de description d'une stratégie pour le modèle médico-économique.	204
6.47	Description d'une Stratégie, phase post-thérapeutique, interface graphique, modèle médico-économique.	204

Liste des tableaux

2.1	Grille d'analyse d'une organisation purement communicante. O symbolise une présence systémique, X une présence optionnelle, – est désigne une absence totale.	20
2.2	Grille d'analyse d'une organisation humaine. O symbolise une présence systémique, X une présence optionnelle, – est désigne une absence totale.	20
5.1	Exemple d'hierarchie pour le temps réservé des groupes de priorités.	133
5.2	Clés de répartition par protocole pour le personnel et les équipements.	146
5.3	Exemple de description d'une des étapes de la phase post-thérapeutique. Exemple de description de suivi.	159
5.4	Exemple de la règle des probabilités pour les complications de la phase post-thérapeutique. Dans cette table, P_i est la probabilité d'apparition obtenue par la formule pour la période courante	160
6.1	181
6.2	182
6.3	183
6.4	Indications associées aux patients	191
6.5	Protocoles associés aux indications.	191
6.6	Durée des séances des protocoles.	192
6.7	Résultat des tests du modèle de planification.	192

Liste des Algorithmes

.1	Mise à jour de la capacité restante pour les groupe de priorité correspondant à un jour pour une salle dans l'année de simulation	246
.2	Appel Tant Que à inclure dans l'Algorithme 1	247
.3	Mise à jour de la capacité restante pour les groupe de priorité correspondant à un jour pour une salle dans l'année de simulation	248
.4	Appel Tant Que à inclure dans l'Algorithme 3	249
.5	Contrainte d'espacement des séances	249
.6	Contrainte des jours fériés	250
.7	Contrainte des jours fériés, forme GLPK	251

Introduction

L'étude menée durant cette thèse concerne l'utilisation des techniques innovantes en radiothérapie. Nous pouvons aborder cette question de plusieurs manières différentes. Les plus importantes d'entre elles sont probablement de trouver une façon de diffuser ces nouvelles techniques, de les faire connaître auprès des patients, et ensuite de déterminer la façon de les évaluer. Cette dernière question est importante, d'autant plus que l'utilisation de ces techniques nécessite l'emploi, l'installation, l'achat et la formation de personnel pour des machines lourdes et encore peu connues.

Pour essayer de répondre à cette question de l'évaluation et de la diffusion des techniques innovantes, nous avons dû tout d'abord trouver un moyen d'exprimer les difficultés auxquelles les décideurs des centres de radiothérapie sont confrontés, lors de la mise en place de ces dernières. Un facteur important est de savoir combien de patients seront prêts à accepter un soins innovant, peu connu dans la plupart des situations. Pour essayer d'avoir une réponse et d'évaluer cette situation nous devons également nous situer du côté du patient, et essayer de comprendre les facteurs qui l'influencent durant sa prise de décision. Nous décrivons ci-dessous la démarche de la plupart des patients, et celle des décideurs des centres de radiothérapie.

Plaçons nous tout d'abord du côté des patients. Les patients atteints d'une maladie cancéreuse grave sont souvent soignés par différentes technologies, qu'elles soient connues ou innovantes. Les techniques innovantes sont simplement proposées, mais jamais imposées au patient qui reste libre de son choix. Ainsi, le patient se retrouve dans une situation parfois ambiguë, devant choisir entre deux propositions. Étant donnée cette situation nous devons prendre en compte l'aide non négligeable du médecin traitant. En effet, le médecin traitant est celui qui guide le patient dans la démarche de choisir une technique de soin et éventuellement l'assiste avant le premier contact avec un radiothérapeute spécialiste. Dans la plupart des cas, le patient est assisté pour choisir le traitement qui lui convient le mieux, mais il doit également choisir une technique parmi toutes celles qui existent. En général, il est guidé en fonction du gain thérapeutique qu'un traitement est susceptible de lui apporter. Le gain thérapeutique pour les traitements innovants est prometteur et élevé, mais peu connu et peu testé. Pour autant, le patient doit choisir entre anciennes et nouvelles techniques et parfois il est obligé de choisir parmi plusieurs techniques nouvelles existantes pour son traitement. Il suit ensuite la démarche de trouver un centre de radiothérapie selon les équipements des centres, le degré d'urgence de la maladie, ainsi que ses préférences personnelles. Le patient concerné doit choisir un établissement parmi ceux qui existent, le choix est donc restreint

par la rapidité de la réponse des établissements qui doit coïncider avec l'urgence du traitement. La distance géographique est également un facteur non négligeable, si le patient doit se déplacer loin de son domicile pour avoir accès à une thérapeutique innovante. Cette envie du patient de partir plus ou moins loin de son domicile est souvent pondérée par les réseaux de transport entre son point de départ et son point d'arrivée. Lors de la décision du patient, il arrive parfois qu'à cause d'une distance jugée trop importante par le patient, ce dernier refuse un traitement. Il s'ensuit que la situation, compliquée pour le patient, est difficile à exprimer sous la forme d'un processus unique de prise de décision. De plus, d'autres facteurs tels que l'état psychologique du patient lors de la prise de décision ou encore l'évaluation de son milieu familial et socio-professionnel peuvent potentiellement influencer son comportement. Il est également connu que les individus peuvent réagir différemment en fonction de l'urgence de la maladie, et les réactions sont différentes en fonction de l'entourage ou de la possibilité de leur proposer de se joindre à un groupe de patients similaires. Ce comportement complexe du patient devra être modélisé, sans toutefois surestimer les capacités de l'informatique aujourd'hui à exprimer par la modélisation le comportement des individus et de l'environnement qui les entoure. Une solution simple consiste à commencer avec peu d'hypothèses, et à construire une base de comportements basée sur des lois probabilistes.

Passons aux difficultés des décideurs des centres de radiothérapie proposant des radiothérapies innovantes. Ces techniques exigent des installations très lourdes. Il est donc légitime de s'interroger sur la faisabilité financière du projet (coût d'achat et aussi de maintenance) mais surtout sur son utilité, que cela soit dans le cadre de l'ajout d'équipements à un service existant, voire la création pure et simple d'un nouveau service. Cette démarche implique la réorganisation de certains services, voire la création de nouveaux. Dans le cas d'un hôpital nouvellement créé, la question de sa légitimité se pose car, sans patients, ce dernier n'aura pas de crédibilité par rapport à ses concurrents qui, eux ont déjà une clientèle établie. Dans l'étude qui nous concerne, nous devons apporter des propositions sur la décision d'implanter de nouvelles thérapies innovantes dans des établissements hospitaliers désirant les utiliser. Ainsi, nous essayons d'exprimer les difficultés de ces établissements et nous essayons de trouver les facteurs importants à retenir pouvant influencer l'inclusion ou l'exclusion de ces nouvelles techniques dans l'établissement. Il est donc primordial pour les établissements voulant entreprendre cette démarche d'avoir une estimation sur le nombre de patients à prendre en charge avec ces techniques innovantes. Ce nombre de patients peut varier en fonction des soins proposés et de l'*attractivité* du centre à l'égard des patients. Le centre doit construire une proposition pertinente, tant sur la qualité des équipements innovants proposés que sur la rapidité de la prise en charge. Cela signifie que les souhaits des patients au niveau de la prise en charge doivent être respectés, la distance par rapport à son domicile doit lui convenir et surtout la qualité des techniques des soins doit être assurée. Pour exprimer cette volonté d'intégrer les traitements innovants, les centres de radiothérapie disposent d'un mécanisme appelé politique médicale. Ce dernier exprime dans quelle mesure le centre souhaite s'engager dans l'implication des nouvelles thérapies

et quelles sont celles qui lui semblent les plus pertinentes en fonction de la démarche médicale envisagée. Une solution souvent utilisée est également la création d'une liste d'attente pour les patients que les centres ne peuvent accueillir immédiatement, mais qui souhaite bénéficier de thérapies innovantes dispensées par l'établissement. Cela permet une gestion plus souple des patients au niveau de la planification de leurs traitements.

La prise en charge d'un patient est difficile à appréhender et à mettre en place. Pour les centres de radiothérapie, il n'existe pas actuellement de meilleure solution de prise en charge. Il existe des solutions d'ordonnancement de traitements, mais le problème reste difficile à résoudre. Nous ne devons pas non plus oublier la position géographique du centre, qui peut être un paramètre jouant sur la prise de décision du patient.

Au vu de tous les facteurs importants à prendre en compte, nous proposons la modélisation et l'implémentation d'un prototype logiciel pouvant donner des indications sur ces situations qui se révèlent complexes. Il nous semble important, pour toutes ces raisons difficiles à évaluer dans des cas réels, de proposer une méthode passant par la simulation et l'emploi de systèmes multi-agents. En effet, la simulation permet l'évaluation d'hypothèses difficiles à mettre en oeuvre dans des situations réelles. Les caractéristiques des patients et des centres sont facilement descriptibles et modélisables par les méthodes des systèmes multi-agents. La connaissance dans ce domaine permet de décrire les différents comportements possibles pour les patients, et les centres, en les supposant comme des entités indépendantes les unes des autres mais en discussion permanente. Il semble pertinent d'employer cette méthode pour pouvoir interpréter les résultats et implémenter le comportement des patients et des centres. Ainsi, le manuscrit présente les travaux menés pour la modélisation, la conception et l'implémentation du comportement des patients et des centres. Ces entités tiennent compte de certains des facteurs que l'on a énumérés ci-dessus, nous permettant de construire une base de travail stable et pouvant être complétée progressivement par la suite.

Le prototype que nous proposons est décrit comme un outil informatique servant à effectuer une simulation médico-économique de la situation géographique, médicale et économique d'un centre de radiothérapie utilisant des techniques innovantes pour le traitement du cancer. Le positionnement médical d'un centre de radiothérapie dépend de nombreux facteurs, les plus importants étant le choix des traitements proposés et des moyens utilisés. Nous ajouterons à ces facteurs l'emplacement géographique du centre et son aptitude à être largement desservi par les réseaux de transport, notamment routier. La concurrence entre les différents centres de radiothérapie joue un rôle primordial sur la décision à prendre pour l'organisation des priorités de l'hôpital. D'un autre côté la décision médicale est souvent accompagnée d'une décision économique. Cette dernière dépend de l'efficacité de l'organisme hospitalier et de sa capacité à organiser de la meilleure manière possible les soins proposés. En effet, il est important qu'un centre puisse organiser ses services d'une manière optimale en tenant compte des contraintes médicales imposées. L'organisation des soins implique directement un coût optimisé pour ces derniers.

Un moindre coût pour les traitements implique un coût moins important au niveau de l'investissement lors de la démarche. Une organisation optimale peut dépendre non seulement du bon ordonnancement des traitements des patients mais également de la bonne gestion des emplois du temps des personnels, notamment médicaux, et techniques.

Le prototype logiciel que nous proposons pour l'évaluation médico-économique des centres de radiothérapie est composé de quatre modules principaux. Nous modélisons la problématique de l'évaluation en la séparant en quatre modèles également.

- Le premier modèle concerne l'évaluation du nombre théorique de patients susceptibles d'accepter un traitement dans un centre utilisant des techniques innovantes.
- Le deuxième modèle réalise l'optimisation de la planification des traitements des patients en fonction des contraintes médicales.
- Le troisième modèle, basé sur les deux premières, évalue un prix par traitement.
- Enfin, le quatrième concerne l'évaluation des différentes stratégies thérapeutiques entre elles, ceci dans le contexte de la sécurité sociale française.

Ces quatre modèles sont décrits dans le manuscrit en précisant les détails de leur modélisation, leur utilisation et les hypothèses acceptées lors de leur élaboration. Le plan du document à suivre est le suivant :

- **Introduction à la modélisation dans l'informatique (chapitre 2, page 7).**

Dans ce premier chapitre, on introduit les termes de modèle, de modélisation et de simulation. Nous faisons le lien entre les modèles et la modélisation. Nous exposons des définitions et des méthodes connues dans le domaine des systèmes multi-agents. Nous introduisons une brève revue de la littérature des systèmes multi-agents et de la modélisation par agents que nous utilisons par la suite.

- **Introduction à la problématique globale - contexte de l'étude (Chapitre 3, page 57).**

Ce chapitre est consacré au contexte de cette étude. Nous exposons les points clés sur lesquels l'étude a été menée, ainsi que des réponses préliminaires pour comprendre le fonctionnement du prototype élaboré durant la thèse. L'importance du chapitre se situe dans la définition que nous proposons pour l'évaluation médico-économique des centres de radiothérapie.

- **Modélisation du prototype et du modèle de recrutement (Chapitre 4, page 65).**

Le chapitre commence par une présentation de l'ontologie (ensemble de définitions concernant ce domaine) et son utilisation pour notre projet. Nous accordons une grande importance à la définition des termes spécifiques du domaine, utilisés à la fois par différents spécialistes et indispensable,

par la suite, aux futures évolutions de l'outil informatique. Nous exposons l'analyse spatio-temporelle du prototype. Puis, nous décrivons les différents agents du prototype en suivant la terminologie des systèmes multi-agents. Le fonctionnement de chaque agent est expliqué ainsi que la collaboration entre agents du modèle de recrutement. Nous développons ce point fondamental qui est la collaboration entre l'agent décrivant le centre d'accueil et celui décrivant le patient. La complexité du processus est décrite par les relations engendrées entre ces deux agents. Nous présentons et développons dans ce chapitre les facteurs importants influençant le comportement des patients et des centres, exprimés par leurs agents respectifs. Nous donnons des propositions sur la modélisation de la maladie du patient, de la description de son urgence et des préférences des patients par rapports aux différents traitements disponibles. Nous tenons compte du gain thérapeutique des traitements proposées et de la distance géographique entre un patient et un centre. Pour le centre, nous décrivons, formellement les différentes entités le composant, telles que politique médicale et liste d'attente, sans oublier les caractéristiques communes à chaque établissement de radiothérapie, telles que salles de traitement et matériels spécifiques disponibles pour le traitement. Enfin, nous montrons le processus de simulation élaboré pour le modèle de recrutement.

- **Modèle de Planification et Modélisation Économique (Chapitre 5, page 123).**

Ici, nous exposons la problématique reliée à la planification, puis son utilité pour les modèles économiques. Ce chapitre présente une brève description de la modélisation pour la planification et des modèles linéaires lui correspondant. Nous présentons les différents modèles de planification que nous avons testés. Les modèles permettent de proposer une organisation commune du traitement des patients au sein des centres de radiothérapie. Nous proposons des solutions de modélisation et d'implémentation selon deux méthodes : une première intégrée dans le prototype et une seconde en cours d'évolution qui demande l'utilisation d'un logiciel extérieur. Nous exposons également la modélisation des modèles économiques et la méthode de la modélisation.

- **Implémentation du prototype et résultats (Chapitre 6, page 165).**

Le dernier chapitre du manuscrit contient la description de l'implémentation correspondant à la modélisation exposée dans les chapitres précédents. Par conséquent, nous présentons l'implémentation des quatre modèles, sous la forme de quatre modules logiciels, en utilisant des diagrammes de classes et des diagrammes de séquences illustrant la communication entre les agents correspondants. Des tests pour les modèles les plus avancés sont fournis avec les principaux résultats et analyse commentée sur la situation illustrée. En fin de chapitre, on retrouve des captures d'écran représentant l'interface

utilisateur de l'outil informatique.

- **Conclusion et perspectives (7, page 207).**

Le dernier chapitre décrit résumé le travail effectué et expose les perspectives de ce projet. Nous détaillons des possibilités d'étendre l'étude en utilisant d'autres hypothèses et méthodes.

Pourquoi modéliser

Sommaire

2.1	La modélisation en Informatique	7
2.2	Qu'est-ce qu'un modèle? Les différents types de modèles	8
2.3	La simulation	11
2.4	Les différents types d'agents et les systèmes multi-agents	13
2.4.1	Différence entre agent et objet	15
2.5	La simulation par agents et leur organisation	16
2.5.1	Comment expliquer les organisation et les types d'organisations	17
2.5.2	Organisations individuelles	23
2.5.3	Conclusion	29
2.6	La modélisation et les agents	29
2.6.1	La modélisation des agents et de leurs actions	29
2.6.2	Modéliser un SMA communicant et son environnement	32
2.7	Les agents dans la modélisation	34
2.7.1	Les états des agents et leurs intentions	34
2.7.2	La communication entre les agents	38
2.7.3	La collaboration	41
2.7.4	La coordination	50
2.8	Conclusion	55

Ce chapitre présente une introduction à la modélisation informatique et un bref historique. Dans cette partie sont expliquées les définitions théoriques mises en pratique par la suite avec la construction et l'implémentation du prototype. Différents ouvrages traitent de la simulation et sont tous écrits avec le but de comprendre comment la modélisation intervient dans le processus d'implémentation de projets informatiques abstraits, ou des projets traitant la problématique de la vie de tous les jours. La connexion entre la modélisation et l'informatique est au coeur de tous les projets de développement de logiciel moderne.

La simulation est une technique employée dans la modélisation. Les systèmes multi-agents permettent de modéliser la simulation. Ces deux termes proviennent de la philosophie [Ferber 1995].

2.1 La modélisation en Informatique

Depuis le début de l'Informatique la modélisation est une discipline très utilisée. De multiples exemples peuvent être cités, à commencer par la modélisation des pro-

blèmes du quotidien comme l'organisation d'un système hospitalier jusqu'à la modélisation très abstraite de l'humain et de ses actions, en passant par la simulation de ses comportements ou encore la simulation de l'environnement animal et végétal. Un exemple très connu est le modèle de Lotka-Volterra [Volterra 1926, Lotka 1925] qui représente la modélisation et la simulation des proies et prédateurs, deux espèces dépendant l'une de l'autre et qui doivent survivre dans un environnement commun !

Ainsi, grâce à la modélisation, nous pouvons représenter de multiples situations, mais sans oublier que chacune d'elle est strictement reliée à la situation représentée. Il faut souligner qu'une modélisation est toujours très subjective en fonction de l'objet/la situation à représenter et de l'individu qui la juge. Une modélisation est donc différente suivant la personne qui l'a conçue [Durfee 1989, Durfee 1995, Steeb 1988]. En effet, peu important les différentes façons existant de modéliser, l'objectif à atteindre doit être clairement défini et la validation de ce dernier est une étape obligatoire.

Il existe plusieurs façons de modéliser. Nos commençons par donner une définition de ce que l'on appelle une modélisation et puis sa liaison avec l'informatique. En général, la modélisation englobe toute les connaissances que l'on a pour un objet, système ou processus. Pour arriver à obtenir ces connaissances les informaticiens mènent des discussions avec les experts du domaine concerné, jugent de la meilleure présentation de l'information en fonction de l'objectif à atteindre, et représentent l'entité modélisée. En effet, au cœur du processus de modélisation, l'attention revient sur le modèle lui-même, sa construction et son évolution. Le modèle en tant que terme est apparu depuis environs 600 ans [Horé 1983]. Le modèle peut être vu comme un intermédiaire entre le monde à modéliser (souvent le monde réel) et la théorie que l'on voudrait tester ! En effet, chaque modèle est un outil qui sert à mieux représenter une entité pour pouvoir tester différentes hypothèses et les conséquences en découlant. Sur les images page 9, figure 2.1 et 9, figure 2.2 sont données en exemples deux illustrations de simulation pour les proies et les prédateurs avec des graphes pour leurs dynamiques, puis pour la chimie dans le second cas.

2.2 Qu'est-ce qu'un modèle ? Les différents types de modèles

On peut déjà essayer de comprendre ce qu'est un modèle, tout en remarquant que plusieurs personnes et dans plusieurs ouvrages, ont essayé de formaliser cette notion. Prenons comme exemple Marvin Minsky, qui, en 1956 a proposé la définition suivante :

Définition : Modèle

To an observer B, the object A is a model of object A to the extent than B can use A* to answer questions that interest him about A [Minsky 1965]*

Cette définition est très brève, mais reflète idéalement la problématique. On a toujours besoin d'une représentation bien adaptée à nos besoins, et en même temps

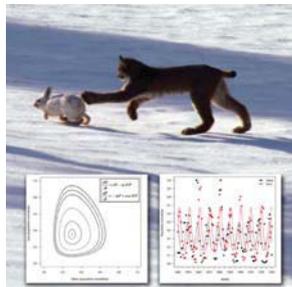


FIGURE 2.1 – Exemple de simulation pour les proies et prédateurs. On observe le comportement des deux espèces et leurs évolutions, au cours de la simulation.

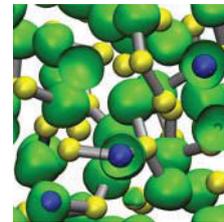


FIGURE 2.2 – Exemple de simulation en chimie. On reproduit l'interaction entre les atomes pour affirmer/réfuter des hypothèses.

fidèle à la réalité, pour pouvoir s'en servir en tant qu'objet sur lequel on pourra effectuer différents types de requêtes. Ceci nous amène au fait qu'un modèle est toujours modélisé suivant les besoins de l'observateur et celui qui l'interroge. Si on change l'angle de vue, la modélisation pourrait prendre une forme tout à fait différente. Ainsi, la définition suivante montre que, si le langage de représentation est différent, la modélisation reste subjective.

Définition : Modèle

Tout modèle est une représentation exprimée dans un langage donné d'un point de vue subjectif et finalisé sur un sujet d'études. [Caplat 2008]

Dans la définition de Caplat le sujet d'études doit être plus ou moins finalisé, avec des objectifs fixés pour que l'on puisse exprimer les contraintes auxquelles le modèle doit répondre.

Pour finir quelques caractéristiques pour les modèles d'après Popper [Popper 1969] :

Définition : Modèle

1. Un modèle doit avoir un caractère de ressemblance avec le système réel ;
2. Un modèle doit constituer une simplification du système réel ;
3. Un modèle est une idéalisation du système réel.

Cette description est très intéressante par ces hypothèses d'approche vers un système réel. Il s'agit de ne pas alourdir le modèle avec toutes les possibilités pouvant exister et que toute personne voudrait voir implémentées. Nous allons utiliser cette propriété, car la simplification de tout modèle dans un premier temps est essentielle. En effet, pour pouvoir valider toute hypothèse, nous devons partir d'un exemple simple, bien établi et facilement prouvable par ses conditions et résultats. Ceci permet à tout modèle de pouvoir évoluer lors de ses futures versions, si toutefois elles existent. Cette simple présentation de la réalité permet de vérifier l'exactitude

du modèle, à partir de sa modélisation et les hypothèses très théoriques jusqu'à son implémentation et tests physiques sur une machine. Pour notre étude ceci est fondamental. Nous simplifions la réalité pour permettre à notre modèle d'être validé. Nous utilisons des hypothèses simplifiées élaborées avec la collaboration des experts médicaux. Ainsi, nous laissons la possibilité d'évolution de ces hypothèses en décrivant ses étendues, tout en vérifiant leurs bases.

Les différents types de modèles sont les modèles continus/discrets, et stochastiques/déterministes. On peut rajouter les modèles statistiques et dynamiques. Ces modèles peuvent être utilisés séparément ou couplés les uns aux autres. Le paragraphe suivant clarifie les termes précédents concernant les modèles.

Dans ce qui suit, un modèle est présenté comme une entité. Chaque modèle évolue au cours du temps, ce qui provoque des changements dans son état. Si les différents états par lesquels l'entité passe sont des états continus (par exemple : remplissage, vidange), on appelle ce modèle un modèle continu. Lorsque les différentes phases sont discrètes (par exemple : différentes dates précisées), le modèle est dit discret. En ce qui nous concerne, nous n'allons présenter ici que des modèles discrets. Le couplage entre le discret et le continu pour la simulation est possible [Praehofer 2000]. Nous pouvons aussi nous permettre de représenter un modèle continu à travers un modèle discret. Il faut dans ce cas tenir compte du phénomène continu en mathématiques, qui n'est pas évident à modéliser dans un environnement discret.

Lorsque les mathématiques sont utilisées pour la modélisation, les modèles sont dits déterministes et aléatoires. Les modèles aléatoires ou encore stochastiques [Ferber 1995, Treuil 2008] sont dotés d'une capacité de changement grâce à l'utilisation de tirages aléatoires. Ceci implique l'utilisation de lois de probabilités. L'utilisation de lois de probabilité offre la possibilité de simuler différentes situations de la vie réelle. Ceci permet de tester ces situations et d'en faire l'analyse.

Pour finir quelques précisions sur les modèles statiques et dynamiques. Le terme système utilisé dans ce manuscrit inclut différentes entités agissant entre elles et qui peuvent évoluer de façon conjointe ou bien séparément. Un modèle est dit statique lorsque les hypothèses le décrivant ne comprennent que des définitions concernant uniquement son état invariant. Lorsque la description du modèle reflète le changement d'état de l'entité, on parle d'un modèle dynamique, qui est le plus souvent relié au temps et aux raisons qui provoquent le changement d'état. Il est généralement admis qu'un système change ses états en fonction du temps et des contraintes qui lui sont imposées, que l'on parle d'un système représentant le vivant ou bien d'expériences physiques ou chimiques. Pourquoi alors se poser la question d'utiliser un système statique dans certains cas ? Tout simplement car il est bien plus facile de donner un avis sur un système lorsqu'il est dans un état fixe. Il est malheureusement pas possible de modéliser les systèmes dynamiques avec un modèle statique, ce qui nous oblige à utiliser les modèles dynamiques.

2.3 La simulation

La simulation est souvent utilisée pour tester différentes situations du quotidien et tester la robustesse des modèles. Cette section est destinée à introduire ce qu'est la simulation et comment on peut l'utiliser pour les besoins de notre étude.

Commençons par donner quelques définitions pour la simulation. La simulation est une technique reliée aux modèles dynamiques. Elle tient compte du temps et des changements d'états de toutes les entités dans un modèle. Dans la simulation, on peut aussi parler de processus. En général, on peut dire qu'un processus est un modèle qui évolue dans le temps. On ne parlera que d'un processus comme une méthode d'analyse utilisant le point de vue de l'informatique. On prendra par exemple une file d'attente qui évolue dans le temps. Elle commence par être initialisée avec certaines propriétés et contraintes d'existence et ensuite elle se remplit. Elle arrivera peut être à un état stable, en passant par des états extrêmes (de trop plein et de vide) et ainsi de suite avec un cycle répétitif ou non en fonction des "contraintes de vie" de la dite liste d'attente.

Toute simulation qui est réalisée sur un ordinateur est dite simulation sur ordinateur.

Définition : Simulation

A computer simulation is any computer-implemented method for exploring the properties of mathematical models where analytic methods are unavailable. [Humphreys 1990]

Cette définition est donnée pour confirmer le besoin de la simulation en tant que technique affirmant son statut. Lorsqu'on veut tester un procédé et que l'on n'a pas des moyens physiques d'accomplir les expériences, il est d'usage de modéliser le problème et de réaliser des simulations pour tester son comportement sous différentes hypothèses. Une autre définition donnée par Hill est la représentation exacte de ce que l'on voudrait utiliser de la technique de la simulation.

Définition : Simulation

La simulation consiste à faire évoluer une abstraction d'un système au cours du temps, afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système et d'appréhender certaines de ces caractéristiques dynamiques dans l'objectif d'évaluer différentes décisions. [Hill 1993, Hill 2010]

La simulation est également utilisée dans les études d'économie comme le disent Anderson et Arrow [Arrow 1988]. La définition donnée ci-dessus désignant principalement l'informatique est confirmée par l'étude de l'économie et l'utilisation de la simulation.

Hartmann donne quelques caractéristiques désignant les fonctions de la simulation [Hartmann 1996] :

- *The simulation as a technique : Investigate the detailed dynamics of a system*
- *Simulations as a heuristic tool : Develop hypotheses, models and theories*
- *Simulations as a substitute for an experiment : Perform numerical experiments*

- *Simulations as a tool for experimentalists : Support experiments*
- *Simulations as a pedagogical tool : Gain understanding of a process.*

La simulation permet donc de suivre les dynamiques d'un modèle, d'un processus ou d'un système. Cette propriété est essentielle. Elle permet également de développer/tester et utiliser par la suite les méthodes, modèles et différentes théories pour lesquelles on a des doutes et pour dont les conséquences sont souvent méconnues. Nous pouvons ainsi modéliser des hypothèses difficilement réalisables à cause d'un coût de mise en oeuvre important ou car des facteurs à risques sont détectés et elles doivent être évaluées le mieux possible au-préalable. Cette possibilité permet de réduire le fossé entre la théorie et la pratique. En même temps, il ne faut pas oublier que la simulation n'est pas une solution exacte et que les résultats produits doivent être étudiés. Une simulation ne reflète pas la situation réelle, elle ne peut que la reproduire aussi fidèlement qu'on lui a donné la possibilité de le faire. Avec la technique de la simulation on peut accomplir des expériences numériques de grande taille. Aujourd'hui, on peut imaginer des calculs basés sur "cloud". Enfin, la simulation nous permet de comprendre et de déduire des résultats, elle est un outils d'apprentissage et de gain de temps et de moyens.

Définition : Simulation

Simuler c'est reproduire pour l'observer, le fonctionnement de phénomènes physiques ou sociaux à l'aide d'un dispositif expérimental analogue. C'est reproduire artificiellement un système pour expérimenter les comportements possibles. L'expérimentation artificielle intervient donc lorsque l'expérience réelle est soit impossible, soit trop coûteuse, soit trop complexe. [Godelier 1966]

Cette dernière définition confirme que la simulation est utilisée dans tous les domaines, sans limites. En effet, une partie de nos travaux sont en lien avec la simulation économique. En économie, la simulation a une grande importance car elle permet d'expérimenter avec différentes hypothèses sans pour autant introduire des conséquences négatives découlant de la vie réelle. De même, la chose la plus difficile à mesurer lorsqu'il s'agit de modélisation est le choix de variables pertinentes et la structure du modèle que l'on décidera d'utiliser dans le futur. En ce sens, l'adéquation entre le modèle réel et le modèle artificiel l'approchant est essentielle. Nous nous devons d'essayer de généraliser les hypothèses pour essayer de prendre en compte les différentes possibilités tout en gardant l'œil sur une base stable et valide. Ces bases reposent sur les connaissances économiques et leur analyse. À partir de ce processus, validé par les experts du domaine, une modélisation de la situation économique à reproduire est possible.

Lorsqu'un modèle économique est traduit et modélisé de façon valide, il peut être implémenté dans un langage de programmation, et devient un modèle économétrique. En effet une démarche basée sur l'économétrie consiste en l'observation, la modélisation et la représentation d'un phénomène avec des équations dans le but de comprendre, expliquer, reproduire et prévoir. Nous allons donc pouvoir dire que les versions simplifiées des modèles économiques présentées dans ce manuscrit se rapprochent de la méthode économétrique.

2.4 Les différents types d'agents et les systèmes multi-agents

La simulation est une technique complexe qui fait intervenir de nombreux processus et des interactions entre eux. Une simulation est toujours reliée à une évolution des modèles intervenant dans le temps. Lorsqu'il s'agit de coordonner plusieurs modèles, il est aussi indispensable de pouvoir les relier. Pour mieux comprendre d'où vient la début de la modélisation et introduire un peu d'histoire, la suite de ce chapitre est concentrée sur ce qu'est l'intelligence artificielle puis présente quelques notions reliées aux Systèmes Multi-Agents (SMA).

L'intelligence artificielle (IA) naît avec les questions "comment imiter un humain" ou "est-ce que l'on est capable de produire une machine capable de raisonner par elle-même?". Les premières expériences ont été menées par Newell, Shaw et Simon [Newell 1957]. Ce manuscrit ne porte pas sur les principes et les idées de l'IA, car la recherche menée dans ce domaine a montré depuis longtemps que certaines des espoirs que les scientifiques avaient sont difficilement réalisables. La partie de l'intelligence artificielle qui va nous intéresser est celle reliée à la capacité d'un individu à accomplir, seul, les tâches qu'on lui a imposées.

On appelle un agent :

Définition : Agent

Une entité physique ou virtuelle :

- capable d'agir dans un environnement ;
- qui peut communiquer directement avec d'autres agents ;
- qui mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs ; individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser) ;
- qui possède des ressources propres ;
- qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement ;
- qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune) ;
- qui possède des compétences et offre des services ;
- qui peut éventuellement se reproduire ;
- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa réception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

[Ferber 1995]

Cette définition est très précise sur les propriétés d'un agent est constitué. Lorsque l'on parle d'une entité on peut imaginer un modèle d'un processus ou d'un mécanisme. Il est donc possible de construire une entité physique ou un modèle implémenté en informatique. Dans la définition classique de l'IA, les agents sont uniquement capable d'agir, tandis que pour les systèmes multi-agents ils peuvent également réfléchir à leurs actions. Ceci est une propriété importante.

La communication des agents est primordiale. En effet, en fonction du système à produire, les agents peuvent communiquer par le biais de messages ou directement.

La communication entre les agents est équivalente à une interaction entre différentes entités d'un système. Par le fait de son autonomie, un agent agit en fonction de ses intentions et du but dont il est doté. Cependant ces dernières caractéristiques sont acquises tout en respectant les contraintes qui l'entourent. Ainsi, en fonction des conditions d'action, les agents ont une réaction différente. Le comportement d'une entité est dicté par ses objectifs et les conditions dans lesquelles elle se trouve. Ceci permet d'introduire ce que l'on appelle système multi-agents.

Définition : Système Multi-Agents ou (SMA)

On appelle SMA un système composé des éléments suivant [Ferber 1995] :

1. Un environnement E , c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
2. Un ensemble d'objets O . Ces objets sont situés, c'est-à-dire que pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position E . Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés et modifiés par les agents.
3. Un ensemble A d'agents, qui ont des objets particuliers ($A \subset O$), lesquels représentent les entités actives du système.
4. Un ensemble de relations R , qui unissent les objets (et donc les agents) entre eux. Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir produire, consommer, transformer et manipuler les objets de O .
5. Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers.

Cette définition est générale. Elle englobe en même temps la description d'agents décrivant des entités de la vie réelle (i.e des espèces animales ou végétales) ou bien des entités d'une structure informatique comme un logiciel par exemple.

Lorsque les entités sont dites situées, cela implique que l'environnement entourant est métrique. Dans ce cas, les agents reconnaissent leur environnement ainsi que les autres agents n'étant pas de leur espèce. Un bon exemple est le modèle proies-prédateurs. Dans ce cas, les agents sont capables d'agir en fonction de leurs intentions et de la perception qu'ils ont autour d'eux. Les actions que les agents peuvent avoir dans ce cas influencent l'état des agents les entourant. Cela veut dire que l'environnement changera en fonction de chaque nouvelle action introduite par une des entités. Il est alors d'usage de mesurer ce que l'on appelle la stabilité du système et la dynamique des espèces vivant dans l'environnement. Un autre exemple de ce type de système est le déplacement des robots dans l'espace. En général, ce que l'on veut dans ces cas, c'est que le robot puisse percevoir des objets, des chemins et ensuite entreprendre des actions en fonction de ce qu'il voit. Ceci change sa perception car avec le mouvement, le robot change sa position, ce qui modifie sa perception de l'environnement.

Dans d'autres cas, l'environnement E peut être vide, $E = \emptyset$. Ceci veut dire que le système d'agents ressemble à un réseau et les relations R sont définies pour relier

les agents. Cette partie des systèmes multi-agents décrit les modules logiciels qui sont construits pour résoudre, évaluer ou élaborer un problème donné. Ces agents font partie de l'intelligence artificielle distribuée, qui stipule que tout problème peut être modélisé à l'aide de plusieurs vues différentes. Ceci implique la participation de différents acteurs, chacun expert dans son domaine. La connaissance globale apportée par tous est le résultat de la modélisation et permet la résolution du problème. Nous pouvons donc tout à fait nous identifier dans la construction du prototype, l'objet de cette étude, comme étant très proche des systèmes multi-agents distribués.

Pour mieux comprendre quels sont les types d'agents que l'on utilise pour ce type de construction, la définition d'un agent purement communicatif est utile.

Définition : Agent communicant ou agent logiciel

Par comparaison avec la définition générale, un agent communicant est une entité informatique qui :

- 1. se trouve dans un système informatique ouvert (ensemble d'applications, de réseaux et de systèmes hétérogènes) ;*
- 2. peut communiquer avec d'autres agents ;*
- 3. est mue par un ensemble d'objectifs propres ;*
- 4. ne dispose que d'une représentation partielle des autres agents ;*
- 5. possède des compétences (services) qu'elle peut offrir aux autres agents ;*
- 6. a un comportement tendant à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose et en fonction des représentations et des communications qu'elle perçoit.*

[Ferber 1995]

Ce type d'agent ne dispose que de la représentation partielle des autres agents, puisqu'il ne se trouve que dans un réseau. La notion d'objectifs est exprimée dans le contexte des constructions logicielles. En effet, les agents de cet environnement réagissent entre eux et utilisent des ressources communes. Le plus souvent ces agents utilisent des messages pour pouvoir communiquer.

2.4.1 Différence entre agent et objet

À cette étape, il est essentiel de pouvoir faire la différence entre les objets et les agents. Un objet et un concept purement informatique qui n'est pas doté d'une capacité de "réflexion". Il est généralement implémenté dans un langage de programmation, hérite éventuellement d'un objet père, implémente éventuellement des propriétés communes à plusieurs objets du même type. Un tel objet/entité reste caractérisé par des actions demande/réponse sans faire le bilan de ce qui peut se trouver dans le même environnement.

Nous pouvons imaginer une base de données et un objet de cette base qui est chargé d'effectuer un type de requêtes particulières (voir figure 2.3, page 16). L'objet pointé ne fait qu'exécuter les requêtes, à la demande, et satisfaire le fonctionnement

de la base de données. Il ne voit pas le monde extérieur, ni les actions des autres agents.

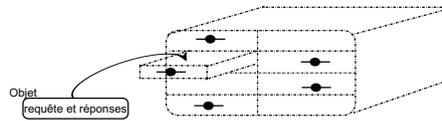


FIGURE 2.3 – Objet qui est chargé de répondre à une requête pour base de données

Le cas de l'agent est un peu différent (figure 2.4). Imaginons qu'un agent a des objectifs et des contraintes suivant lesquelles il doit faire la meilleure requête possible pour satisfaire à ses besoins. L'agent peut avoir une connaissance de l'environnement et des actions des autres agents. Ceci lui permet de pouvoir "prendre des décisions", ce qui le différencie par rapport aux objets. En effet, on peut même dire que l'agent peut contenir des objets qui vont effectuer des tâches pour lui.

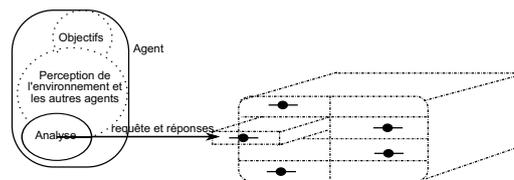


FIGURE 2.4 – Agent qui perçoit le monde extérieur et a des objectifs et des contraintes à satisfaire. Il doit, en fonction de ses besoins, d'effectuer la meilleure requête.

En résumé pour faire la différence entre un agent et un objet, on peut considérer les deux caractéristiques :

- Un objet est créé au niveau de l'implémentation et de l'exécution ;
- Un agent est créé au niveau de la conception.

2.5 La simulation par agents et leur organisation

La simulation par agents est aussi représentée par deux types d'agents supplémentaires : les agents cognitifs et les agents réactifs. Les systèmes d'agents réactifs sont constitués de beaucoup d'agents simples, sans mémoire et avec une vision locale de l'environnement. Les agents cognitifs qui constituent un système sont peu nombreux, ont une mémoire du passé, connaissent leur environnement et peuvent s'organiser pour arriver à satisfaire leur objectif commun. Ainsi, comme les agents peuvent s'organiser entre eux, en transposant cette propriété dans les logiciels, on peut aisément imaginer la hiérarchie apparaissante.

2.5.1 Comment expliquer les organisation et les types d'organisations

Définition : Organisation

Une organisation peut être définie comme un agencement entre composants ou individus qui produit une unité, ou système, dotée de qualités inconnues au niveau des composants ou individus. L'organisation lie de façon interrelationnelle des éléments ou événements ou individus divers qui dès lors deviennent les composants d'un tout. [Morin 1997]

Lorsque les systèmes multi-agents décrivent un environnement naturel (proie et prédateurs par exemple), une hiérarchie existe. Le modèle hiérarchique est valide également pour les logiciels. Les relations entre les agents se forment à travers leurs obligations et l'échange d'information entre eux. Ces organisations des tâches nécessitent parfois la synchronisation des actions et la cohérence des buts de chaque agent participant.

A partir de ce terme d'organisation on peut parler de la structure de cette forme. En effet, la structure peut être très abstraite, et finalisée lors de la modélisation du problème. Ensuite, nous pouvons également penser à l'implémentation de cette structure au niveau informatique. Lorsque l'on passe à l'instanciation des organisations, on doit respecter l'ensemble des règles fixées et les rôles de chaque agent. Ceci, bien sûr, peut être décrit par le biais des ensembles mathématiques représentant les rôles et les liens.

Définition : Structure Organisationnelle

La structure O peut être décrite par l'ensemble des rôles qui peuvent y être tenus (A, B, C) , alors les structures concrètes comprennent un grand nombre d'entités concrètes (A_1, A_2, B_1, \dots) les A_i étant associées au rôle A . Les liens entre les entités concrètes correspondent au liens abstraits qui existent entre les entités abstraites. [Ferber 1995]

L'intérêt de la structure organisationnelle est de pouvoir utiliser les systèmes multi-agents comme un ensemble d'unités pour la réalisation d'un tâche donnée (voir figure 2.5, page 18). Une organisation représente également une hiérarchie avec tous les liens qu'elle comporte. Ainsi, on peut définir un ensemble de classes d'agents avec des rôles attribuées à chaque agent. Chaque rôle étant caractérisé par un nombre de relations abstraites [Ferber 1995].

Pour pouvoir construire correctement un système il est important d'être rigoureux sur les objectifs à atteindre, et d'évaluer quel est l'état des connaissances dont on dispose. Il est néanmoins exigé de pouvoir disposer de toutes les caractéristiques exigées par le système avant de commencer à organiser la structuration. Il vient ensuite le moment de l'analyse pour l'organisation. On peut parler de trois types d'analyse :

- L'analyse fonctionnelle décrit les fonctions de l'organisation du système dans ses différentes dimensions.
L'analyse fonctionnelle permet d'identifier les tâches des composantes principales d'un système. Ainsi, chaque composante principale a un rôle à suivre.

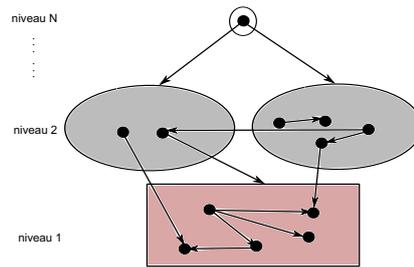


FIGURE 2.5 – Structure hiérarchique, organisationnelle et sociale. Différents niveaux d'organisation dans le système peuvent être identifiés. Ils sont tous composés d'agents qui sont reliés. Les agents collaborent entre eux par le biais des liens existant et ceci pour chaque niveau.

En effet, en fonction des possibilités données à un agent et des contraintes imposées par le système un agent pourra réagir pour accomplir son but. Dans une organisation, il est possible d'identifier les rôles et de les distribuer en fonction des tâches. Il existe plusieurs fonctions comme :

- La fonction représentationnelle correspond au système d'archivage de toutes les données et à la communication entre les différents modules du système ;
- La fonction organisationnelle correspond à la gestion de l'activité des tâches et la coordination des actions ;
- La fonction conative correspond à la sélection des activités à entreprendre pour satisfaire un but, en fonction des états possibles de l'agent. À cette fonction on peut faire correspondre un type d'architecture conative [Uhrmacher 2009, Amblard 2006] ;
- La fonction interactionnelle sert à organiser les interactions dans un système. Elle est très utile lors de la construction d'une interface. Elle se charge de la réception de l'information et ensuite de l'exécution des tâches correspondantes ;
- La fonction productive ou opératoire : elle contient l'ensemble des actions primitives à connaître pour pouvoir résoudre un problème. Ces activités dépendent du domaine applicatif ;
- La fonction conservatrice s'occupe de la conservation de toute la structure et de la préservation des tâches.

Pour ce type d'analyse il est également important de connaître les différents types de dimensions du point de vue des rôles attribués aux agents et leur interaction et/ou coopération. Il existe donc les dimensions suivantes :

1. La dimension physique est la dimension qui représente l'architecture d'un système, son implémentation en allant jusqu'à l'exécutable. Lorsque le concepteur d'un système doit réfléchir sur cette dimension, il répond à la question : "Comment je dois réaliser explicitement le modèle en tenant compte de toute l'organisation déjà construite et validée". Newell appelle ce niveau : le niveau du symbole [Newell 1957] et il le caractérise comme

le niveau de l'implémentation ;

2. La dimension sociale concerne l'organisation du système et la propriété de pouvoir répondre aux exigences imposées ainsi que, le bon fonctionnement du système. À ce niveau, on planifie les tâches, on décrit les buts correspondant aux agents, et on vérifie les contraintes de chacun d'entre eux ;
3. La dimension relationnelle est responsable des interactions entre les agents dans un système et avec d'autres organisations. Ici, le concepteur répond à la question : comment mon organisation interagit-elle ? avec d'autres systèmes (organisations) et à l'intérieur d'elle-même. Il définit les protocoles d'interactions et les échanges. Les entrées/sorties et les conditions que l'on doit prendre compte sont décrites, pour que l'agent puisse effectuer ses tâches. Les méthodes correspondantes à la perception du monde extérieur, sont implémentées. Il s'agit également des différentes couches de communication ;
4. La dimension environnementale répond à la capacité de l'organisation de pouvoir agir à l'environnement et suivre ses buts. Ainsi, les perceptions de chaque agent sont transmises puis analysées pour que l'agent puisse agir en fonction de la situation. On peut prendre l'exemple des animaux, car leurs buts de survie sont clairement définis et les perceptions de l'environnement sont exprimées par différentes propriétés. On peut prendre comme exemple les modèles proies-prédateurs qui définissent des règles précises lors de l'existence de chaque individu qu'il soit proie ou prédateur. Ainsi, on peut dire qu'un prédateur doit tous les 4 jours avoir eu minimum 2 proies et ne mangera pas plus de 5. Cela peut être également une règle de reproduction, par exemple au bout d'un certain âge ;
5. La dimension personnelle ou la dimension du 'self' est l'organisation pour l'agent lui même en fonction de ses capacités à percevoir le monde et les autres agents. L'organisation des actions internes se trouve ici, ainsi que la protection de soi et les ressources nécessaires pour la survie. On retrouve également des fonctions décrivant la possibilité d'auto-évaluation lorsque les conditions le permettent ou le nécessitent. L'agent est donc capable de raisonner à travers cette dimension.

L'analyse fonctionnelle, qui n'est ici décrite que brièvement, est présente dans la plupart des systèmes multi-agents, mais n'est jamais développée complètement. Ceci veut dire qu'en fonction de l'environnement que le système modélise les dimensions et les fonctions le décrivant sont présentes en forme plus ou moins complète. Un tableau pour la correspondance entre les différentes fonctions et dimensions concernant les systèmes purement communicant, est présenté sur la table 2.1. Et à titre de comparaison le même tableau pour une organisation animale.

En ce qui nous concerne, nous nous approchons des systèmes purement communicants. Notre travail est la réunion de plusieurs agents ayant chacun leur

TABLE 2.1 – Grille d’analyse d’une organisation purement communicante. O symbolise une présence systémique, X une présence optionnelle, $-$ est désigne une absence totale.

	Phys.	Social	Relat	Env	Pers
Représentationnelle	O	O	$-$	$-$	O
Organisationnelle	O	X	O	$-$	X
Conatif	O	O	$-$	$-$	$-$
Interactionnel	O	$-$	0	$-$	$-$
Productif	O	X	X	X	$-$
Conservatif	$-$	$-$	$-$	$-$	$-$

TABLE 2.2 – Grille d’analyse d’une organisation humaine. O symbolise une présence systémique, X une présence optionnelle, $-$ est désigne une absence totale.

	Phys.	Social	Relat	Env	Pers
Représentationnelle	O	O	O	O	O
Organisationnelle	O	O	O	O	O
Conatif	O	O	O	O	O
Interactionnel	O	O	O	O	O
Productif	X	X	X	X	X
Conservatif	O	O	O	O	O

but, mais faisant partie d’un prototype logiciel. Il est plus intéressant de se concentrer sur un des modèles qui représente une organisation entre les hôpitaux et les patients et dans laquelle on tient compte des préférences des patients. Lors de la description de ce modèle, on décrit en détails les interactions de ces entités.

- L’analyse structurelle distingue les différentes formes d’organisation possibles et identifie les paramètres structuraux nécessaires. L’analyse, la modélisation et la conception d’un système multi-agents sont des tâches ardues, ne devant pas être prises à la légère. Lorsque l’on applique l’analyse structurelle, pour la construction, le système multi-agents doit répondre aux questions suivantes :
 - Que doit-on considérer comme agent pour le problème à résoudre ? On doit appliquer l’approche fonctionnelle ou objet pour pouvoir identifier les agents et les objets ;
 - Quelle est la relation entre les agents et les tâches ? Quels sont les relations entre les agents, quelles sont les tâches que chaque agent doit accomplir pour poursuivre son but ? Ce problème est très souvent rencontré en génie-logiciel et en particulier avec les méthodes objets. Il s’agit également des systèmes informatiques et logiciels [Ferber 1990].

On peut donc dire qu’il existe des façons différentes d’aborder le problème d’identification des agents en fonction du point de vue adopté. Suivant les travaux de Durfee et Steeb [Durfee 1989, Steeb 1988] on peut distinguer trois différentes façons de faire. Prenons l’exemple d’une tour de contrôle d’avions. Dans cet exemple qui sera l’agent ? Les avions, la description de l’espace ou

bien les différentes phases de pilotages ? La première approche est dite centrée sur l'objet avion. L'avion décide par lui même des actions qu'il doit prendre et il est doté des connaissances nécessaires pour le faire et pour identifier les différentes phase de pilotage. La deuxième approche est centrée sur l'espace. Tout est décrit en fonction de l'espace et des mouvements des objets qu'il contient. Il est donc clair que les opérations ne sont plus effectuées par les avions, mais sont gérées par l'espace. Les actions de pilotage ne sont plus que des ordres effectués sous le contrôle de la tour d'observation. La troisième approche illustre la méthode fonctionnelle de modélisation. Les phases de pilotages sont celles qui mènent les mouvements des appareils. Ainsi, pour se rapprocher de l'intelligence artificielle, et de l'IA distribuée pour les systèmes distribués, chaque phase de pilotage est prise en compte par un acteur du domaine. Pour autant, on peut imaginer un mélange entre modélisation objet, modélisation par agent et analyse fonctionnelle. Il suffit de pouvoir décrire chaque agent assez en détails pour ensuite prendre chaque détail et le représenter par un autre agent. Ceci forme une hiérarchie basée sur l'analyse fonctionnelle. Nous pouvons ainsi dire que l'on utilise également les systèmes d'IA distribués en utilisant la connaissance de chaque spécialiste du domaine. Cette analyse fonctionnelle n'est souvent pas des plus simples, même si une partie des spécialistes des systèmes multi-agents considèrent que lorsque les agents ne sont pas situés (c'est-à-dire non disposés dans un espace métrique), c'est la phase la plus simple.

Dans ce type d'analyse on distingue deux façons de voir la structuration des fonctions. Il s'agit ici d'une décomposition horizontale ou verticale [Fodor 1983]. La première est consacrée à la formalisation des problèmes, agents et systèmes dits génériques. Par opposition, la seconde est utilisée pour la résolution des problèmes concrets. À titre d'exemple la décomposition verticale pour le système d'avion décrit sera la vision des phases pour chaque vol, alors que la décomposition horizontale sera le partage des connaissances des fonctions verticales. L'utilisation des deux techniques est rarement retrouvée seule dans les systèmes multi-agents, en général on verra un mélange des deux. On distingue aussi des relations qui se forment entre les agents, tant au niveau des agents cognitifs qu'au niveau des agents organisationnels. Ces relations décrivent les interactions possibles ou non entre les différentes entités. On parle de relations dynamiques et de relations statiques. Les premières décrivent la forme d'une organisation, sans aucune exécution, les secondes prennent en compte les interactions et la modification qui s'ensuit après exécution de ces interactions. On peut mentionner les sept types de relations connues :

1. Une relation d'accointance entre deux agents A et B signifie qu' A connaît B et donc peut s'adresser directement à lui ;
2. La relation communicationnelle ou le canal de communication entre A et B sert à envoyer des messages. Celui ci est bien sûr utilisé par les relations d'accointance ;

3. La relation de subordination apparaît lorsqu'un agent A demande à un agent B d'accomplir une tâche pour lui. Lorsqu'il s'agit d'une relation statique, il est alors impossible à B de refuser d'effectuer la tâche. Dans le cas d'une relation dynamique B n'est pas relié à une obligation, car A ne fait que demander les services de B . L'hierarchie créée peut présenter une distribution égalitaire des tâches et des structures. Dans ces structures on peut inclure les systèmes économiques qui gèrent les demandes et les offres ;
4. Les relations opératives représentent les conditions ou dépendances reliées aux exécutions des tâches demandées. Il est parfois nécessaire de suivre une logique de précedence dans l'ordre d'exécution des tâches. Cette logique impose de pouvoir accomplir la tâche $(n - 1)$ avant la tâche (n) ;
5. La relation informationnelle est la vérification de la validité entre les actions et les subordinations des agents ;
6. Les relations conflictuelles se gèrent pour remédier aux conflits entre les agents. Il s'agit pour les systèmes logiciels, par exemple, de gérer l'accès aux ressources ;
7. Les relations compétitives indiquent les conflits entre les agents ou plutôt l'impossibilité de pouvoir accomplir un but donné car un agent est en conflit avec le but d'un autre agent.

Les relations sont aussi caractérisées par un degré de couplage qui peut être fixe, variable ou évolutif. Le couplage fixe ne permet pas l'évolution des relations, elles restent figées. Le couplage variable permet une évolution contrôlée, tandis que le dernier est un mélange des deux précédents.

On parle de structures d'organisation prédéfinies ou émergentes. Les premières sont définies par le concepteur du système et l'ensemble des transformations sont connues à l'avance. Les deuxièmes définissent les actions comme résultantes des comportements des agents. Ceci permet une évolution plus aisée du système.

- L'analyse des paramètres de concrétisation traite le passage d'une structure à une autre et s'occupe de la réalisation de l'organisation entre les agents. Ce type de concrétisation précise quelles sont les compétences des agents et comment une tâche peut être effectuée à l'aide d'un seul agent ou bien de plusieurs agents en même temps. Ceci permet de définir des agents spécialistes d'une tâche ou bien des agents totipotents. Les agents totipotents sont ceux qui ont la compétence de tous les domaines et qui se réunissent pour résoudre un problème. Il est alors possible de retrouver de la redondance dans le système, lorsque les agents sont polyvalents, la redondance risque d'être bien plus élevée que lorsqu'il s'agit d'agents très spécialisés. Souvent, pour caractériser les types de systèmes les plus utilisés, on utilise un mélange d'agents très spécialisés et d'agents polyvalents, ce qui implique une redondance moyenne.

Il existe quelques organisations que l'on peut caractériser avec la concrétisation :

1. Organisation à structure fixe-hiérarchique. Cette structure est composée d'équipes fixes. Chaque agent est spécialisé dans un domaine, on forme des groupes d'agents qui sont chargés d'effectuer une tâche commune. On peut détecter une hiérarchie dans la directions des tâches pour les agents d'un même groupe ;
2. Organisation à structure variable-égalitaire-émergente. Ce sont des agents réactifs qui sont capables de s'organiser. Ce qui peut poser problème ici est la coopération des agents pour effectuer une tâche. On peut également retrouver une très grande redondance parfois, mais l'éviter en faisant évoluer les agents petit à petit ;
3. Organisation à structure variable-égalitaire-prédéfinie. Cette structure est caractéristique pour les systèmes en économie et les agents qui passent des appels d'offres. Dans ce genre de systèmes, on retrouve des agents très spécialisés ainsi que des agents totipotents.
4. Organisation à structure évolutive. Elle est très peu étudiée mais on a quand même deux approches qui sont connues. La première consiste à observer des paramètres, et en fonction de leurs valeurs, de permettre au système de changer de comportement. Le système multi-agents fait son évolution en fonction des observations sur ces paramètres. Strugeon [Strugeon 1995] est celui qui propose un système basé sur des organisations fixes et variables et qui décide de passer des unes aux autres en fonction de la valeur des paramètres décisifs. La seconde idée consiste en l'incorporation des algorithmes génétiques dans les systèmes multi-agents. En fonction des résultats le système change de la manière la plus adaptée. Ce type d'organisation a été étudié par Delaye [Delaye 1993].

2.5.2 Organisations individuelles

Les organisations individuelles sont constituées d'agents qui eux-mêmes sont composés de modules et non pas d'agents. Les modules peuvent être construits avec une architectures horizontale et/ou verticale et plus ou moins spécialisée. Lorsqu'on parle d'architecture, on s'approche de la vision technique des composants logiciels, qui sont constitués d'objets les aidant à accomplir leurs tâches. Malgré tout, chaque agent est autonome et peut très bien être cognitif ou réactif.

L'ensemble des architectures les plus utilisées est le suivant :

1. Architecture modulaire horizontale.
C'est le type d'architecture le plus répandu. Elle est composée de modules reliés par des fonctions horizontales. Parmi les modules les plus courant on peut énumérer : les fonctions de perception de l'environnement, l'interprétation et l'action après une communication, la gestion des buts attendus, la planification des actions entreprises, etc. Pour ce type d'architecture toutes les liaisons

sont fixes (c'est-à-dire prédéfinies en avance par le concepteur). L'information qui arrive dans le système passe par les capteurs, ensuite la perception du monde extérieur est mise à jour. En fonction des besoins, un module, appelé module de planification, ordonne les tâches à accomplir.

2. Architecture à base de tableaux noirs.

L'architecture des tableaux noirs est une des plus répandue pour la construction des systèmes mono-agent. Elle est très utilisée dans l'IAD (Intelligence Artificielle Distribuée) et surtout utilisée pour implémenter des mécanismes de calculs par les agents eux-mêmes. Une partie de la littérature concerne les tableaux noirs pour la reconnaissance de la parole (par exemple le logiciel Hearsay II [Erman 1988]) et la gestion des véhicules ([Lesser 1983]). Le modèle des tableaux noirs est basé sur un ensemble de modules qui sont indépendants. Ils ne communiquent pas directement mais, par contre, bénéficient d'un partage d'informations communes. La connaissance partagée (Knowledge Source) est définie par des modules qui peuvent gérer son utilisation. L'architecture des tableaux noirs est subdivisée en trois parties :

- La source des connaissances (KS). Les sources contiennent la base de connaissances nécessaires pour la résolution des problèmes existant ;
- La base partagée qui est représentée par le tableau noir. Elle contient tous les mécanismes internes pour l'évolution du système, ses différentes actions, ses perceptions et ses buts définis. La hiérarchie de la base partagée est construite à l'aide des hypothèses et des solutions du domaine d'application ;
- Un dispositif de contrôle qui est chargé de gérer les conflits qui peuvent intervenir lors de la résolution des différents problèmes. Cette partie des tableaux noirs a connu bien plus d'évolution dans les années qui ont suivi l'utilisation de cette architecture.

Le contrôle des tableaux noirs est la partie la plus explorée. Le problème général, que de nombreux chercheurs se sont posé, est de savoir quelle sera la bonne source de connaissances à déclencher pour la résolution du problème donné et comment, entre les solutions des différents sous-problèmes, relier les actions nécessaires. Les premières implémentations et propositions débutent avec le logiciel de reconnaissance de la parole, Hearsay II, qui présente une solution avec des procédures, mais cette idée évolue très vite vers la construction d'un ensemble de règles. Lors de l'apparition du système BB1 de Hayes-Roth [Hayes-Roth 1985] le mécanisme de contrôle des tableaux noirs commence à être considéré comme un problème important et digne d'avoir une définition propre, ainsi qu'un mécanisme à lui tout seul. Ce type d'architecture est basée sur deux mécanismes pour le tableau, un qui traite la résolution du problème et un autre qui s'occupe de la résolution des conflits. Une deuxième approche qui essaie de trouver la stabilité entre l'efficacité et le contrôle des conflits est décrite dans ATOME [Lâasri 1989]. D'autres

descriptions des tableaux noirs peuvent être trouvées dans les travaux de [Engelmore 1997, Jagannathan 1997] .

Les tableaux noirs sont aujourd'hui réalisés comme des structures intelligentes vis-à-vis des systèmes cognitifs [Hayes-Roth 1989, Lesser 1983, Chevrier 1993, Cambier 1994]. Les avantages des architectures à tableaux noirs sont multiples, de la représentation et la souplesse lors de la description des modules jusqu'à la communication dans le KS. En effet, lors des demandes d'exécution d'une tâche, le contrôle ne déclenchera que les données et vérification pour la tâche demandée, tout en essayant de proposer la meilleure solution possible. L'inconvénient des tableaux noirs vient du fait que le contrôle est très prenant en temps. Il est donc conseillé d'utiliser ce type d'architecture en fonction des contraintes de temps que l'on s'impose lors de la réception de la réponse.

Enfin, pour finir, on dira que les tableaux noirs représentent l'architecture la plus souple et adaptable à tout type de problème. Il est aussi possible d'imaginer la modélisation des autres architectures à travers les tableaux noirs. Ce qui est certain, c'est que les tableaux noirs peuvent être considérés comme une méta-architecture. L'avantage lorsqu'on les modélise et qu'il suffit de les modéliser en fonction des sources de connaissances (KS) et d'éléments d'autres tableaux noirs.

3. Architecture de subsumption.

L'architecture de subsumption est basée sur une hiérarchie particulière. En effet, imaginons deux agents. Les deux sont chargés d'exécuter une tâche. L'agent *A* est situé plus haut dans l'architecture et domine l'agent *B*. Lorsque l'agent *B* effectue la tâche, ses résultats peuvent se rajouter aux résultats de l'agent *A* et la totalité sera mise à disposition pour la finalisation du but. Il arrive parfois que l'agent *A* soit prioritaire pour passer ses résultats avant l'agent *B*, (voir figure 2.6).

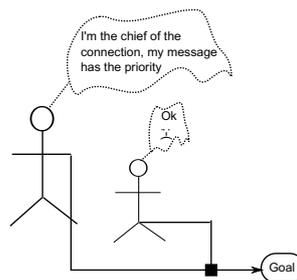


FIGURE 2.6 – Exemple de subsumption entre les agents. Un des agents possède la priorité pour le passage des messages.

4. Architecture avec des tâches compétitives.

Les tâches compétitives ont des propriétés particulières. Chaque tâche peut être représentée comme un processus qui a une priorité pour être mis en œuvre et exécutée. Au-dessus, comme un chapeau de toutes les tâches, il y

a un mécanisme général qui juge, en fonction des priorités des tâches et de leur poids dans le système, laquelle doit être mise en place pour le besoin demandé. Ce type de règle est décrit dans [Drogoul 1993]. Il arrive parfois qu'une tâche doive être exécutée alors qu'une autre est en cours. Dans ce cas la tâche courante est seulement suspendue, et non pas tuée, ce qui permet à celle qui est prioritaire d'être présentée de suite.

5. Architecture des systèmes de production.

Les systèmes de production sont très connus. Ils sont construits à partir d'une base de faits BF , d'une base de règles de production BR et d'un interprète appelé moteur d'inférence MI . Les règles à interpréter sont généralement données de la façon suivante :

$$si < liste\ de\ conditions > \text{ alors } < liste\ d'actions >$$

où $< liste\ de\ conditions >$ est associée à des éléments de la base de faits. Il existent des actions activées à la demande des agents. Lorsque plusieurs actions concurrentes sont activées en même temps, un mécanisme choisit la plus prioritaire à exécuter, en fonction des perceptions, des paramètres internes, ou de règles définies. Lorsque l'on intègre les systèmes de production dans les systèmes multi-agents, chaque agent doit être considéré comme un système de production à lui tout seul. Les règles construites pour ces systèmes doivent tenir compte de la base des faits.

Les règles peuvent être construites avec un moteur dit monotone. Ce moteur est chargé d'avoir une base fixe de règles qui se suivent et le changement de l'ordre n'est pas possible. On peut aussi imaginer des paquets de règles gérées par un mécanisme de méta-règles, ce qui permet d'avoir plus de flexibilité. De plus avec cette méthode plus générique le nombre de règles à décrire est bien plus petit et on peut décrire des algorithmes plus complexes, ce qui est très appréciable lors de la modélisation.

6. Architecture à base de classifieurs.

Les systèmes à la base des classifieurs sont initiés par Holland [Holland 1977, Holland 1971, Holland 1986] et sont destinés aux systèmes évolutifs et cognitifs. Cette architecture est présentée sous forme d'une base de faits, et d'une base de règles faites portant sur les faits. Les règles ont une structure particulière, dotée d'un poids de la règle et d'une probabilité de déclenchement associée à ce poids. Les règles sont appliquées aux faits et par la suite produisent d'autres règles à leur tour. Chaque action produite après l'application d'une règle est évaluée, ce qui donne plus ou moins de poids à la règle en fonction de l'évaluation de l'action. Si l'évaluation est bonne, la règle aura plus de poids et donc sera appliquée plus souvent. Il arrive également d'introduire des processus venant des systèmes de production, en utilisant les algorithmes génétiques. Ces mécanismes de croisement ont été utilisés par Goldberg [Goldberg 1989].

7. Architecture connexioniste

L'architecture connexionniste est inspirée par les connexions neuronales du cerveau. Dans un réseau de neurones, chaque neurone détermine ses propres caractéristiques d'entrées/sortie et ses dépendances vis à vis des autres neurones participant dans le réseau. Comme dans l'architecture précédente, chacune des connexions entre les neurones dispose d'un poids. Dans cette vision on peut donner l'équation suivante qui représente le transfert entre deux neurones.

$$y_i = f(\sum_i w_{i,j} x_i)$$

où les x_i sont les valeurs de sortie des unités i , $w_{i,j}$ sont les poids des connexions reliant les neurones i aux neurones j et f est la fonction d'activité. La fonction d'activité la plus classique consiste à additionner la somme des valeurs de toutes les entrées dans le neurone, et si elle dépasse un certain seuil, alors le neurone est actif.

En général, l'architecture des neurones est faite sur plusieurs couches. Les neurones de chaque couche sont reliés aux neurones de la couche suivante. Les couches entre la première et la dernière sont dites des couches internes (voir figure 2.7).

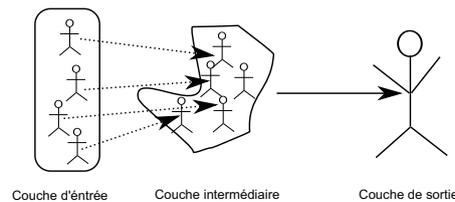


FIGURE 2.7 – Réseaux de neurones et différentes couches le constituant. La première couche est celle des entrées, ensuite la couche intermédiaire et enfin la couche qui définit les sorties.

En ce qui concerne les connexions entre les neurones, on connaît trois façons de les faire :

- (a) On peut faire évaluer et fixer les poids des connexions à la main [Braitenberg 1986] ou bien utiliser des techniques très simples [Cherian 1993].
- (b) La deuxième technique consiste à apprendre le réseau à régler par lui-même les poids des connexions. En effet, il dispose de fonction statistiques mesurant les écarts entre les sorties désirées et les sorties obtenues d'une connexion à partir des entrées. On appelle ce mécanisme, le mécanisme de rétropropagation ou backprop [Lin 1992].
- (c) La troisième technique introduit des algorithmes génétiques pour faire évaluer les poids des connexion, ce qui est normalement un renforcement pour les systèmes de classifieurs [Werner 1992, Werner 1994].

8. Architecture dynamique.

Cette architecture n'existe pas encore vraiment à ce jour. L.Steel a proposé une implémentation, en essayant de réaliser des robots coopératifs. Il essaie

de recréer le comportement des agents en reliant directement les équations des capteurs aux effecteurs [Steels 1993].

9. Architecture multi-agents et acteurs.

Définition : Architecture multi-agents

C'est l'application de la notion de système multi-agents à la définition des agents eux-mêmes, un agent étant considéré comme un système multi-agents à part entière.

En effet, les travaux de Minsky [Minsky 1965] parlent pour la première fois de la formulation d'un agent en s'inspirant des êtres vivants. Chaque petit désir ou but d'un être vivant est repris et puis transformé en fonction tout en essayant de formaliser un système qui pourrait guider le tout. Chaque activité de l'être conduit à une activité dans le système qui représente l'agent. De plus, on peut imaginer qu'un agent est lui même composé d'agents et donc qu'une hiérarchie se construit. Les travaux de Maes [Maes 1997] représentent l'agent comme un organisme ayant des activités internes. Ce qui conduit à la comparaison avec une hiérarchie construite à l'intérieur de l'agent pour qu'il puisse accomplir son but et utiliser les ressources qui lui sont nécessaires pour son fonctionnement.

Dans les travaux de Hewitt, on voit décrit pour la première fois l'utilisation d'un agent [Hewitt 1973]. Ensuite, dans les travaux suivant, le concept a été appliqué dans le domaine de l'informatique [Hewitt 1977]. Ceci permet l'introduction des systèmes "intelligents" qui sont reliés par un mécanisme de messages et ainsi sont capable de se transmettre des informations et des tâches à effectuer. On voit apparaître l'utilisation des patrons (patterns) avec une vision d'agent autonome que l'on peut appeler acteurs. Chaque acteur dans un système est responsable de ses actions et ses buts pour le bon fonctionnement de l'ensemble.

Définition : Acteur

Un acteur informatique est une entité constituée de deux structures. L'une comprend l'adresse de tous les autres acteurs qu'il connaît et à qui il peut envoyer un message. L'autre est une structure active qui décrit son comportement.

Ainsi, le comportement de chaque acteur s'exprime par l'envoi et la réception de messages, ce qui montre également ses interactions avec les autres agents dans le système. En représentant les systèmes de cette manière, on peut très bien imaginer la synchronisation des agents et même leurs actions dans un système parallélisable.

Pour finir on peut dire quelques mots sur l'utilisation des architectures multi-agents. De nombreux travaux ont été menés sur la parallélisation des messages. Les plus connus sont utilisés pour les calculs parallèles [Hewitt 1991, Hewitt 1985, Carle 1992]. Il existe également des langages dédiés à ce thème [Yonezawa 1990, Ferber 1991]. Ce type d'architecture est également utilisé

pour modéliser des éco-systèmes et utilise la réflexivité organisationnelle [Giroux 1993]. Giroux utilise ses propriétés pour construire un éco-système. Il considère que l'éco-système est un agent, contenant un ensemble d'agents qui interagissent et survivent au même endroit. Son système REACTALK est fondé sur ACTALK [Briot 1989]. Les agents qu'il utilise ne sont pas pour autant dotés de comportements autonomes et n'ont pas forcément une présentation de l'environnement qui les entoure.

2.5.3 Conclusion

La structuration des modèles basés sur des multi-agents est une tâche complexe. Dans les années précédentes, l'organisation a pris une place importante [Coutinho 2005, Hübner 2009]. Par rapport au travail effectué, le prototype et sa modélisation se rapprochent des travaux de [Hübner 2006].

En ce qui concerne notre modélisation, nous allons mettre en oeuvre la modélisation structurale avec pour but, la création d'une hiérarchie qui nous permet une structuration top-down du prototype. En effet, la modélisation a d'abord commencé par les buts qui étaient clairement définis. À partir des points clés à atteindre, nous avons recueilli l'information nécessaire, puis continué avec la modélisation des différentes étapes, jusqu'à arriver à l'implémentation de l'outil fini.

Durant la phase de la modélisation, nous avons appliqué la méthode de l'analyse fonctionnelle. Une fois les agents identifiés, une dimension sociale est créée, cette dernière permet la création des liens et de relations de type de subordination ou non. Dans la gestion de la hiérarchie du prototype, les relations sont définies dans une grande partie par l'environnement commun qui représente la dimension environnementale. En effet, lors de la création du prototype, nous avons dû gérer un grand nombre d'agents, il a donc été impératif de tenir compte également de la dimension sociale, qui est l'ordonnancement des actions.

En faisant un récapitulatif de toutes les actions qui doivent être prises en compte, notre modélisation est bien celle des multi-agents, sans oublier que nous faisons également appel à la notion de tableaux noirs. Nous avons dû modéliser des termes spécifiques aux domaines, qui sont employés pour les simulations et la gestion des données. Ceci a été fait en créant une base de connaissances commune pour tous le prototype, sous la forme d'une ontologie. L'ontologie est employée pour garantir l'utilisation pérenne des données et la possibilité d'évolution future de leur format.

2.6 La modélisation et les agents

2.6.1 La modélisation des agents et de leurs actions

Différentes modélisations peuvent être utilisées pour représenter un même problème. Pour autant ces modélisations peuvent être toutes valides, car même si leur représentation est différente, leur but reste identique. Néanmoins Ferber a détecté [Ferber 1995] les inconvénients suivant lors de l'utilisation de la modélisation :

1. Il est particulièrement difficile d'entrer dans le cœur d'un programme et d'analyser son comportement simplement en regardant son implémentation.
2. Le code d'un programme introduit un grand nombre de détails inutiles à la compréhension de son fonctionnement ;
3. Des implémentations différentes en termes de langages et de choix de structure de données, présentent des fonctionnements semblables, alors que des modifications légères dans un programme peuvent avoir des conséquences importantes sur le comportement de ce dernier ;
4. L'exécution des agents s'effectuant en parallèle (que le parallélisme soit simulé sur une machine monoprocesseur ou effectif sur une machine multiprocesseurs). Il est encore plus difficile de comprendre leur fonctionnement à partir de leur code, du fait du non-déterminisme et du parallélisme ;
5. Les systèmes multi-agents sont des logiciels complexes, difficiles à appréhender et à concevoir. Il est donc nécessaire de réduire leur complexité en dégageant leur structure et en analysant séparément leurs différents composants sans pour autant perdre de vue l'organisation générale.

D'après Ferber la modélisation s'avère pertinente pour trois raisons particulières :

1. La modélisation des actions des agents et des conséquences de celles-ci dans l'environnement. Ce dernier peut être complexe et présenter aussi une évolution autonome distincte des conséquences des actions des agents. Cette modélisation utilise des langages de types modélisation opératoire et formalisation ;
2. Le comportement d'un agent aussi bien dans le comportement observable que dans la mécanique interne de l'agent, en utilisant des langages de type modélisation opératoire et représentation des connaissances ;
3. L'interaction des agents entre eux et en particulier les différents modes de communication, préluces aux formes organisées d'interactions que sont la coopération, la coordination d'action et la résolution de conflits, avec des langages de type communication et modélisation opératoire.

On ne sait jamais comment exactement faire le lien entre la modélisation et le comportement que l'on voudrait donner à l'agent que l'on implémente. Il est assez souvent difficile de prendre en compte toutes les particularités mais par contre réalisable à condition de créer des patrons génériques et modifiables dans les futures utilisations. Il existe deux grandes familles de modèles multi-agents. Ce sont les modèles algébriques et les modèles opératoires. Les premiers aident à la définition des systèmes pour leur côté mathématique et descriptif des fonctions de perception basées sur les modèles probabilistes par exemple. Les seconds permettent de définir des actions, des interactions entre les agents et par conséquent un comportement.

La question qu'un bon nombre de concepteurs se posent est "comment modéliser un agent". On peut dire qu'un agent est une entité qui agit, perçoit et subit des actions. Elle est capable ou non de répondre en fonction de sa place dans la hiérarchie. Bien sûr, pour ce faire tout ça l'agent a besoin de pouvoir effectuer des

actions et il est muni de fonctions qui l'aident pour le faire. On donne ainsi une définition pour l'action et ce qu'elle pourrait provoquer.

Définition : Action

Une action effectuée par un agent survient lors d'une perception de l'environnement, après l'interaction avec un ou plusieurs agents du système ou lorsque l'agent lui-même considère qu'il doit introduire un changement dans son état, en fonction de ses besoins. Une action nécessite d'employer des moyens présents dans la description de l'agent et qui sont souvent représentés comme des fonctions lorsqu'il s'agit d'une implémentation informatique. Une action a des conséquences qui peuvent amener un changement dans le système ou un changement d'état d'un autre agent.

Comme une règle générale, les actions des agents modifient le système. Si les actions sont accomplies, alors on peut considérer qu'à travers elles, le système évolue et peut passer d'un état à l'autre. On peut donc parler de système multi-agents représentant un logiciel informatique ou un environnement particulier des sciences de la vie. Dans les deux cas l'évolution d'un tel système est observée.

En effet on peut dire comme Ferber [Ferber 1995] que l'action a plusieurs facettes :

1. L'action comme une transformation de l'état global.
C'est modèle classique de transformation d'états qui est assez bien connu, autant dans les théorie des automates, que dans l'IA. Les changements d'états sont bien sûr décrits et nécessitent des conditions pré-requises ;
2. L'action comme une réponse aux influences.
Les influences que les agents et le système peuvent subir sont nombreuses. Il s'agit d'une définition très rigoureuse de la réception des messages et de leur signification, qui introduit, bien sûr, l'action engendrée par la suite.
3. L'action comme un processus informatique ;
L'action peut très bien être vue comme une suite de règles implémentées dans un langage objet ou autre. Comme exemple, on peut mentionner les réseaux de Petri [David 2005] ;
4. L'action comme modification locale.
On peut en effet considérer qu'une action apporte rien qu'une modification locale, et qu'il est nécessaire d'avoir une suite d'actions pour la modification de l'état d'un agent ou de l'environnement ;
5. L'action comme déplacement physique.
Le déplacement physique est considéré comme une action pour les agents mobiles. Que l'on parle d'un système environnemental ou bien un système contenant des robots, le déplacement nécessite une description géométrique et les fonction lui correspondant pour être décrit ;
6. L'action comme commande.
On ne va s'intéresser qu'aux perceptions de l'agent et les commandes qu'il

enverra pour répondre aux demandes venant d'extérieur ou pour satisfaire ses propres besoins.

Les différentes propriétés mentionnées précédemment décrivent l'action d'un agent comme une caractéristique qui ne peut être évitée lors de la modélisation. En effet, par l'action l'agent peut agir en fonction de l'environnement qui l'entoure. Il utilise les messages pour communiquer, il répond aux agressions extérieures par d'autres actions. Il accepte les différentes influences venant de l'environnement ou des autres agents, et ceci peut être un facteur de changement de son état. En conclusion on peut dire que l'agent et les actions qu'il entreprend sont influencés et guidés par les perceptions qu'il a de son environnement et par les fonctions avec lesquelles il a été doté pour voir son environnement.

2.6.2 Modéliser un SMA communicant et son environnement

Pour le prototype que nous avons implémenté, on se rapproche le plus de la modélisation par agent communicant et situé dans un environnement distribué. Dans cette partie on présente la modélisation basée sur ces caractéristiques.

Les agents communicants sont en général modélisés de deux façons différentes. On peut constituer un ensemble d'agents reliés entre eux par un réseau de connexions, qui sont accessibles par une entrée unique et par une sortie unique. Il est donc indispensable de passer par l'entrée lorsque l'on veut accéder à ce genre de système. Ainsi, on peut considérer que l'entrée reçoit tous les messages adressés au système et les distribue en fonction des tâches attribuées à chaque agent. On peut interpréter cette entrée en tant qu'un référentiel global qui gère l'information et la distribue aux agents. La sortie à son tour collecte toutes les informations nécessaires reçues par les agents agissant à l'intérieur du système, les met en forme et puis les prépare pour la déduction des résultats demandés au système multi-agents.

Dans le deuxième cas, on ne peut pas distinguer des entrées et sorties bien définies comme deux agents bien formés. On peut en effet avoir plusieurs entrées/sorties, ce qui, en aucun cas, n'empêche le bon fonctionnement du système. Cette structure est bien moins organisée que la première. Par contre de nombreux concepteurs la préfèrent, au moins pour le début de la modélisation car elle est simple à gérer.

En résumé, dans un système multi-agents purement communicant, chaque agent est relié à une entrée et également à une sortie (voir figure 2.8, page 33). Ceci impose qu'il connaît exactement les conditions qu'il doit remplir pour exécuter une tâche et fournir les bons résultats en retour.

Dans un SMA, l'environnement est une partie du système assez importante puisque l'organisation de l'environnement définit parfois la structure que le système peut prendre. On a deux types d'environnements connus, l'environnement centralisé et l'environnement distribué.

- L'environnement centralisé.

Il est représenté par une seule entrée. On en déduit donc que les agents ont tous accès à la même entité pour obtenir l'information dont ils ont besoin. Les environnements centralisés sont les plus utilisés en architecture des systèmes

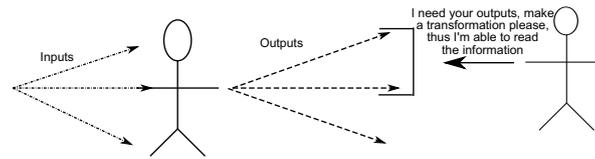


FIGURE 2.8 – Entrées et sorties d’un agent d’un système. Un autre agent a besoin des résultats produits par le premier agent, mais il faut les mettre sous la bonne forme pour qu’il soit capable de les lire.

multi-agents. On peut les retrouver lors de la conception des systèmes où le nombre de stimuli pour les agents n’est pas important. Donc les agents sont tous dans le même environnement comme pour les modèles des proies-prédateurs ou bien les robots mobiles.

– L’environnement distribué.

Pour cet environnement on dispose d’un ensemble d’agents qui se gèrent assez facilement par eux mêmes. En effet, chaque agent peut être perçu comme un système à part qui a ses propres entrées et sorties. Il est donc suffisamment indépendant et peut se comporter en fonction des perceptions qu’il reçoit par l’environnement toujours reliées avec les entrées qui viennent vers son module de gestion des données d’entrées. En ce qui concerne les sorties, il en est de même, l’agent voit par lui même les besoins des agents auxquels il est relié, et par conséquent les résultats qu’il doit produire. Toutefois les agents dans cet environnement sont reliés par un système de réseaux qui leur permet non seulement d’échanger de l’information mais aussi d’accomplir un but commun qu’ils pourraient avoir. Cette technique de modélisation est bien utilisée dans la conception des jeux et également dans la conception des logiciels.

En ce qui nous concerne, nous pouvons définir les relations entre les agents de l’environnement distribué comme étant gérées par l’environnement lui même. Nous présentons dans la suite de ce manuscrit, la partie environnement, qui peut être désigné comme responsable d’établir les relations entre les agents et de mettre au profit de ces derniers la connaissance commune à laquelle ils accèdent. Les relations que nous employons entre les agents sont essentiellement basées sur la perception de chaque agent par son environnement et sur les fonction cognitives dont il est doté pour pouvoir répondre aux influences extérieures. Les relations sont donc gérées par l’environnement et effectuées avec des messages entre les agents. Lorsque les messages ou le passage de l’information doivent être modifiés, ceci est fait par le biais d’autres agents ou c’est l’environnement qui l’assure.

Nous allons nous appuyer sur la modélisation des environnements distribués pour la construction de notre prototype logiciel. Ceci nous permet d’avoir une flexibilité au niveau de l’architecture et de relier des modules accomplissant des tâches différentes. On utilise également cette structure de l’environnement pour pouvoir connecter les différentes entités de notre prototype en sachant

que chacune d'entre elles est un agent qui se suffit à lui-même et n'a pas besoin des autres pour pouvoir accomplir ses buts. L'environnement distribué convient à la construction du prototype logiciel, car il apporte une souplesse, non seulement entre les différents modules composant un logiciel, mais également une hiérarchie qui est basée sur un environnement sur l'échange de messages entre les agents. L'environnement centralisé est une caractéristique essentielle de laquelle nous nous servons, puisque, avec lui, les agents accèdent à la connaissance commune qu'ils emploient pour accomplir leur buts.

Pour finir voici trois remarques sur les environnements distribués

1. Pour les environnements distribués, chaque entité est perçue par les autres agents et leurs actions en sont déduites en fonction de son existence.
2. Lorsque les agents perçoivent les autres agents, leur connaissance locale peut s'étendre à la connaissance de tout le système.
3. Même si les agents dans un système distribué ont tous la connaissance les uns des autres, il existe néanmoins des fonctionnalités pour chacun d'entre eux qui leur permettent de filtrer les informations venant de l'environnement. Parfois ces connexions sont assez complexes et du temps est nécessaire pour la transformation de l'information.

Le SMA situé est un système basé sur la perception de messages venant de l'extérieur. En général les messages et la vision de l'environnement qui est perçue ne changent pas le fonctionnement de ce dernier. Dans un système communicant et situé, on peut dire que les messages perçus sont souvent l'élément déclencheur d'un autre état de l'agent, ou d'un événement qui correspond à l'information.

Il n'est guère facile de modéliser un système multi-agents. Si l'on se trouve dans la situation d'une implémentation d'agents communicants la tâche s'avère moins complexe. Il suffit pour cela de créer un système de communication bien établi et de tenir compte des transmissions des messages. Parfois, c'est un système entier qui peut les prendre en compte, ce qui centralise les connexions. Une autre solution est que les connexions intègrent un mécanisme de priorités des messages, cela devient un système plus difficile à implémenter.

2.7 Les agents dans la modélisation

Il est d'usage de connaître l'organisation des agents, leurs perceptions et leurs intentions pour pouvoir organiser un système multi-agents.

2.7.1 Les états des agents et leurs intentions

Pour décrire les intentions des agents et leur état à un moment donné (que l'on peut appeler état mental), on va s'inspirer de la psychologie et utiliser le terme de la cognition. Le système cognitif des agents est représenté par leur système de réponse à l'environnement extérieur. En effet, un cogniton fait partie du système cognitif

global et est relié à d'autres cognitions en formant un ensemble d'entités qui organisent leur configuration mentale dynamiquement avec le temps. Lorsqu'on élabore un système basé sur les systèmes multi-agents et qu'il s'agit d'une présentation de l'environnement des sciences de la vie, il est d'usage de réussir de correctement modéliser la réception des messages, la perception du monde extérieur et bien sûr la connaissance sur laquelle on se base pour faire agir l'agent concerné. En effet, les actions des agents seront toujours reliées aux buts qu'il doivent accomplir. Dans la nomenclature des cognitions on distingue plusieurs types différents parmi lesquels les plus intéressants sont :

1. Les cognitions interactionnelles

- Percept

Le percept est la perception de l'information venant de l'extérieur, c'est le résultat de différents systèmes qui peuvent être combinés pour un seul agent, on les appelle souvent des capteurs ;

- Information

L'information peut être représentée sous forme d'un message et est perçue par tous les agents auxquels elle est destinée ;

- Commande

La commande est souvent une tâche qui doit être accomplie par un agent et il est probablement dépendant d'une hiérarchie ce qui lui impose des obligations et des droits d'agir. À savoir que chaque action d'un agent peut avoir des conséquences sur les autres ;

- Requête

La requête est une action d'un agent sur un autre, qui oblige le second à faire quelque chose ;

- Norme

Dans l'environnement global du système multi-agents, un rôle est défini pour chaque agent, qu'il s'agisse d'un système distribué ou bien autre. Le gestionnaire du système global est alors responsable de gérer les rôles et les buts donnés aux agents. Il est donc évident que chaque agent doit suivre d'après ces perceptions les but primaires et secondaires que l'on a pu lui attribuer lors de l'évolution du système. Ces buts sont les normes gérées par l'environnement global. La plupart de ces normes ne sont pas développées par l'agent mais sont innées pour lui, car c'est le concepteur qui va les lui attribuer. On retrouve donc le comportement de l'agent décrit par ces normes qui sont implémentées par le développeur.

Bien évidemment il existe des systèmes qui sont inspirés par ce genre de cognitions. Ces systèmes traitent essentiellement la perception des agents de l'environnement. Nous allons distinguer deux types essentiels de systèmes dotés de :

- Une perception passive caractérisant les agents

Dans ce type de système, les signaux venant par les autres agents ou l'environnement sont acceptés puis traités avant d'arriver sous une forme différente vers l'agent. On suppose que l'on peut utiliser un mécanisme tout à

fait différent pour pré-traiter les messages arrivant et les transformer d'une façon convenable ;

- Une perception active caractérisant les agents.

Pour le système actif, on peut utiliser également un mécanisme différent qui traite l'information venant de l'extérieur. Ce dernier a accès également aux buts des agents et donc peut transformer l'information d'une façon convenable pour un traitement direct des buts.

Bien que ces deux représentations existent, la plupart des systèmes multi-agents utilisent des systèmes de perception passifs.

2. Les cognitons représentationnels peuvent être de deux types :

- Croyance

La croyance est un aspect que l'agent possède pour décrire l'environnement et les agents l'entourant. Il est essentiel de faire la différence entre la perception que l'agent a des autres agents et qu'il a de soi. Ces deux qualités sont différentes et dépendent de la capacité de l'agent à percevoir le reste du système multi-agents. Cette capacité est souvent différente pour chaque type d'agent et rappelons également qu'il est accepté pour un agent de ne pas forcément percevoir les actions et l'existence des autres agents autour de lui ;

- Hypothèse

Les hypothèses sont les perceptions des agents qui pourront survenir lors du passage d'un état à l'autre du système. En effet, de telles sortes de perceptions sont implémentées dans le comportement des agents pour pouvoir éventuellement provoquer son évolution par le passage d'un état à l'autre. Ces perceptions ne donnent pas forcément lieu à des actions réelles ou des changements d'états pour l'agent ou le système.

Les systèmes basés sur ce type de cognitons traitent la représentation de la connaissance au sein du système multi-agents. Le terme de Connaissance a été beaucoup étudié dans le domaine de l'Intelligence Artificielle, pour laquelle il est une représentation d'un savoir faire et des procédés qui l'accompagnent. Il est bien évidemment entendu que la connaissance peut être modélisée de plusieurs façons différentes. Ceci n'enlève rien à la possibilité de la représenter dans toutes ses formes et aspects. Enfin, on dira également que la connaissance sur un problème en particulier est le résultat de la collaboration de tous les spécialistes participant à la résolution de ce problème. Cela implique que la collaboration des agents dans le système est quasi-obligatoire à moins de disposer d'agents complètement autonomes et se suffisant à eux-mêmes pour résoudre chaque tâche se présentant dans l'environnement. Les agents ont donc besoin de collaborer pour effectuer leurs intentions et élaborer des concepts et des solutions possibles [Lakatos 1976].

Un exemple d'un tel système différent est celui de Carl Hewitt appelé Open Information Systems [Hewitt 1991]. Dans sa vision, la connaissance est une résultante du savoir-faire croisé des agents et ceci repose sur une micro-théorie. En effet dans sa conception la connaissance n'est pas forcément partagée entre

les agents.

Pour finir sur ce système, on va dire qu'il existe trois façons de représenter la connaissance et les croyances des agents :

- (a) Le paradigme symbolico-cognitif qui repose sur des symboles pour exprimer les perceptions et les buts et sur des inférences pour les règles qui aident à l'exécution des tâches. On peut également penser à des structures informatiques qui aident à manipuler des objets et donc à accomplir un but prédéfini. Cette manipulation d'objets est caractéristique du raisonnement des agents de cette théorie [Andler 1992] ;
- (b) On peut aussi parler de la théorie des connexionnistes qui manipule des automates. Les automates communiquent à travers des flux de nombres. Cette théorie est souvent utilisée dans les réseaux de neurones ;
- (c) La troisième voie est celle des agents qui sont eux mêmes composés d'agents [Minsky 1965, Varela 1993]. Le raisonnement d'un agent peut alors être vu comme la résultante de tous les agents se trouvant à l'intérieur de lui.

3. Les cognitons conatifs [Ferber 1995, Amblard 2006]

– Tendances/But

Les tendances et les buts sont caractérisés par la même description. De part leur nom, on peut les décrire comme les bases du système cognitif des agents. Un but n'est pas obligatoirement tout le temps accompli, néanmoins il est le départ de chaque action de l'agent pour atteindre un objectif final ;

– Pulsion

Les pulsions sont les composants élémentaires des tendances. Avec ces pulsions internes, les agents sont poussés par leurs propres envie de réussir une tâche qui peut leur être confiée ;

– Demande

La demande est l'évènement externe qui déclenche une tendance. Une demande sera l'action nécessaire, arrivant vers l'entrée d'un agent faisant parti d'un réseau de neurones, pour l'apparition d'une pulsion. Ceci ne veut pas dire que le résultat de toute demande est nécessairement obtenu. Le résultat final dépend de la vérification des conditions nécessaires pour son exécution ;

– Intention

L'intention d'un agent est ce qui le pousse à agir lors d'une demande. L'intention est toujours reliée à un but et à un engagement. Néanmoins les intentions des agents sont accomplies lorsque cela est possible. [Cohen 1990, Cohen 1987] ;

– Engagement

Les engagements caractérisent les agents et les buts représentés dans leur état cognitif. Les engagements font partie de l'intention des agents d'accomplir une action et de poursuivre leur but.

Les buts des agents conatifs peuvent être vus comme une composition de sous-buts élémentaires et peuvent être accomplis par l'agent en effectuant chacun d'eux séparément. Les motivations qui poussent l'agent à agir par rapport à son but peuvent être variées, souvent provoquées par des raisons sociales, elles sont parfois provoquées par les relations avec les autres. Un exemple de motivation sociale en environnement hospitalier est le rôle de l'infirmière, qui est connu par tout le système. Dans le deuxième cas, les motivations viennent de la demande des autres agents.

4. Les cognitons organisationnels

Ces cognitons font le suivi de l'accomplissement des buts des agents. Il est d'usage pour un agent d'évaluer son environnement et d'essayer de réaliser sa tâche de la meilleure manière possible. Il est donc capable d'évaluer et juger et prendre la meilleure méthode dont il dispose pour l'exécution d'une tâche. Après le choix de la meilleure méthode, l'agent ayant créé auparavant un agenda des actions à accomplir, la nouvelle tâche est répertoriée dedans. Elle sera donc effectuée dans les meilleurs délais.

– Méthode

La méthode est l'ensemble des règles qu'un agent doit effectuer pour ses buts. Ces règles sont bien établies et peuvent contenir différents niveaux de détails. Il est néanmoins obligatoire de doter chaque agent de cette liste de méthodes pour qu'il puisse être en mesure d'agir face aux différentes situations qui se présentent dans le système ;

– Tâche

On peut caractériser les tâches comme les entités élémentaires des méthodes. Il est d'usage de séparer les tâches en deux types essentiels. Le premier est celui des actions qui composent une méthode. Le deuxième parle des implémentations ou des instances possibles de ces méthodes. On remarque donc que les tâches sont présentes autant au niveau conceptuel qu'au niveau organisationnel ;

En ce qui concerne les agents réactifs ou les agents cognitifs simples, les termes de tâche et méthode peuvent être confondus. En effet, lorsqu'il n'existe qu'une seule manière d'effectuer une tâche, il n'est plus nécessaire de faire la distinction entre les deux.

5. Autres cognitons.

On peut énumérer bien d'autres cognitons pour décrire le comportement des agents dans les systèmes. Dans la liste des plus utilisés on peut ajouter le désir, l'espoir, le rêve etc. Ceci est loin d'être utile pour la description du travail détaillé dans ce manuscrit et on s'arrêtera là pour les cognitons.

2.7.2 La communication entre les agents

La communication entre les agents est un moyen essentiel de les lier entre eux. Prenons par le cas de la société humaine. Si les hommes n'étaient pas capables de

discuter entre eux, il leur serait impossible d'échanger de l'information, des idées, des solutions et encore moins de résoudre des problèmes en profitant de la connaissance commune de la société. Ainsi, la gestion de la communication entre les différentes entités d'un système multi-agents est une tâche ardue, qui mérite d'être traitée avec beaucoup d'attention. Il est donc évident qu'étant donnée l'importance de cette partie d'un système multi-agents on va essayer d'expliquer brièvement ce qu'est la communication et comment nous voulons employer ces termes théoriques dans la réalisation de notre prototype logiciel.

1. Les débuts d'une communication.

Pour effectuer une communication entre deux entités, il est nécessaire de créer une liaison entre elles, passer des messages ensuite, ne pas oublier de transmettre le décodage des messages si toutefois on a décidé de les protéger des agressions extérieures. Pour tout cela, les théoriciens des multi-agents utilisent le terme de Transmission des signaux. Lorsqu'un agent émet un signal, ce dernier a forcément un destinataire. Dans le cas contraire, qui peut toutefois se présenter, l'environnement du système est doté d'une fonction récupérant le signal et renvoyant une réponse signifiant un résultat nul à la demande. On peut prendre par exemple un agent appartenant au modèle proies-prédateurs. Imaginons que le prédateur émet un signal pour rechercher une proie, mais aucune proie ne se trouve à une distance accessible par le prédateur. Dans ce cas là, il est par exemple utile de faire une méthode qui peut être incorporée dans l'environnement global et qui répond avec un résultat signifiant que des proies ne sont pas accessibles pour le prédateur désigné.

Enfin, chaque signal accepté par un agent est un stimuli pour une action résultant d'une demande. Il peut arriver que le signal arrivé chez un agent ne produise pas forcément une action mais serve à déclencher un processus de réflexion, ce qui le définira automatiquement non pas comme un signal mais comme un signe d'après la théorie des systèmes multi-agents. Comme exemple de signes, on peut prendre par exemple les signes du langage, qui peuvent être employés pour désigner des intentions ou des désirs par les agents d'un système gérant la simulation d'humains dans un environnement particulier ;

2. Comment définir un modèle de communication

Un modèle de communication doit être composé d'un émetteur et d'un récepteur. Dans la plupart des cas, l'information qui passe d'un bout à l'autre est codée. Elle est généralement codée au départ par l'émetteur et ensuite décodée par le récepteur. Dans une grande partie des systèmes multi-agents, les situations de communication sont décrites dans chacune des perceptions des agents qui discutent. En général, les agents disposent de leur propre description de la situation et donc réagissent en fonction (exemple sur la figure 2.9).

3. Quel est le schéma général de la communication ?

La description générale contient quelques points importants qui sont les suivants :

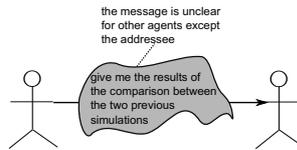


FIGURE 2.9 – Envoi d’un message codé d’un agent à un autre. Le destinataire seul peut voir le message.

- (a) La liaison entre l’émetteur et le destinataire.

Elle est de la forme :

$$(id) \langle \text{émetteur} \rangle : \langle \text{destinataire} \rangle \langle \text{énoncé} \rangle$$

où *id* est l’identifiant (optionnel) du message, $\langle \text{émetteur} \rangle$ est l’agent émetteur du message, $\langle \text{destinataire} \rangle$ est l’agent à qui est destiné le message et $\langle \text{énoncé} \rangle$ contient la signification du message.

Dans le cas où le destinataire du message n’est pas unique, on peut dire que l’on enverra ce message à tous les voisins de l’agent émetteur. Les voisins sont définis avec une relation de distance le plus souvent. Cette méthode est employée pour les systèmes dynamiques où les agents peuvent se déplacer.

- (b) La nature du canal de communication.

La nature du canal de communication est donnée par trois grandes voies :

- L’acheminement direct.

Cette méthode est la plus simple, elle désigne l’envoi d’un message directement au récepteur, sans avertissement envers les autres agents de l’environnement. Il s’agit d’une utilisation par les systèmes multi-agents cognitifs.

- L’acheminement par propagation.

On identifie cette méthode par une source et des récepteurs. La source émet un signal qui est accepté ou non par les autres agents. On l’utilise le plus souvent dans les systèmes qui implémentent des agents réactifs. Comme la notion de voisinage peut classer à distance différentes la force du signal, on peut parler également de différentes réactions des agents situés à des distances différentes de la source. En effet, en fonction de l’éloignement, la force du signal va diminuer et donc la réponse d’un agent provoquera l’action souhaitée ou non.

- L’acheminement par voie d’affichage.

Ceci est le mécanisme utilisé dans les tableaux noirs. Il représente une sauvegarde des messages dans un espace commun accessible à tous les agents.

- (c) l’intention de communiquer

L’intention de communiquer entre les agents peut être exprimée de deux façons différentes : une façon que l’on peut appeler passive et puis une

autre avec une intention. La manière passive permet uniquement l'envoi des messages entre deux agents et puis permet le déclenchement de l'action après lecture du message. La deuxième méthode est bien plus intentionnée, elle est également faite par envoi de messages entre les agents, tout en sachant que ceux-ci sont capables de coder leur message de telle sorte qu'uniquement les bons destinataires puissent les comprendre. Ce genre de message est parfois chargé de transmettre une envie particulière venant de la part de l'agent émetteur. Cette envie peut, ou non, déclencher l'action souhaitée.

4. Utilité de la communication.

La communication dans les systèmes multi-agents est essentiellement utilisée pour la transmission des messages entre les agents. Chaque intention et volonté d'un agent d'agir dans l'environnement passeront forcément par un outil de communication, qu'il soit fait messages ou autre moyen. Lors de la communication on peut distinguer plusieurs fonctions comme :

- la fonction expressive qui désigne l'état de l'agent et ses croyances, ses perceptions du monde extérieur ;
- la fonction conative, qui contient les notions d'intention impliquées dans une requête destinée à un autre agent ;
- la fonction référentielle, elle situe la position de l'agent par rapport à ce qu'il désire faire. Elle est également implantée dans la requête destinée à faire passer un message ;
- la fonction phatique, permettant d'interrompre un message ou de vérifier le bon cheminement et la réception des messages/requêtes.
- la fonction poétique qui met en valeur un message. Cette fonction est pour l'instant assez peu utilisée dans les systèmes multi-agents ;
- la fonction métalinguistique assure la syntaxe du message, voire son encodage. Elle est importante car on peut imaginer des syntaxes différentes pour chaque message en fonction de son destinataire ;

En résumé, la communication est exprimée à travers des messages et permet de faire comprendre aux destinataires des messages les actions qu'ils doivent déclencher suite à la lecture du message et les intentions venant de l'expéditeur. Par la suite, les résultats des actions venant après acceptation des demandes contenues dans la requête, sont transformés sous une forme convenable pour être acheminés vers un autre destinataire dans le cas le plus général.

2.7.3 La collaboration

La collaboration permet de bien faire la distinction entre les rôles de chaque agent et aide à la création d'une hiérarchie dans le système. Dans cette partie est présentée la collaboration dans les systèmes multi-agents et son utilisation. La collaboration est basée sur l'action de tous les agents du système. Sans la communication décrite dans la section précédente la collaboration serait impossible.

En premiers sont introduits les différents modes d'allocation des tâches pour la collaboration entre les agents. La répartition des tâches dans un système multi-agents dépend de son architecture et du savoir-faire de chacun des agents. Il est néanmoins possible lors de l'allocation d'une tâche de la décomposer en plusieurs sous-parties et d'affecter chacune d'elle vers l'agent ayant les compétences appropriées.

La répartition des tâches est un problème qui a été traité dans la littérature. On sait que chaque problème peut être décomposé en fonction de son niveau d'abstraction. Il est aussi très important de prendre en compte les ressources disponibles pour chaque problème et l'échange des données entre les agents [Gasser 1989].

De la même manière l'attribution des tâches des agents peut être gérée de manières différentes. Il est possible d'envisager deux cas : un système client-serveur, et un système dans lequel le serveur est également un client.

Dans la description des formes d'allocation des tâches on peut distinguer ces deux cas généraux : allocation centralisée et allocation distribuée.

- Allocation centralisée

Dans ce type d'allocation des tâches la répartition et la gestion des tâches sont effectuées par un seul agent qui délègue tout aux autres. La répartition des tâches est égalitaires entre des agents spécialisés. Pour cette dernière variante on peut également disposer de médiateurs qui gèrent l'ensemble du processus de la répartition des tâches.

- Allocation distribuée

Dans un modèle distribué, chaque agent est responsable de gérer ses compétences et la gestion de celles des autres pour accomplir une tâche. La compétence du système pour résoudre un problème donné est alors posée sur la compétence mutuelle de tous les agents dans le système. Il reste alors possible de demander à n'importe quel agent d'accomplir une tâche, tout en sachant que ce dernier peut également déléguer des sous-tâches à d'autres agents du système. On appelle ce genre de systèmes "systèmes par accointances".

Il existe également des systèmes multi-agents basés sur un mode d'allocation par appel d'offre. Ce type de réseau est appelé réseau contractuel.

Pour ne pas laisser de côté l'organisation de la distribution des tâches par stimuli, on doit aussi parler des organisation prédéfinies. Ces systèmes sont caractérisés par une propagation des stimuli. Le schéma 2.10 résume les allocations principales de tâches.

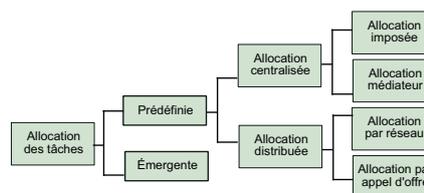


FIGURE 2.10 – Arbre résumant les principaux types d'allocation des tâches dans les systèmes multi-agents

Dans la suite de cette section sont décrites deux types d'allocations principales :

1. L'allocation distribuée des tâches par médiateur.

Dans l'allocation distribuée des tâches par médiateur, on doit prendre en compte le fait que toutes les tâches doivent passer par le médiateur qui gère leurs distributions aux agents capables de les mener à terme. En effet, imaginons trois agents A , B , C . Ces trois agents effectuent différentes tâches, qui peuvent être aussi les mêmes parfois. On se situe alors dans une position où l'agent A est demandé pour exécuter une tâche T , mais il ne peut pas car il est pris par le traitement d'une autre tâche ou bien il ne veut pas, car la tâche T n'est pas prioritaire. Dans ce cas, le médiateur du système, appelé M , va chercher parmi les autres agents existant s'ils sont capables de prendre en charge la tâche T . Il évaluera leurs compétences et puis leurs capacités à exécuter T le plus rapidement possible, ce qui permettra de trouver un agent capable de fournir une réponse pour t (figure 2.11).

Il existe, en général, deux méthodes possibles pour la gestion de l'arrivée des demandes vers M .

- La première méthode stipule que M connaisse les connaissances de chaque agent dans le système, ce qui lui permet de trier rapidement et choisir un parmi eux qui est le plus approprié pour T ;
- La deuxième méthode dit que M ne connaît pas les propriétés des agents. Il en découle que M est obligé de faire d'abord une demande vers tous les agents du système et les classer. Ensuite seulement il peut les trier en fonction d'une méthode d'évaluation et choisir le plus performant parmi eux.

Le gros inconvénient des systèmes utilisant un médiateur est que si ce dernier ne fonctionne plus, tout le système s'écroule. Avec la première méthode on peut arriver à avoir une assez bonne performance, tandis qu'avec la seconde, cela peut vite se dégrader à cause d'un nombre d'agents important et d'un nombre de demandes ne cessant pas d'augmenter. Il est donc préférable de paralléliser le fonctionnement de ces systèmes pour arriver à une gestion par messages. Le nombre de messages peut très vite augmenter lorsqu'un seul médiateur doit les gérer [Ferber 1995].

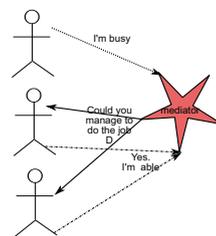


FIGURE 2.11 – Organisation d'un système multi-agents utilisant un médiateur. Le premier agent est occupé, ce qui laisse le médiateur à choisir un agent parmi les deux autres, qui sont tous deux capables d'effectuer la tâche D .

2. L'allocation distribuée sans médiateur.

Dans les systèmes d'allocation par réseaux d'acointances, on suppose que chaque agent connaît les compétences des autres agents et on représente ceci sous la forme d'un graphe ou d'une matrice d'adjacence. On dispose de plusieurs matrices d'adjacence, chacune associée à un agent spécifique et en fonction des liaisons qui le concerne. Pour expliquer cette situation, on prendra un exemple simple de trois agents et trois tâches à effectuer. Soient A, B et C les agents et T_1, T_2 et T_3 les tâches à effectuer. On va créer une matrice d'adjacence pour désigner la connaissance de chaque agent.

Soit M_A la première matrice pour l'agent A , M_B celle pour l'agent B et M_C celle pour l'agent C . On les présente comme ceci :

$$M_A = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$M_B = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$M_C = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C \end{matrix} \\ \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

et de plus on peut faire un graphe qui réunit les trois matrices d'adjacence des agents (figure 2.12).

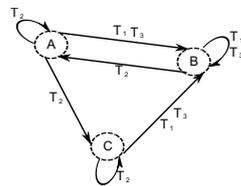


FIGURE 2.12 – Graphe d'adjacence pour les tâches T_1, T_2 et T_3 désignées à être faites par les agents A, B ou C .

Cette représentation des réseaux d'acointances par graphe permet de représenter la connaissance qu'a chaque agent des tâches exécutables par les autres

agents. Par contre, on peut se poser la question de savoir comment allouer les tâches une fois que l'on a identifié quel agent peut traiter quelles tâches et comment gérer le cas d'une même tâche traitée par plusieurs agents. Cette question a été soulevée dans la littérature [Ferber 1995] et on peut trouver deux types d'allocation une qui est appelée directe et une autre qui utilise un mécanisme de délégation.

La méthode d'allocation directe concerne directement les agents. Lorsque une tâche quelconque T_i arrive pour être exécutée auprès d'un agent, si ce dernier est pris ou n'a pas la compétence pour sa résolution, alors il cherche dans son réseaux si parmi les agents qu'il connaît il y a des possibilités de déléguer cette tâche à quelqu'un. On fait également l'hypothèse qu'un agent ne peut se connecter qu'aux agents qu'il connaît directement. Ceci veut dire que son réseau de connaissances est limité au départ. Le bémol dans ce type de construction est le souci de s'assurer qu'il existe au moins un agent qui sera capable de prendre en compte l'exécution de la tâche. Il est possible alors de suggérer l'insertion d'un mécanisme de médiateur. Ceci permet de toujours trouver une solution pour une tâche qui arrive. On peut également insérer une notion de priorité des choix parmi les agents qui peuvent effectuer la tâche T_i . L'allocation par délégation exploite le fait que tout agent connaît les capacités de ses voisins qui, à leur tour connaissent les capacités de leurs propres voisins. Ici on peut parler de parcours d'un graphe lorsque l'on cherche un agent capable de prendre en charge une tâche. On parcourt alors le graphe en largeur et en profondeur, par des algorithmes bien connus et utilisés dans les systèmes multi-agents. Dans ce genre de situations, on peut imaginer la gestion de plusieurs demandes simultanées vers des agents différents pour une seule tâche et inversement, l'arrivage de plusieurs réponses positives pour la gestion d'une tâche vers un agent demandeur. C'est une situation bien connue que l'on va rencontrer également dans la construction de notre prototype. Dans la littérature les grands systèmes multi-agents utilisent des algorithmes de parcours de graphes en profondeur et ceux-ci couplés à des algorithmes parallèles pour une optimisation du temps. Dans notre prototype on n'ira pas aussi loin, mais ceci reste quand même une piste explorable par la suite. Un algorithme peut être utilisé pour la gestion de ces situations :

- (a) On dispose d'un module d'évaluation des demandes qui soit propose une offre, soit transmet la demande à un autre agent ;
- (b) On dispose d'un module de délégation qui doit envoyer les demandes et réceptionner les messages des agents répondant à ces demandes ;
- (c) On utilise un module d'évaluation des propositions, qui se charge de choisir l'offre la plus convenable et ne tient pas compte des autres ;

Le problème de ce type de réseaux est, bien évidemment, la mise à jour de la mémoire des agents et de la matrice d'adjacence qui contient le réseau accessible directement par chacun. Il faut donc remédier à cela en utilisant des algorithmes de mise à jour des réseaux d'accointance. Une solution existante

est de proposer un groupe d'administrateurs, chacun étant placé à un noeud connexe du graphe.

3. L'allocation par appel d'offre.

On définit l'allocation par appel d'offre comme dans les études en économie. En effet, on représente un demandeur de services et des offrants. De plus on évalue les offres avant de prendre la décision qui est la meilleure. En général l'appel d'offre s'évalue en quatre étapes.

- (a) La première étape consiste à faire l'appel d'offre, on envoie la description de la tâche et ceci uniquement à ceux que l'on estime capables de l'effectuer ;
- (b) La deuxième étape oblige les offrants à trouver une solution à la tâche et de donner une réponse à l'administrateur qui fait l'appel d'offre ;
- (c) Dans cette troisième étape l'administrateur de l'offre reçoit les offres et évalue leur pertinence ;
- (d) Dans la dernière étape, l'offrant choisi par l'administrateur est demandé pour confirmation de l'accomplissement de la tâche.

Dans ce genre de modélisation on dispose d'algorithmes, faisant appel à un ou plusieurs administrateurs qui gèrent les offres et les demandes (voir figure 2.13, page 47).

Pour l'algorithme avec un seul administrateur, l'administrateur peut faire partie des offrants. Dans ce cas on va toujours distinguer les rôles d'administrateurs et d'offrant car ils correspondent à des obligations différentes. L'algorithme avec un seul administrateur possède deux séparés comme il suit :

- Un premier qui donne la définition de l'offre et qui gère la réception des propositions. En premier lieu, il connaît bien les agents et leur nombre ce qui lui permet de compter le nombre de réponses obtenues et de savoir s'il doit en attendre des nouvelles. De plus, ce premier module mémorise les propositions des agents ayant répondu positivement à la demande ;
- Le deuxième module est en charge de l'acceptation et du refus donnés de la part des agents. Suite aux réponses données par les agents, l'administrateur établit les contrats qu'il donne aux agents pour que les demandes soient effectuées. Dans les systèmes multi-agents, les contrats proposés peuvent être soit acceptés par les agents, soit refusés. Il est plus difficile de gérer les deux options à la fois, et la plupart du temps, les concepteurs préfèrent appliquer une façon itérative pour donner une solution simple. Cependant, une bonne partie de la modélisation est basée uniquement sur le principe de l'acceptation totale des offres, car c'est la manière la plus simple de modéliser ce genre de systèmes.

Faisons maintenant la différence avec le cas de plusieurs administrateurs. Dans ce cas de figure, on devra gérer les multiples envois de demandes de la part de l'administrateur et d'offres de la part des agents. Les problèmes

pouvant survenir sont d'ordre prioritaire du point de vue des agents. En effet, comme il ne connaissent pas à l'avance les tâches qu'ils doivent accomplir, ils ne peuvent pas les prioriser et leur choix n'est limité à un instant donné qu'aux demandes qu'ils connaissent au moment de la prise de la décision. Il en est de même pour les administrateurs. Si les administrateurs connaissaient en avance les demandes à gérer, il leur serait plus facile de pouvoir attribuer les bonnes demandes aux agents les plus performants, du point de vue de la fonction d'évaluation dont ils disposent pour classer les compétences des agents.

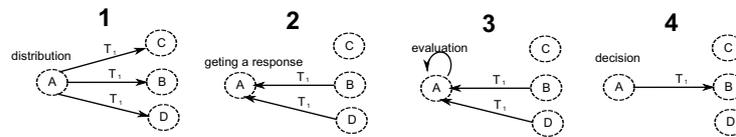


FIGURE 2.13 – Processus par appel d'offre. Étape 1. diffusion de l'offre. Étape 2. récupération des réponses. Étape 3 évaluation des réponses. Étape 4 décision. L'agent A est l'administrateur et T_1 la tâche à effectuer par les agents B, C et D.

Regardons maintenant les caractéristiques de l'allocation par appel d'offre. Il s'agit ici de lister quelques propriétés des actions entreprises par l'administrateur dans le cas d'un ou plusieurs administrateurs. Dans la suite sont décrites les capacités et les faiblesses qui apparaissent dans les deux modules de l'algorithme d'allocation par appel d'offre.

- Le langage des élaborations des contrats.

Ce langage a été introduit avec un niveau d'abstraction élevé par Smith [Smith 1980]. En effet, ce langage regroupe la définition des qualités requises pour qu'un agent puisse effectuer la tâche de la demande courante. Cette propriété permet de facilement éliminer des agents ne correspondant pas aux demandes. On doit également définir la forme de la proposition en précisant les critères de la demande. Ceci permet aux agents offrant de pouvoir répondre positivement ou négativement en fonction de leur disponibilité. Enfin, le langage d'élaboration des contrats est caractérisé par une date limite à laquelle tous les agents offrants doivent répondre, sinon leurs offres ne seront pas prises en compte. Cette date d'expiration doit être fixée par le système ou bien être ajustée en fonction de son fonctionnement ;

- Évaluation par les agents de la proposition.

Lorsqu'une demande est envoyée aux agents du système, chacun d'entre eux évalue la proposition et donne une réponse en fonction de ses capacités et disponibilités ;

- Adressage des offrants.

Dans ce type de système, l'administrateur connaît tous les agents par le biais de sa table d'accointance. Il s'en suit qu'il est capable d'envoyer les messages aux agents et ensuite attendre pour évaluer les réponses. Dans la

littérature, la modélisation la plus utilisée et adaptée est celle de l'anneau à jeton qui permet de pouvoir passer le message à tous les agents. Malgré sa simplicité, cette méthode devient vite lente si le nombre d'agents est important. En effet, elle consiste à transmettre séquentiellement le message à tous les agents. Il est alors bien plus judicieux de penser à une parallélisation possible de ce mécanisme, lorsque cela est possible. Parunak propose également une méthode d'indexation des agents aux tâches qu'ils sont capables d'accomplir [Parunak 1990]. En effet, le type de tâches à effectuer étant différent, les agents sont indexés en fonction de leurs capacités vis à vis de la demande de cette tâche. L'emploi de cette méthode implique une simplification de la table d'accointance de l'administrateur. Par conséquent on gagne en rapidité d'exécution ;

– Date limite.

La date limite peut poser problème dans ces systèmes à administrateur. En fonction du choix fait pour la date limite, on doit être conscient que : plus la date limite est proche de la date courante de la demande, moins de temps ont les agents pour répondre et évaluer leurs compétences. Par conséquent, cela veut dire que l'administrateur reçoit moins de réponses et le choix est moindre. Au contraire, la date limite étant trop éloignée, les offres reçues sont bien trop nombreuses et l'évaluation est bien trop lente. Il s'ensuit que le choix de cette date doit être judicieusement fait en fonction des besoins du système ;

– Engagement et réservation, rejet des contrats.

Lorsque les agents reçoivent les demandes de la part du et des administrateurs, ils doivent les évaluer et les accepter ou bien les rejeter. Des difficultés peuvent apparaître à cause de la surcharge des agents ou bien de leur inefficacité. Trois grands types de solutions sont proposés dans la littérature sous la forme de trois grandes branches. Il s'agit d'une solution que l'on va appeler prudente. Elle consiste en la réservation de toutes les ressources nécessaires pour accomplir les tâches que l'agent offrant peut faire. Dans ce cas on suppose que cet agent ne refuse pas des demandes et réserve toutes les ressources nécessaires pour elles. Une deuxième solution est celle dite de compétitivité. Avec cette méthode, on ne réserve ni espace, ni ressources. Dès que l'agent est surchargé de travail, il commence à refuser des demandes qu'il aurait pu prendre s'il avait fait sa réservation de ressources auparavant. Et enfin, une solution intermédiaire consiste en l'évaluation de chaque demande acceptée. On doit attribuer une probabilité estimée d'effectuer la tâche et puis un gain probable en la faisant pour l'agent, ce qui nous montre avec plus de sûreté quelle est la tâche la plus prioritaire dans la liste des propositions. Cette évaluation provient des théories de la micro-économie ainsi que des théories de la théorie jeux [Zlotkin 1993].

4. L'allocation en passant par des sous-contractants.

Introduisons la notion d'enrôlement d'agents. Cela décrit le cas de figure de

décomposition d'une tâche arrivant vers un agent. En effet, l'agent décide qu'il décomposera la tâche T en plusieurs sous-tâches t_1, \dots, t_n qu'il peut proposer en tant que demandes à effectuer aux autres agents. La structure du système est alors la suivante : on dispose d'un administrateur qui gère les demandes générales ; ensuite, chaque agent qui reçoit une demande peut jouer le rôle d'un sous-administrateur, décomposer une demande et chercher des offrants pour chaque sous-partie. On appelle alors les agents effectuant les sous-tâches des sous-contractants et l'effet qui se produit est l'enrôlement d'agents. Ce processus peut se répéter tant que la tâche courante du point de vue d'un agent peut être décomposée (figure 2.14). Ce qui complète cette méthode est le fait qu'un agent ne devra pas prendre en charge une tâche s'il n'a pas reçu la réponse de tous ses sous-contractants. Donc le retard dans la réponse pour une demande peut être important.

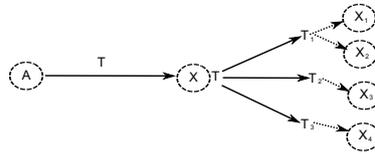


FIGURE 2.14 – Décomposition d'une tâche D en sous tâches T_1, T_2 et T_3 . L'agent X contacte ses sous-contractants X_1, \dots, X_n .

D'après la figure 2.14 et l'explication du processus de l'enrôlement, on voit qu'il survient un problème récursif de décomposition des tâches. Les solutions qui peuvent exister sont les suivantes :

- Première solution dite de l'engagement rapide.
Elle consiste en l'acceptation de toutes les propositions arrivant à un agent. Le problème qui apparaît avec cette méthode est le refus spontané des demandes pour lesquelles l'agent n'a pas les ressources nécessaires ;
- Deuxième solution : engagement tardif.
On ne peut donner une réponse tant que l'on n'a pas reçu la confirmation de tous les sous-contractants. Ce mécanisme est assez compliqué à gérer car on doit maîtriser les demandes mais aussi les refus des agents, et en dernière place faire attention aux blocages (utilisation d'une même ressource) ;
- Utiliser des sous-contractants propres, solution de stabilité. On attache des sous-contractants à un agent administrateur. Chaque administrateur dispose de son réseau de sous-contractants et, de leur côté, les sous-contractants ne répondent aux demandes que de leur propre administrateur. Cette est une solution stable pour un système.

Les avantages d'un système par sous-contractants sont considérables, mais pas moins importants que les désavantages. Il est d'ailleurs préférable de choisir le système que l'on veut utiliser en fonction des besoins. Un système utilisant des sous-contractants est simple à concevoir et dynamique du fait que l'on ne gère pas une table d'accointance. Pour la relation client - fournisseur, on utilise

un accord entre les deux, ce qui donne la possibilité d'intégrer des paramètres comme la compétence de l'agent, sa charge courante, la date limite de réponse. En ce qui concerne les inconvénients, on doit mentionner que l'exécution est lourde à cause des nombreux messages entre les administrateurs et les offrants. On peut penser à proposer une parallélisation du système, mais les méthodes parallèles ont aussi leurs problèmes. Il est donc plus utile de se restreindre autant que possible dans la quantité des appels d'offres. Ainsi, on préfère les réseaux de faible importance en offres, car si les agents doivent faire un choix trop compliqué, cela devient vite gourmand en temps à gérer ;

5. Allocation hybrides

Pour résumer le réseau avec une table d'acointance, on dira que les administrateurs connaissent par avance les capacités des agents et donc cette allocation est plus rapide que celle avec des sous-contractants. Dans le réseau des sous-contractants les administrateurs ne connaissent pas les possibilités des agents offrants. Il faut donc lancer un appel d'offre pour pouvoir récupérer l'information nécessaire. Deux solutions existent pour les réseaux hybrides, la première consiste à confirmer les petites tâches à la partie réseau par accointances et les grandes tâches à la partie réseau par appels d'offres. La seconde solution consiste à appliquer un apprentissage du réseau d'acointance par le réseau d'appels d'offres.

2.7.4 La coordination

En général, on a besoin de la coordination pour pouvoir gérer les tâches des agents, leurs ordonnancement et les séquences suivant lesquelles elles seront exécutées dans l'environnement. On peut donner une définition brève de la coordination.

Définition : Coordination

La coordination est un ensemble d'actions supplémentaires et nécessaires pour organiser la suite d'actions de tous les agents en vue de l'amélioration de la performance du système.

On ne doit pas oublier que les agents abandonnés à eux mêmes ne seront pas capables de gérer la succession d'actions qui leur est nécessaire pour pouvoir collaborer.

On peut mentionner quatre lignes générales pour lesquelles on aura besoin de bien modéliser la coordination. Le premier critère est que l'on a besoin de l'information que les autres agents possèdent. Ceci est, bien sûr, basé sur la connaissance des agents des capacités des autres agents dans l'environnement et la perception de l'environnement lui-même. Le deuxième critère représente la limitation des ressources. En effet, l'utilisation séquentielle ou bien mutuelle de ressources peut poser problème. On doit bien optimiser le temps d'utilisation de la ressource en question pour qu'un maximum d'agents puissent l'utiliser. De même il est nécessaire de penser à une coordination des actions qui évite les inter-bloquages. En plus de l'optimisation du temps, une bonne coordination doit aussi prendre en compte le coût

que cette ressource peut évoquer. En dernier critère, on peut placer les différents objectifs des agents qui, par définition, doivent être accomplis, même si leur collaboration est par ailleurs indispensable. Il nous faut donc coordonner les actions des agents du système pour que l'objectif commun soit réussi, si toutefois il est bien défini. Pour clarifier la situation des objectifs différents et de l'utilisation d'une même ressource, on peut imaginer deux agents qui doivent l'utiliser successivement, ou bien en même temps. Il faut alors trouver un bon algorithme permettant d'optimiser l'utilisation de la ressource pour que les agents puissent être satisfaits, pour que cela ne soit pas trop demandeur en temps, et pour que la ressource ne revienne pas trop cher en terme de consommation.

2.7.4.1 Le problème de la coordination

Pour résoudre le problème de la coordination, on doit spécifier pour chaque agent du système quel est l'agent duquel il obtient l'information qui lui est nécessaire, et quel est l'agent qui aura besoin de l'information que l'agent en question va produire en sortie.

Par la suite, il est utile de se poser la question des dépendances entre les actions des agents. Plus précisément, il s'agit ici de la satisfaction des contraintes de succession entre les actions que les agents veulent accomplir. Pour cela, on peut faire appel aux heuristiques utilisées dans la planification et l'ordonnancement. La ligne principale qui guidera nos actions sera celle qui nous permet de modifier le moins possible le comportement des agents les plus contraints [Uhrmacher 2009, Zeghal 1993].

Il est également d'usage de définir les différents types de relations qui existent dans le système que l'on est en train de construire (figure 2.15).

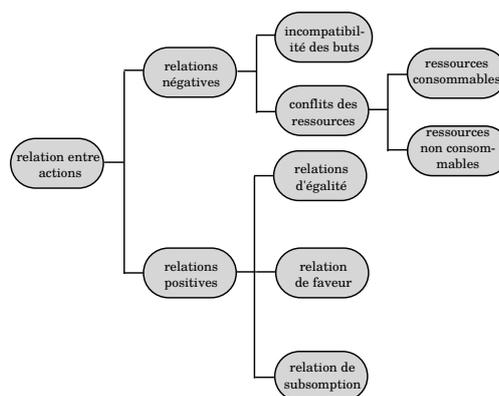


FIGURE 2.15 – Relations entre les actions

Les caractéristiques les plus importantes de l'architecture de la coordination sont :

1. La caractéristique temporelle.

La système de coordination est géré en optimisant sa rapidité, son adaptabilité et de sa prédictivité. Tout ces termes se rapportent à l'apparition d'un

nouvel évènement n'étant pas connu auparavant et qui ne s'étant jamais produit devant l'existence du système multi-agents. On se doit donc de gérer les réactions du système tout entier en passant par la coordination des actions. Car c'est de cette façon que l'on obtiendra un résultat maximal au niveau de la gestion de l'évènement inconnu ;

2. La caractéristique organisationnelle.

On pense ici aux structures organisationnelles du système multi-agents : mode de communication choisi et degré de liberté qu'on laisse aux agents pour qu'ils puissent agir d'eux-mêmes face aux nouveaux obstacles qui peuvent apparaître. Les différents types de structure des systèmes (distribués et centralisés) ne réagissent pas de la même manière à la communication, les systèmes distribués étant nettement plus agiles que les systèmes centralisés. De plus, le degré de liberté attribué à chaque agent est considéré comme une caractéristique importante pour que les agents puissent s'adapter aux différents évènements ;

3. La caractéristique définissant la qualité et l'efficacité.

La qualité et l'efficacité se rapportent à la gestion des conflits entre les agents pour l'accès à une ressource. Ces conflits dépendent également du nombre total des agents qui sont en train de communiquer. On peut aussi penser à définir une mesure de cette qualité, en définissant une limite à partir de laquelle on considère que le nombre de connections des agents pour une ressource est trop important et que l'on doit ne pas dépasser une borne limite au delà de laquelle apparaît un risque d'engorgement ;

4. La caractéristique de la réalisation.

On va penser à contrôler la qualité de l'information que l'on va récupérer avant d'effectuer une tâche et après sa réalisation. Cela veut dire que l'on préférera une communication plus simple, car le nombre d'interconnexion entre les agents est faible. De cette manière, le passage de l'information est bien plus fiable et le réseau n'est pas encombré par le nombreux paquets d'information qui peuvent circuler entre les nœuds du réseaux.

A cette propriété on peut rajouter la représentation des agents que les agents se font d'eux même, ainsi que leur degré de connaissance des "voisins". Dans cette mesure on peut également inclure la représentation de l'environnement. On peut donc conclure que cette manière de gérer la connaissance des agents est basée sur le nombre de connexions qu'ils ont entre eux, i.e. plus ils ont de connexions, plus ils ont une facilité d'approche entre eux pour se faire passer des messages sur les tâches à accomplir. Il est donc utile de définir une mesure à partir de laquelle on considère que la coordination est bien construite et efficace, car sa réalisation s'avère assez difficile compte-tenu du nombre de paramètres à prendre en compte.

5. La caractéristique de la généralisation.

La caractéristique de la généralisation peut se résumer en quelques grandes propriétés :

- (a) On parle tout d'abord de l'hétérogénéité.
Elle est caractérisée par les différents caractères que les agents peuvent avoir i.e. les différents rôles que les concepteurs leur ont confiés. La difficulté que l'on peut rencontrer est la collaboration et la coordination commune pour que les buts spécifiques de chaque agent dans le système soient accomplis en même temps que leur but commun également ;
- (b) La généralité.
Le terme de généralité désigne que l'aptitude d'une méthode à être suffisamment large pour pouvoir décrire un grand nombre de cas sans trop de difficultés et suffisamment étendue pour que les extensions soient faciles. C'est une généralisation qui au premier abord, peut paraître très importante, mais plus on a tendance à faire des méthodes de modélisations générales, plus on a du mal ensuite à gérer les cas particuliers car on sera moins efficace en terme de temps d'exécutions.

2.7.4.2 Les différentes formes de la coordination

On a quatre formes de coordination : par synchronisation, par planification, par réaction et par réglementation.

- Synchronisation.

Il s'agit d'ajuster les actions des agents pour qu'elles puissent se dérouler au bon moment. En général, la synchronisation des agents est importante. On peut utiliser les réseaux de Petri pour cela, sans oublier de synchroniser l'accès à une ressource, éviter les inter-blocages etc.

- Planification.

La planification des systèmes avec un nombre d'agents important est compliquée. Le problème survient à un premier niveau de difficulté venant du nombre important d'agents. En effet, plus on a d'agents dans le système, plus on a de difficultés pour coordonner leurs actions. Le temps d'exécution de ces systèmes est pondéré par le nombre d'agents dans le système. Les modèles dit STRIPS [Ferber 1995] ont été les premiers à avoir traité ce genre de problèmes mais uniquement pour les systèmes mono-agents. Leur efficacité pour les systèmes multi-agents est bien moins impressionnante du fait que la représentation atteint ses limites lorsqu'il s'agit de représenter des actions entre plusieurs agents.

Rappelons la définition d'un processus : c'est une abstraction d'une action qui peut être décomposée en plusieurs sous-actions jusqu'à arriver à des sous-processus dits atomiques qui ne sont pas décomposables. Un processus peut être décomposé en d'autres sous-processus. Il est considéré comme exécuté en employant le produit des états de ses sous-processus, et un état peut être considéré comme un sous-but de chaque processus.

Je vais, à ce stade, présenter quelques modes de planification pour les systèmes multi-agents. Comme la planification des systèmes multi-agents repose sur des plans, chaque plan étant un état stable du système, par lequel ce

dernier doit passer pour arriver à son but final, nous devons trouver une planification convenable pour la construction des plans et ensuite pour la résolution de chacun de ces plans. Chaque sous-plan est appelé un plan partiel et, bien évidemment, un plan partiel doit voir ses buts accomplis.

1. Planification centralisée pour les agents multiples.

Dans ce cadre de représentation on n'a qu'un seul agent qui pilote toute la centralisation ainsi que les buts des plans partiels. La technique employée se résume en trois points. On cherche d'abord un plan général partiel, qui puisse être exprimé sous la forme d'un graphe acyclique. Ensuite on cherche les branches qui peuvent être exécutées en parallèle. Ensuite on veut synchroniser et allouer correctement les tâches. On peut considérer que l'allocation peut être statique ou dynamique ;

2. Coordination centralisée pour les plans partiels.

Dans ce cas, chaque agent construit son plan partiel et ensuite l'envoie à un coordinateur. Le coordinateur de tous les plans, englobe ces derniers et construit un plan global visant le but du système. On peut parfois procéder à une fusion des plans pour simplifier la multitudes de plans partiels. La fusion des plans est effectuée en identifiant les points semblables dans les buts des plans partiels de chaque agent. La fusion des plans n'est guère possible lorsque les agents ont des buts incompatibles. Lorsque l'on est face à des actions positives entre les différents plans partiels, la fusion est bénéfique. On obtient un nouveau plan plus efficace et optimal que les deux précédents. Si l'on doit faire face à des actions négatives, la fusion n'est pas impossible, il faut juste remarquer que cela ne va pas nous apporter des performances extrêmes, mais on peut tout de même essayer de paralléliser les actions des agents pour améliorer le nouveau plan obtenu ;

3. Coordination distribuée pour les plans partiels.

Dans cette modélisation, le coordinateur doit arriver à satisfaire les plans partiels de chaque agent, mais également le but de tout le système. Faisons quelques hypothèses qui tendent à simplifier la modélisation de ce genre de systèmes. On suppose en général que le raisonnement de tous les agents est homogène. Cela veut dire que, se trouvant dans les mêmes conditions et ayant les mêmes buts, les agents vont utiliser la même méthode pour arriver à leurs fins. On peut également supposer que les agents sont réguliers, c'est-à-dire qu'ils vont accomplir le but pour lequel ils ont été désignés. On peut penser ici à limiter le nombre d'agents dans le système pour éviter de se retrouver avec trop de buts différents à faire converger vers le but unique du système. Il faut également faire attention de ne pas mettre en péril l'accès à une ressource qui est limitée dans le temps. Ces petits problèmes peuvent se résoudre par la hiérarchisation des plans ou bien par le fait de faire respecter les engagements des agents. On peut également intégrer une stratégie de fonctionnement, consistant

à dire que lorsque surviennent des évènements bien connus, on est capable de les gérer. Si toutefois des évènements inconnus surviennent, la planification sera changée sur le tas, pour pouvoir les prendre en compte ;

– Réaction.

C'est la modélisation du système sans inclure la planification. On se retrouve à gérer des agents réactifs, qui n'ont pas connaissance de leur voisins ni de l'environnement. Cela veut tout simplement dire qu'il ne mémorisent pas les évènements qui ont eu lieu dans le passé. On applique alors des méthodes de coordination d'agents situés. Il existe deux méthodes :

1. Les agents arrivent à accomplir leurs buts, tout en s'évitant pour ne pas se gêner dans leurs actions ;
2. Lorsqu'il s'agit d'utiliser une ressource commune, il est nécessaire d'intégrer des mécanismes de synchronisation.

Il existe ici une solution par des agents dits éco-agents. Leur propriété se résume à la satisfaction de leur propre but. Voici comment décrire un tel système :

- On n'explore pas l'état global des différents états du système. On ne s'occupe que des états internes de chaque agent ;
 - L'arrivée des perturbations dans ce type de système n'influe pas sur son état global ;
 - Un noyau pour tout le système est créé, il coordonne les actions des agents, tout en étant indépendant du but principal du système. En effet, il gère les interactions entre les agents ;
 - Chaque agent est caractérisé par un but interne, qu'il cherche à satisfaire, par des actions élémentaires permettant de satisfaire son but et par une perception des gêneurs (ce sont les agents qui le gêne pour qu'il réalise son but). Le comportement d'un tel agent est donc caractérisé par sa volonté de d'être satisfait, et d'autre part, par l'obligation de fuir de gênes probables des autres agents ;
 - Pour compléter le système on ajoutera les dépendances entre les agents, qui doivent être respectées.
- Réglementation.

Dans la gestion de ce cadre de problèmes, on fait assez souvent une base de règles pour pouvoir gérer tous les conflits qui peuvent survenir lors de la gestion du système.

2.8 Conclusion

Ce chapitre est la présentation des concepts utilisés pour la simulation et les systèmes multi-agents. Nous nous inspirons des définitions et des propriétés mentionnées pour pouvoir les déployées lors de la construction du prototype logiciel, sujet de la thèse. Pour pouvoir modéliser l'environnement complexe des centres

de radiothérapie et décrire leur fonctionnement nous utilisons les systèmes multi-agents. En effet, les centres hospitaliers sont modélisés comme des acteurs dans le prototype logiciel. De la même manière les patients sont également des acteurs, présents dans l'environnement que l'on créé. Les patients et les centres sont capables de communiquer et d'échanger. Nous nous servons de la théorie multi-agents pour décrire ces deux acteurs comme des agents situés, qui ont des perceptions de l'environnement et qui agissent en fonction de leurs intentions. Ainsi, nous modélisons la communication et la réaction des agents. Nous utilisons pour cela les concepts de la communication, ainsi que la perception des agents pour l'environnement. Nous utilisons également un médiateur pour la gestion des différents agents faisant partie du prototype, ce qui permet une gestion centralisée des tâches à accomplir par les agents. Notre modélisation inclut une hiérarchie pour la construction du prototype, ainsi que l'utilisation des concepts des tableaux noirs. Enfin, nous utilisons la simulation pour pouvoir se situer dans différents cas d'étude correspondant au fonctionnement des centres de radiothérapie et leurs concurrence.

Le chapitre suivant présente le contexte de l'étude, les difficultés à résoudre et les solutions apportées.

Introduction à la problématique globale

3.1 Se situer dans le contexte de l'étude

Le travail on aborde la prise en charge des thérapeutiques innovantes du cancer. On s'intéresse plus particulièrement aux thérapeutiques telles que : le cyberknife, la stéréotaxie et l'hadronthérapie. Dans ce paragraphe nous présentons les difficultés liées à la prise en charge des soins innovants. Pour permettre une vue globale de l'ensemble de la problématique nous proposons les trois points principaux suivants :

- La prise en charge vue par les centres radiothérapeutiques proposant des soins innovants aux patients.

Il s'agit de la qualité de l'offre de soins, de la rapidité de la prise en charge et de la qualité de la vie du patient après le traitement (aussi appelée bénéfice médical). L'adéquation entre la qualité du soin, son coût et le bénéfice médical rendu est la plus forte inquiétude des centres hospitaliers.

- La prise en charge ressentie par le patient.

Le patient est celui qui accepte ou non une offre de soin. Un patient, de son point de vue, peut prendre la décision d'accepter une offre de soin, tout en étant conscient des caractéristiques de cette dernière. Une offre de soin peut être basée sur des traitements innovants, ou des traitements bien connus et évalués. Une proposition de soin, couplée à la renommée du centre inspire un certain degré de confiance chez un patient. Le patient doit être également en connaissance du bénéfice médical, de son traitement, avant de prendre une décision d'acceptation de prise en charge. En effet, le bénéfice médical des techniques innovantes est souvent peu connu.

- La prise en charge proposée par l'assurance maladie française.

Nous nous situons dans le cadre d'une étude basée sur la France. Ainsi, la politique médicale de l'assurance maladie doit être prise en compte. Les thérapeutiques innovantes sont particulièrement concernées. Étant peu connues, elles sont souvent mal prises en charge par les organismes de sécurité sociale.

Dans la situation actuelle des soins proposés contre le cancer, beaucoup de questions apparaissent de la part des autorités de soins. Ces questions sont concentrées autour de l'efficacité des traitements innovants proposés et des centres thérapeutiques les proposant. En effet, nous sommes dans un système de soins qui se veut

équitable et accessible pour ses bénéficiaires. La sécurité sociale française se situe dans un cadre de remboursement des soins des patients, tenant compte de la hauteur du coût et de la qualité du traitement. À ces facteurs, sont rajoutées, les contraintes de pouvoir proposer un réseau de soins suffisamment large et accessible pour le public. Cette situation problématique d'utilisation des techniques nouvelles est difficile à résoudre. En effet, elle implique des facteurs à la fois efficience économique et de bénéfice médical. Ce dernier a un poids important par son critère d'efficacité. De plus, l'utilisation de thérapeutiques innovantes, implique leur prise en charge par les centres de radiothérapies les proposant, mais également leur remboursement par la sécurité sociale. En effet, le rôle de la sécurité sociale est important. Il est essentiel pour les organismes hospitaliers et pour les patients, par le remboursement des soins. Pour les patients un soin remboursé inspire plus de confiance qu'un soin innovant, non encore pris en charge. En tenant compte de ces conditions, quelle est la bonne décision à prendre concernant la répartition entre le bénéfice médical attendu, pour un traitement innovant, et son remboursement ? En effet, c'est la raison principale pour laquelle les organismes hospitaliers ressentent le besoin d'estimer son efficience. De plus, ils doivent également pouvoir estimer leur position médicale par rapport à la concurrence existante, le but des hôpitaux étant d'être en mesure de répondre à la demande des patients de façon optimale.

Nous cherchons à répondre à la problématique de l'évaluation médico-économique des centres de radiothérapie. De plus, nous nous situons dans le contexte de remboursement des soins sur le territoire français. Nous tenons également compte de la concurrence des organismes hospitaliers sur ce territoire. Ce facteur est important car il représente à la fois la compétition entre les centres médicaux, pour l'utilisation des thérapeutiques innovantes, mais aussi leur comparaison avec les techniques déjà existantes et bien connues. C'est un paramètre de plus, qui se rajoute au problème précédent. En utilisant la comparaison des stratégies thérapeutiques, nous pouvons estimer leur efficacité. Ainsi, nous comparons non seulement les techniques innovantes entre elles, mais également par rapport aux offres déjà existantes dans le monde médical. Dans ces conditions, il reste légitime de se demander quelle sera la position de l'assurance maladie en France sur la prise en charge éventuelle de ces techniques innovantes. En effet, la comparaison des techniques innovantes avec les techniques existantes permet la mise en évidence de leur efficacité ou non. Ceci permet une prise de décision plus exacte et appuyée sur l'estimation de l'efficacité estimée des traitements.

Pour compléter la description du problème ainsi posé, nous devons également tenir compte des réseaux de soins. En effet, les réseaux de soins sont indispensables si l'on veut avoir une mise en place de la concurrence des établissements hospitaliers. Il n'est guère possible de tenir compte de la compétition médicale et à la fois économique sans utiliser les réseaux de soins. Par réseau de soins on entend non seulement la position géographique des centres et les relations existantes entre eux pour le soin des patients, mais également l'accès des patients aux hôpitaux. Ainsi, l'accès aux soins sur le territoire étudié doit également être pris en compte. D'où il apparaît la nécessité de représenter la géographie de façon fine, de manière à pouvoir

étudier les relations créées dans les réseaux de soins entre les acteurs participants. Les acteurs principaux de l'étude sont les centres hospitaliers et les patients.

Avec l'apparition des techniques innovantes, la création des nouveaux centres les proposant, ou de nouveaux services dans les centres existants, devient d'actualité. Lorsque les techniques visées sont prometteuses au niveau de l'évaluation économique et médicale, les complexes hospitaliers désirent les évaluer. L'évaluation consiste tout d'abord à inclure ces nouvelles techniques dans leur offre de soin pour estimer leur impact sur le fonctionnement global du centre. Ainsi, la construction et/ou la création de nouveau noyaux de soins et/ou de centres de radiothérapie est une des questions traitées dans ce manuscrit.

3.2 Les problèmes à résoudre

Compte tenu du contexte large de la problématique, nous devons identifier les problèmes à résoudre. Les centres de radiothérapie doivent être évalués, à la fois, sur leur positionnement économique et médical. De plus, nous devons tenir compte d'une géographie et d'une concurrence entre les organismes hospitaliers. L'étude est organisée en portant l'attention sur l'évaluation médico-économique des centres hospitaliers.

Puisque nous devons évaluer les patients et les centres dans une géographie de compétition, nous voulons les caractériser par une position géographique. Ainsi, la modélisation de la géographie dans cette étude prend une place importante, exprimant en premier lieu la distance. Elle est également le référentiel spatial de la position des acteurs principaux de l'évaluation médico-économique. Nous devons inclure dans la description géographique une proposition permettant d'exprimer la distance entre les acteurs. De plus, lorsque l'on parle de distance, nous devons inclure la notion de réseaux de soins. La distance nous permet de créer les liens, non seulement géographiques mais aussi d'attractivité entre un patient et les centres de soins. Les réseaux de soins et l'attractivité sont deux facteurs qui doivent faire partie de l'évaluation médico-économique prévue. Il n'est guère facile de représenter un réseau de transport, tout autant que de prendre en compte un réseau de soins. Ceci devient d'autant plus complexe à modéliser lorsqu'il s'agit d'un centre de soins nouvellement créé, qui n'a pas encore évalué sa capacité d'accueil, ni son "attractivité médicale" auprès des "futurs" patients intéressés.

Les deux acteurs principaux de l'étude, à savoir les patients et les centres, sont référencés par leur position géographique. Il reste à trouver comment représenter les liens, qui font qu'un patient choisit un centre de traitement, parmi les offres de traitement disponibles. La première caractéristique de ce choix, qui doit être modélisée, est le médecin traitant et son rôle. Dans le cadre de cette étude, et en tenant compte de l'organisation des soins en France, nous faisons l'hypothèse de prendre en compte le rôle du médecin traitant. Ce dernier est représenté par un mécanisme interne. Le rôle du médecin traitant est exprimé par la proposition de différents traitements au patient, tout en faisant la connexion avec les établissements suscep-

tibles de prendre en charge le patient. Lorsque le patient, guidé par son médecin, a pris connaissance de sa maladie et des traitements existants, il doit décider s'il accepte un traitement innovant ou standard. Dans le cas où le système d'assurance maladie ne tient pas compte d'un médecin traitant, c'est au patient de trouver les traitements alternatifs. De plus, il doit se renseigner sur les centres pouvant le prendre en charge en faisant la demande auprès des établissements hospitaliers. Le médecin traitant représente la relation entre les patients et les spécialistes dans les établissements de soins appropriés, pour la prise en charge de la maladie.

Le pas suivant vers la description des liens, entre un patient et le choix d'un traitement est l'évaluation de la qualité de ce traitement. Pour un patient, le choix du traitement est d'une grande importance. En effet, en tenant compte de son état global, le patient exprime son jugement par rapport aux différents traitements proposés. De plus, compte tenu de la description médicale des traitements proposés, nous devons trouver une méthode pour inclure l'évaluation du traitement. Une caractéristique supplémentaire à modéliser, dans cette étude, est la réticence du patient concernant un traitement innovant. En effet, un traitement innovant est source d'un nouvel espoir, mais provoque également la peur d'une méthode non expérimentée. À ce facteur, influencé par l'état global du patient, il ne faut pas oublier de rajouter l'état d'avancement de la maladie, qui peut nécessiter un traitement urgent. Les réticences considérant une maladie grave éventuellement urgente, doivent être modélisées, car elles représentent un facteur important de décision.

Pour que la description de ce choix important fait par le patient soit complète, il est essentiel de prendre en compte l'attractivité des centres hospitaliers auxquels le patient a accès. Ce facteur complexe, que l'on peut appeler attractivité tient compte de notions telles que la distance géographique, les réseaux de transport ou les réseaux de soins. Il est également important de prendre en compte l'association de cette attractivité au traitement proposé. Le patient peut, non également le centre dans lequel ce dernier sera effectué. Un traitement, sans tenir compte de son caractère innovant ou non, n'est parfois accessible qu'à une distance conséquente du domicile du patient. Ceci est une raison forte de refus des traitements, en tenant compte à la fois de l'âge du patient, de son environnement familial et de l'accessibilité aux soins.

Un centre hospitalier doit prendre en compte plusieurs critères pour pouvoir proposer un soin de qualité et dans les meilleures conditions possibles. Un organisme de soins doit répondre aux exigences d'installation des machines concernées et de leur utilisation. L'utilisation et l'entretien sont des facteurs non négligeables, compte tenu de l'installation difficile et du coût d'investissement élevé. De plus, un centre de radiothérapie doit installer et utiliser les machines, mais également préciser de comment les utiliser. Il est évident que l'utilisation sera partagée entre les activités de recherche et les soins, voire une utilisation à des fins extérieures pour des organismes extérieurs aux hôpitaux. Enfin, un hôpital désirant utiliser des traitements innovants peut prévoir l'utilisation de certains traitements destinés à une partie des maladies visées. Ce dernier facteur est appelé politique médicale.

Il reste légitime de se poser la question sur les priorités pour répondre aux exi-

gences du patient et du traitement de sa maladie dans les meilleurs délais. À noter que les établissements de soins doivent également élaborer une politique de réception des patients visant la meilleure utilisation possible des ressources disponibles. En effet, les établissements de santé vont, de plus en plus, vers l'utilisation de traitements innovants, en essayant de préserver la santé des patients et leur qualité de vie après les traitements. La question venant souvent de la part des centres concernés utilisant ces traitements, est de savoir combien de patients sont potentiellement intéressés par ces traitements et quelle est leur répartition parmi les traitements choisis. On peut également rajouter la provenance géographique des patients, leur âge, sexe, milieu socio-professionnel. Combien de patients pourraient prendre en compte le centre, utilisant des techniques innovantes? Y-a-il un sens d'ordonner les traitements en fonction de leur gain thérapeutique (qualité de la vie du patient après le traitement)? Si oui, alors quelle est la façon la plus convenable et la plus appropriée en fonction des capacités du centre pour les ordonner? Est-ce que le centre doit accorder plus d'importance à un traitement? Est-ce que la construction d'une bonne alternance entre l'utilisation des machines pour les traitements et l'activité de la recherche est une bonne solution? Quel est alors, en fonction des activités des centres, le coût d'un traitement et comment l'estimer? Il est également important de faciliter l'accès aux soins pour les patients par les réseaux de transport avec un emplacement stratégique et géographique du centre. Quelle sera alors l'efficacité du centre dans des conditions d'une "bonne" utilisation des traitements innovants? Enfin, si le centre estime que l'utilisation de ces traitements lui apporte un bon équilibre économique, comment comparer les traitements entre eux et puis comment les comparer aux prix de la sécurité sociale? Cela soulève la question de la comparaison des stratégies, ainsi qu'une méthode d'estimation de leur prix et de la qualité d'une stratégie. Il est important de considérer le facteur du nombre d'années de vie gagné du patient après son traitement et les récurrences éventuelles. De plus, pour mesurer le coût d'une stratégie, on doit obligatoirement tenir compte de l'efficacité de l'établissement de soin qui l'applique.

Un dernier facteur important est la diffusion des techniques innovantes auprès de patient. Il est important d'améliorer l'accès des patients vers les traitements innovants. La raison étant que plus les patients sont attirés par ces méthodes, plus les experts médicaux sont en mesure de les évaluer et de proposer des solutions concernant leur amélioration.

3.3 Les solutions apportées

Les solutions proposées à la problématique sont élaborées avec l'aide des spécialistes des domaines correspondants. En effet, durant la recherche des différents problèmes rencontrés, nous avons dû mener des discussions avec des spécialistes du milieu médical, épidémiologique et économique. Ainsi, nous proposons les solutions, exposées dans ce manuscrit. Pour répondre à la problématique nous proposons un prototype logiciel permettant l'évaluation médico-économique des centres de radio-

thérapie qui optent pour l'utilisation des techniques innovantes. Il est supposé que ce prototype est destiné à l'utilisation des investisseurs et des décideurs des centres hospitaliers. Dans cette section, nous exposons une brève description de l'outil, détaillant les différentes parties le composant. Avec les paragraphes suivants, la structure du manuscrit est décrite, tout en détaillant les différents modèles faisant partie de l'outil informatique. Nous avons choisit de modéliser un prototype d'évaluation médico-économique composé de trois parties indépendantes.

Les deux premiers modèles : Modèle de Recrutement et de Planification

La première partie du prototype concerne l'évaluation du nombre de patients susceptibles d'être intéressés par les traitements innovants. Les nouveaux traitements sont proposés par les différents centres en tenant compte de leur capacité d'accueil. On appelle cette partie modèle de Recrutement.

La données médicales et la connaissance des experts que nous avons collectées, nous ont permis de représenter le patient. Nous avons fait le choix de représenter le patient en tant qu'entité dans notre outil. Il est décrit par l'état de sa maladie, ses spécificités, ainsi que les différents traitements qu'on peut lui associer. Dans ces traitements, nous trouvons les traitements habituels, mais également les traitements innovants. Les différents techniques innovantes dépendent, en effet, des machines utilisées pour leur réalisation. Ceci impose la description détaillée des traitements en fonction des séances à programmer et du matériel utilisé. Dans ce premier modèle de Recrutement, nous décrivons tous les paramètres concernant le patient (voir le chapitre 4, page 65).

Ainsi, on décrit le patient en détail, mais aussi les centres de radiothérapie. En effet, les centres de radiothérapie sont décrits par leurs équipements, leur organisation interne, ainsi que le personnel médical intervenant. Nous exigeons une description minimum en fonction des modèles qui sont employés par l'utilisateur du prototype. Le centre hospitalier est identifié comme une entité fonctionnant avec ses propres ressources et appliquant d'une politique médicale propre. En effet, il est tout à fait légitime de considérer que chaque centre de radiothérapie assure lui-même gestion de ses préférences médicales pour les traitements à proposer. Cette notion n'est pas obligatoire, pour autant elle doit être prise en compte, car elle exprime la compétition et la concurrence des offres médicales des centres. Les notions de la politique médicale des centres, leur spatialisations et leur description sont présents dans le chapitre 4.

Puisqu'on doit évaluer les patients susceptibles d'être soignés dans un centre de radiothérapie, nous proposons une solution possible de l'optimisation des traitements des patients. Nous avons étudié les spécificités des techniques innovantes et des centres les proposant, pour pouvoir construire un modèle de planification. Ce dernier est capable de planifier les séances des patients, en fonction des contraintes médicales imposées et tout en optimisant le nombre de patients pris en charge par le centre de radiothérapie. Ce nombre de patients est estimé en tenant compte d'une éventuelle politique médicale de l'établissement hospitalier. Le modèle de planifica-

tion de traitements, ainsi que son rôle sont exposés le chapitre 4. Nous proposons également différentes solutions pour l'implémentation du modèle de planification. Elles sont détaillées est présentées dans le chapitre 5, page 123.

Pour finir sur la représentation de l'attractivité entre les patients et les centres nous proposons dans cette étude une solution possible basée sur la géographie, l'accès aux soins des patients et le bénéfice médical des traitements possibles. La solution proposée est exprimée à l'aide de la spatialisation des patients et des centres. À noter que, la spatialisation est un des facteurs prioritaires pris en compte dans cette étude. La méthode de l'attractivité, les hypothèses qui la caractérisent, ainsi que leur utilisation sont données dans le chapitre 4.

Le troisième modèle : Le modèle économique Lorsque l'on veut évaluer l'efficacité des centres de radiothérapie, on se doit de tenir compte des dépenses de ces derniers. Dans ce paragraphe nous présentons brièvement la solution concernant la partie économique de l'étude. En ce qui concerne la description économique des centres, nous tenons compte du type et du coût du personnel, des consommables, de l'investissement des machines et matériaux et leur entretien. Nous proposons une méthode d'évaluation du prix d'un traitement effectué au sein d'un centre de radiothérapie. Cette partie nécessite la connaissance des patients qui sont soignés dans un centre pour chaque traitement proposé. Les coûts fixes et variables concernant un traitement, sont estimés à partir du fonctionnement global du centre. L'utilisateur du prototype peut faire une étude estimant un prix par traitement tout en considérant le fonctionnement du centre dans un milieu géographique concurrentiel, un facteur non négligeable. Ce modèle économique est basé sur une méthode d'évaluation des services rendus, en tenant compte de chaque composante utilisée, et des activités effectuées. Il s'agit de décrire un traitement comme une offre, et de le présenter comme un service rendu au patient. Nous pouvons donc faire l'hypothèse de pouvoir décrire de façon minimale et suffisante les activités nécessaires pour un traitement, et les produits utilisés lors de ces activités. De plus, le modèle économique peut fonctionner tout seul ou bien en dépendance avec le modèle évaluant le recrutement des centres d'accueil. Le choix de coupler les deux méthodes est laissé à l'utilisateur tout en s'assurant de l'existence des données minimum nécessaires au bon déroulement de l'étude. Cette solution est présentée dans le chapitre 5, page 123

Quatrième modèle : Modèle Médico-Économique Lorsqu'un prix pour un traitement est évalué, il est important de pouvoir positionner le centre, à la fois par rapport à ses concurrents, et par rapport à la sécurité sociale. Nous rappelons que nous faisons l'hypothèse de se trouver dans un cas d'assurance maladie comparable au système français. Pour pouvoir évaluer le prix par traitement, nous employons des connaissances médicales et économiques que nous modélisons dans le prototype proposé, ainsi la comparaison de stratégies médicales associées. Une stratégie médicale comprend le traitement d'un patient, les examens médicaux nécessaires, ainsi

que le suivi du patient après la fin de son traitement principal, et ceci jusqu'à son décès. C'est le dernier modèle qui est chargé de répondre à cette comparaison de stratégies. Une comparaison est faite au niveau des prix des différentes stratégies, ainsi que le prix que la sécurité sociale française est prête à rembourser. Nous avons modélisé la description des stratégies et les méthodes de comparaison, tout en nous appuyant sur les modèles économiques existants et la connaissance médicale. Les statistiques menées lors des traitements des patients, en vue de l'évaluation des ces stratégies, donnent accès à des statistiques sur le nombre d'années de vie gagné pour les patients. En employant ces données, nous sommes en mesure d'estimer le coût par année de vie gagnée en fonction de la stratégie visée. Ces détails sont également décrits dans le chapitre 5.

Dans la suite de ce manuscrit sont exposées les méthodes déployées pour la mise en œuvre du prototype logiciel. Nous tenons à noter qu'une grande partie de l'étude a été menée sur le savoir-faire médical et sa modélisation. En effet, il n'est guère facile de modéliser la vie courante. Nous pouvons toujours proposer un modèle quelconque, mais est-il véritablement utile et répond-il aux questions que l'on se pose? Ceci est difficile à dire tant que des tests sur une représentation, valable et en forme minimale, du modèle n'ont pas été faits. Nous avons donc opté pour une modélisation et conception au début minimale, facile à tester pour pouvoir poser des bases solides et ensuite étendre l'étude sur un plus grand périmètre. Nous proposons une modélisation générique et extensible. Les quatre modèles du prototype sont présentés, modélisés et implémentés. Leur modélisation et les méthodes utilisées sont discutées. Nous mettons en œuvre des méthodes provenant des systèmes multi-agents pour une modélisation générique et pérenne. Ces méthodes ont été exposées dans le chapitre 2, page 7. Nous utilisons des méthodes statistiques, épidémiologiques et économiques pour donner une réponse aux problèmes posés. Le travail que nous exposons est utilisé pour donner une aide aux décideurs des centres radiothérapeutiques, nous tentons d'intégrer les hypothèses les plus importantes dans le prototype.

Modélisation du prototype et Modèle de recrutement

Sommaire

4.1	Ontologie	66
4.1.1	Qu'est-ce qu'une ontologie et son utilité	66
4.2	L'ontologie de ce projet	68
4.3	Le niveau de détail nécessaire	70
4.3.1	Les détails de l'ontologie médicale	71
4.3.2	Les détails de l'ontologie économique	75
4.3.3	Les détails de l'ontologie médico-économique	76
4.4	Agents du prototype et Modèle de recrutement	78
4.4.1	Introduction sur la méthode de modélisation	78
4.4.2	L'analyse spatio-temporelle du prototype	79
4.4.3	L'agent du modèle de recrutement	81
4.4.4	Le patient et son agent dans le modèle de recrutement	86
4.4.5	Le centre et son agent dans le modèle de recrutement	98
4.4.6	Les interactions des agents du modèle de recrutement	113
4.4.7	Conclusion	120

Ce chapitre présente la modélisation du prototype médico-économique qui est l'objectif de cette étude. Pour sa conception, modélisation, et implémentation, le savoir-faire médical et les méthodes économiques ont d'abord été modélisées, suivies du quatrième modèle médico-économique. Le premier résultat de cette modélisation est un dictionnaire de connaissances reliant les différentes disciplines utilisées. La suite des travaux concerne l'élaboration des processus décrits par le corps médical, pour le soin des patients et les caractéristiques spécifiques des maladies, ainsi que les techniques particulières que les traitements nécessitent. Le processus de modélisation a été très long, puisqu'il est nécessaire de produire un algorithme avec réponse à chaque situation pouvant se produire du côté du patient et du côté de l'établissement hospitalier. Les différents cas étant explorés sur le plan théorique, une modélisation tout d'abord simpliste est effectuée, suivie d'une modélisation plus générale s'adaptant avec différentes situations possibles. Une première version implémentée sous une forme simple et stable est proposée.

Dans cette partie du manuscrit, sont utilisées les définitions et méthodes décrites lors du chapitre précédent, afin de construire une base stable et une architecture

valide de l'outil logiciel. Le chapitre commence par les définitions concernant la notion de l'ontologie et ensuite son emploi pour l'outil informatique. Une base des connaissances est un module indépendant de toute plate-forme. Elle permet une construction saine et correcte du vocabulaire utilisé et implémenté dans un prototype logiciel. Les ontologies sont utilisées pour la construction d'un dictionnaire de connaissances reliant les différents modules du prototype.

4.1 Ontologie

Cette section expose les termes relatifs à l'ontologie et son utilisation. Une ontologie est indispensable lorsque l'on introduit des nouveaux termes pour la construction d'un logiciel, et/ou des nouvelles fonctionnalités. Elle est nécessaire lors de la mise en commun des connaissances venant de différents domaines. Dans notre cas l'informatique, la médecine et l'économie doivent co-habiter.

4.1.1 Qu'est-ce qu'une ontologie et son utilité

D'après Gruber [Gruber 1993], la définition correspondante à une ontologie est la suivante :

Définition : Ontologie

An ontology is a specific specification of a conceptualization.

Une ontologie définit les objets, les acteurs et les relations entre eux. Une ontologie est une base de connaissances des acteurs et des relations nécessaires à leur communication [Genesereth 1987]. Le terme d'ontologie vient de la philosophie et se traduit par : "ce qui existe est forcément représentable". On s'inspire de ce principe pour représenter tous les termes et les relations dont on a besoin pour le prototype logiciel décrit dans ce chapitre. De plus, chaque agent qui utilise l'ontologie est soumis à la théorie de 'Knowledge-Level perspective' [Newell 1993].

Le terme d'ontologie est apparu dans les années 90 [Rector 1998, Guarino 2009, Jones 1998, Bachimont 2002]. Une ontologie contient en général les caractéristiques suivantes [Charlet 2000, Dhombres 2010] :

- Elle est une caractéristique formelle, permettant de définir les connaissances et fait partie de l'ingénierie des connaissances ;
- Les deux niveaux que l'on distingue dans une ontologie sont : le 'top level', représentant les niveaux structurants provenant de réflexions philosophiques, et le 'core level' décrivant les relations entre les concepts du domaine, utilisés par les spécialistes.

Il existe plusieurs méthodes concernant la modélisation des ontologies [Gomez-Pérez 2004], ainsi qu'un classement. Elles peuvent être classées suivant deux dimensions [van Heijst 1997] :

- La première concerne le type et la quantité de conceptualisation et regroupe les ontologies terminologiques, d'information et de représentation de connaissances ;

– La seconde dépend du sujet de l'ontologie et réunit les ontologies d'application, de domaines, les ontologies génériques et les ontologies de représentation. Dans [Uschold 1996], on peut clairement trouver les avantages d'utilisation des ontologies :

- L'assistance pour la communication.

La communication dans un système informatique est aussi importante que la communication dans un système hospitalier. Les composants d'un système informatique sont aussi importants que les composantes d'un système hospitalier. Une ontologie bien définie contient les différents termes manipulés par le système et sert à transmettre l'information lors d'un dialogue entre les agents communicants.

- L'interopérabilité entre les modules informatiques.

L'ontologie est utilisée comme un support de la communication et de la transmission de l'information. La base de connaissances étant modélisée d'une façon stable, le passage de l'information dans le système concernant les entrées sorties est valide. Cette sécurité assure le bon fonctionnement du système et de la production des résultats. L'accès commun à l'information est également un atout pour les différents acteurs qui accèdent à une information sécurisée et pérenne.

- Amélioration considérable pour l'ingénierie de la construction des logiciels.

La spécification d'une ontologie pour un prototype est une étape indispensable. Avec la spécification, on identifie les besoins de logiciel et la base des connaissances manipulée. En même temps que la fiabilité, il faut mentionner la réutilisabilité du dictionnaire de connaissances créé de cette façon. Il est important de prévoir la réutilisation d'une ontologie, surtout lorsqu'elle représente la spécification et la base de connaissances d'un produit logiciel. De plus, la création d'une ontologie permet de faciliter la tâche de modélisation de l'information après son recueil.

Une ontologie doit être construite de la manière suivante :

- Spécification et conceptualisation.

La première étape permet de repérer les limites du ou des domaines inclus, ainsi que l'information qui doit être représentée. La deuxième étape permet de structurer l'information et de proposer des modèles pour sa représentation.

- Formalisation et implémentation.

La formalisation permet de choisir un langage de connaissances qui doit être suffisamment souple pour représenter tous les aspects de l'ontologie. L'implémentation est le passage de l'ontologie vers son utilisation par un système informatique. Ces deux étapes doivent être suffisamment bien établies et étudiées. Lorsque l'ontologie est générique dans sa construction et sa représentation, elle est susceptible d'être réutilisée et puis complétée lors de l'évolution du domaine qu'elle représente et de l'outil qui l'utilise.

Une ontologie doit être suffisamment bien construite au niveau de la modélisation et également pour son implémentation. L'ontologie de ce projet est implémentée en XML. C'est un langage représentant des avantages tels que

l'exportation et l'importation des données vers d'autres plates-formes, mais aussi une utilisation simple et intuitive. Dans la littérature on retrouve le logiciel de physique granulaire GRANULAB qui a utilisé le même formalisme d'implémentation de l'ontologie [Breton 2000].

4.2 L'ontologie de ce projet

L'ontologie construite pour l'étude présentée dans le manuscrit a été élaborée en plusieurs étapes. Elle a été révisée et vérifiée avant son implémentation, tout en considérant différentes possibilités d'extension. Les étapes permettant son élaboration sont présentées ci-dessous :

1. Recueil du savoir-faire médical et Analyse.

Le recueil du savoir faire est un processus long. Il nécessite une remise en question et une analyse constante de la compréhension obtenue à un moment donné. Cette remise en question doit être réalisée pour chaque nouvel élément que l'on veut ajouter ou que l'on juge inutile et que l'on veut exclure. Ainsi, la méthode qui combine en même temps le savoir-faire et son analyse se répète jusqu'à l'obtention d'une base solide permettant de donner une réponse à chaque situation à représenter dans le prototype. Souvent, en modélisant les solutions des problèmes, la solution d'un nouveau problème est la combinaison des solutions des problèmes déjà résolus. Le retour en arrière est parfois nécessaire pour mieux comprendre la théorie face à laquelle on doit trouver une solution. L'application de la méthode précédente de recueil et d'analyse est fondée sur le 'Case Based reasoning' [Aamodt 1994, Kolodner 1992].

Les multiples discussions avec les spécialistes médicaux ont permis de résumer leur savoir faire sous la forme d'un produit informatique. Il permet de combiner leurs connaissances et de les appliquer dans différents domaines. On obtient un outil commun à destination des décideurs des centres hospitaliers. Lors du recueil des données et des discussions avec les spécialistes médicaux, il a été nécessaire d'impliquer dans ce projet des méthodes venant de l'économie, de la géographie, de l'épidémiologie et des statistiques. Tous ces domaines différents dans leur nature, ont dû être reliés par une unique source d'information pour pouvoir être utilisés dans le prototype. Ainsi, avec la création de l'ontologie, on a donné une base solide et progressive sur laquelle on peut s'appuyer pour cette version de l'outil et pour ses futures avancées.

2. Prise des décisions.

La première phase consiste en la réunion de toute l'information nécessaire pour la modélisation des données et des processus. On divise le dictionnaire en trois grande partie en tenant compte des contraintes imposées par les spécialistes des différents domaines, les médecins, les économistes, et les spécialistes de l'économie de la santé.

Sur la figure 4.1, page 69, on voit la séparation des données représentant la connaissance en trois domaines. Les données venant de la représentation

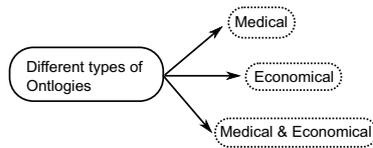


FIGURE 4.1 – Division de la connaissance commune en trois sous-parties principales : La connaissance médicale, la connaissance économique et la connaissance médico-économique.

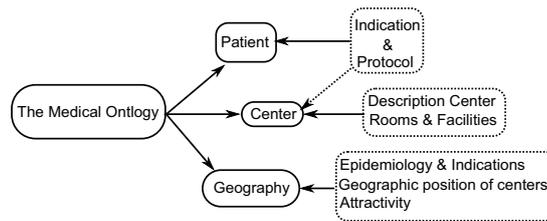


FIGURE 4.2 – Représentation de la connaissance médicale, concernant le patient et le centre traitant, ainsi que leur localisation géographique et attractivité.

médicale, les données économiques et les données médico-économiques. La séparation du dictionnaire des connaissances est nécessaire de la nature différente de ces domaines. Le prototype devant utiliser les trois domaines en même temps, Il présente trois parties différentes, une par domaine. De plus, chaque partie peut s'utiliser séparément.

La première partie concerne la connaissance médicale qui englobe la description du patient, de son état, de sa maladie et de son traitement. La maladie du patient avec la terminologie médicale est donnée par une indication. Les différents traitements possibles pour une maladie sont décrits par des protocoles. Ainsi, une indication peut avoir plusieurs protocoles qui peuvent lui être associés. De plus, dans la partie médicale on trouve également la description du centre hospitalier, de l'organisation de sa politique médicale et de l'utilisation des machines et équipement disponibles, du nombre de salles de traitement et de leurs disponibilités durant l'année. La politique médicale d'un centre est une façon particulière d'exprimer des préférences, pour l'acceptation et/ou le refus de certains traitements des patients. Enfin, pour faire la relation entre le centre de traitement et le patient, on utilise l'indication et les protocoles. De plus, l'indication permet de mesurer la distance géographique entre le domicile et le centre de traitement. En effet, on dispose des données épidémiologiques qui relient la géographie que l'on souhaite étudier avec les centres de traitement. On utilise l'incidence d'une indication pour une zone géographique précisément décrite. Le terme de zone géographique est expliqué dans les parties suivantes. L'illustration de l'ontologie médicale et ses différentes composantes sont présentées sur la figure 4.2.

Les modèles économiques ont été séparés en deux parties distinctes. La pre-

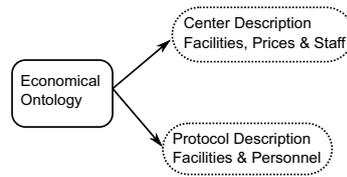


FIGURE 4.3 – Représentation schématisée de la connaissance économique nécessaire pour la modélisation des processus implémentant le calcul de prix par traitement pour un centre hospitalier.

mière concerne uniquement le calcul du prix du traitement. Ce prix est totalement dépendant de l'activité du centre durant la période étudiée. Le prix d'un traitement est calculé en fonction de la méthode ABC (Activity Based Costing [I.Durand-Zaleski 2005, Glad 1996]) et tient compte des ressources du centre, ainsi que de chaque activité effectuée lors d'un traitement. Ceci justifie la description détaillée du centre, de son équipement et de son personnel. Lors de la description du protocole utilisé pour un traitement au sein d'un centre hospitalier, l'activité qui est nécessaire à son bon déroulement est décrite en détails. Une activité doit renseigner les détails techniques nécessitant des machines spécifiques et du personnel qualifié, sans oublier la présence du personnel non médical et l'utilisation des fournitures. L'illustration des composantes de cette ontologie est présente sur la figure 4.3.

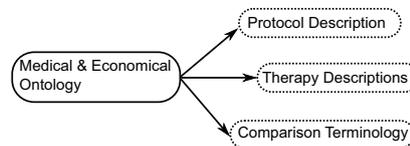


FIGURE 4.4 – Représentation schématisée de la connaissance médico-économique représentant le vocabulaire nécessaire pour la comparaison de différentes stratégies thérapeutiques.

Le modèle médico-économique est chargé de comparer différentes stratégies thérapeutiques, ce qui nécessite leurs descriptions, la description des protocoles qui en font partie, ainsi que les méthodes de comparaison et les termes qui les décrivent. La figure 4.4 représente la partie de l'ontologie correspondante.

4.3 Le niveau de détail nécessaire

Durant la modélisation et la construction du prototype nous avons été confrontés à une très grande diversité de l'information. Cette information a été analysée et ensuite formalisée comme une ontologie générique de façon à pouvoir être réutilisée, complétée et modifiée facilement par la suite. Un niveau de détail a été choisi pour la description de l'information. Lors des discussions régulières avec les spécialistes

médicaux, deux cas de présentation de l'information ont été retenus. Le premier concerne un large éventail d'informations. L'inconvénient de cette description est le danger de se retrouver avec des endroits où on est en manque de précision. En effet, les spécialistes ne sont pas toujours en mesure de fournir toutes les données en précisant les détails. Ceci peut nuire à la réalisation de l'étude complète détaillée. D'où le deuxième cas, présentant une récolte d'information brève, mais précise. Ce type de description est utilisée souvent, car en général, les processus sont suffisamment décrits pour effectuer une étude simple et valide.

Dans ces conditions, et pour ne pas perdre l'information dont on peut avoir besoin pour d'autres études, les deux niveaux de modélisation de l'information ont été gardés. Ils ont la forme suivante :

- Le premier niveau de détail est celui représentant seulement une brève partie de l'information ;
- Le deuxième niveau de détail tient compte de toute information pouvant être utile au projet.

Ainsi, en fonction des dispositifs et des souhaits de l'utilisateur, nous proposons les deux niveaux, tout en garantissant que l'étude est valide et ne manquera pas d'information nécessaire à la simulation. Ces deux types de présentation sont validées, par le biais de l'ontologie et son format. La validation est nécessaire avant que toute simulation aie eu lieu dans l'outil informatique. L'ontologie est créée sous forme de fichiers XML. Un exemple d'utilisation peut être vu dans [van der Vlist 2002]. Chaque fichier a sa propre grammaire XSD, qui a la définition correspondante du document XML. Cette représentation de l'ontologie a ses avantages. En premier lieu, elle permet de vérifier l'exactitude de la structure de l'information. En deuxième point, elle permet son évolution, une consultation et un accès très facile. De plus la représentation est très convenable pour son utilisation par les trois modules du prototype, un module pour la simulation médicale, un module pour la simulation économique et un dernier la comparaison des stratégies thérapeutiques entre elles.

Cette étude du niveau de détail oblige le concepteur à avoir une connaissance approfondie des données. Dans ce travail, le choix d'un degré de détails est important. Lorsque l'utilisateur décide de renseigner un maximum/minimum de détails, l'application vérifie si chaque modèle est correctement construit. C'est à l'outil informatique de juger de la complétude des données pour choisir une simulation basée sur les données détaillées ou réduites.

Il suit une description des trois ontologies, comprenant les détails obligatoires et nécessaires à une simulation minimale. Des exemples pour la partie médicale, économique et la partie médico-économique sont présentés. Pour chaque information représentée dans ces exemples, le fichier XML et sa grammaire XSD existent et sont employés dans l'outil informatique.

4.3.1 Les détails de l'ontologie médicale

Définition : Géographie

La géographie est une composition hiérarchique d'éléments non décomposables. Un

élément non décomposable ne peut être subdivisé en d'autres éléments. Il est caractérisé par une ou plusieurs indications.

Un exemple d'une géographie est représenté sur la figure 4.5 page 72. On voit la différence entre les éléments non divisibles et divisibles i.e. un élément divisible est susceptible d'être encore séparé. Ainsi, pour un élément non divisible, on peut renseigner ce que l'on appelle l'incidence d'une indication qui est présente.

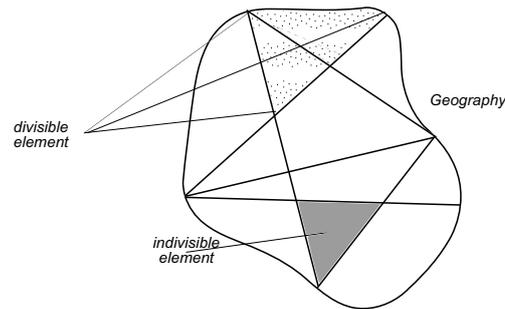


FIGURE 4.5 – Exemple de géographie et sa décomposition.

Définition : Incidence d'une indication

Les indications présentent dans un élément non décomposable de la géographie, sont caractérisées par leurs incidences. L'incidence est le nombre de malades qui apparaissent chaque année dans une zone élémentaire. La valeur de l'incidence est régie par une loi de probabilité provenant des études épidémiologiques sur les maladies étudiées. On distingue l'utilisation des lois de Poisson et de Gauss.

Ce sont des données épidémiologiques qui doivent être renseignées pour la création virtuelle des patients dans le système. Ces données reposent sur des lois de probabilité connues. Ce sont la loi de Gauss pour une grande partie des indications et la loi de Poisson pour les indications qui ont une apparition plus rare dans les régions. Ainsi, en utilisant les lois et leurs propriétés, nous générons des patients (voir figure figure 4.6).

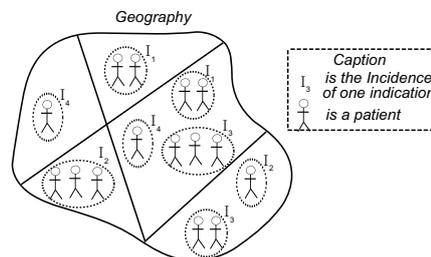


FIGURE 4.6 – Exemple de géographie et les incidences des indications présentes dans ces éléments.

Cette figure est un exemple d'une géographie. La géographie étant séparée en zones élémentaires (éléments non décomposables), il est nécessaire de renseigner les maladies (Indications) qui caractérisent chaque zone. De cette manière, chaque zone

inclut la somme des patients de toutes les indications. Chaque indication est notée par la lettre I_n avec n étant un indice qui désigne les différentes indications de la géographie. Pour l'exemple quatre indications sont dispersées dans une géographie avec cinq zones élémentaires. Le niveau de détail choisi pour la géographie est d'autant plus fin que l'utilisateur est capable de fournir les données épidémiologiques pour les zones non décomposables.

La définition de l'indication est connue par les spécialistes de la médecine :

Définition : Indication

L'indication décrit la maladie du patient et les techniques spécifiques nécessaires pour un traitement.

Il est aussi nécessaire de tenir compte des spécificités techniques de traitement de la maladie et de l'état général du patient. Les liens entre la géographie et les indications sont présentés de façon formelle sur le schéma 4.7 illustrant la composition des données demandées. En effet, pour les données épidémiologiques, il est nécessaire pour chaque zone non décomposable de renseigner les paramètres de la loi suivie par l'incidence de l'indication, présente. La définition des fichiers XML, et les XSD correspondant, sont fournis en annexes (annexe 8).

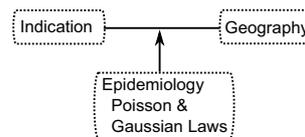


FIGURE 4.7 – Schéma de la relation entre la géographie et les indications. Le lien est donné par les données épidémiologiques, représentées par une loi de Poisson/Gauss.

Définition : Protocole

Un protocole décrit le traitement d'une pathologie et les moyens mis en œuvre pour sa réalisation.

De plus, un protocole est composé toujours de deux phases distinctes : la phase de préparation et la phase d'irradiation. Ces deux phases sont présentes dans l'ontologie. La première sert à décrire la préparation du patient pour le traitement. Elle n'est pas forcément utilisée dans le modèle de recrutement, car il s'agit de la préparation des machines et des masques pour le patient, ou de la rencontre avec le personnel médical et la connaissance des lieux. Quant à la phase d'irradiation, elle décrit précisément le traitement et l'organisation des séances.

Le protocole dans cette partie de l'ontologie peut avoir plusieurs descriptions en fonction du traitement visé. En effet, lors des discussions avec les experts médicaux, il a été établi une partie commune à tous les protocoles et une partie qui change en fonction des machines utilisées pour le soin de la maladie. Ainsi, nous avons modélisé cette spécification de façon autonome et indépendante.

Souvent, il existe plusieurs protocoles qui peuvent être utilisés pour le traitement d'une maladie. Toutes les possibilités de traitement sont décrites. La relation entre une indication et les différents protocoles qui peuvent lui être attribués s'exprime

sous la forme d'un ordonnancement donné par les experts, en accord avec le bénéfice médical attendu après le traitement (voir le schéma 4.8).

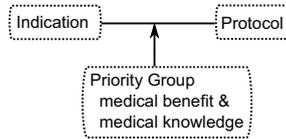


FIGURE 4.8 – Relation entre l'indication et le protocole. Nous utilisons la connaissance médicale et principalement le bénéfice médical attendu.

Définition : Groupe de Priorité

Le groupe de priorité est la relation permettant d'ordonner les protocoles existant pour une indication.

Le groupe de priorité est un paramètre donné par les experts et tient compte du bénéfice médical attendu après le traitement.

Pour que la description existante entre les centres et la géographie soit complète, on doit inclure le protocole et l'indication. Le protocole et l'indication représentant le patient caractérise les relations entre les centres et la géographie. En effet, lors de la construction de ses relations, il a été remarqué que

- la distance géographique ;
- le bénéfice médical attendu par le traitement ;
- la volonté du patient de se déplacer ou non vers un centre de traitement ;
- le choix du patient parmi tous les traitements existant et leurs ordonnancements, en fonction de l'espérance de guérison que l'on peut leur attribuer.

sont tous des facteurs importants et caractérisent dans ce que l'on appelle attractivité.

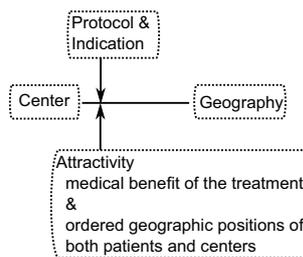


FIGURE 4.9 – Schéma de la relation entre la géographie et les centres.

Définition : Attractivité

L'attractivité définit le lien entre l'accessibilité du patient vers un centre et le bénéfice médical attendu correspondant au traitement du patient, proposé par ce même centre.

Ce paramètre est utilisé dans l'estimation de la volonté du patient de se déplacer pour des soins proposés dans un centre hospitalier (voir figure 4.9). Il joue

un rôle important dans l'estimation du recrutement des patients par un centre de radiothérapie.

Pour que la définition de l'attractivité soit encore plus claire, nous avons défini ce que l'on appelle un ordre entre les zones non décomposables, de la géographie, et le centres de traitement.

Définition : Ordre de priorité géographique des centres de traitement

L'ordre de priorité géographique des centres de traitements est défini par rapport à une zone non décomposable de la géographie. Lorsqu'un patient provient de cette zone, l'ordre de priorité géographique permet de privilégier les centres les plus proches et les plus accessibles compte tenu de la distance géographique et leur accessibilité en réseaux de transport.

L'ordre de priorité géographique est très important du point de vue stratégique pour l'accessibilité aux soins des patients. Il peut être assimilé aux paramètres utilisés dans les Systèmes d'Information en Géographie (SIG) [Rezaeian 2007].

4.3.2 Les détails de l'ontologie économique

Les discussions menées avec les experts nous ont permis de tenir compte des détails économiques nécessaires à l'application ABC (Activity Based Costing). En ce qui concerne la description du centre de traitement, nous avons identifié les données suivantes, qui se révèlent essentielles (voir figure 4.10) :

- La description du temps de travail durant une année ;
- La description de l'équipement en termes matériel ;
- La description du personnel ;
- La description des consommables ;
- La description des bâtiments.

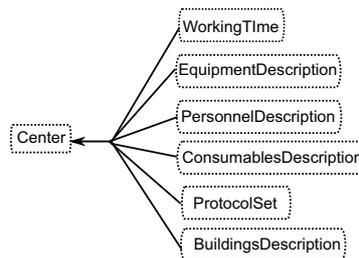


FIGURE 4.10 – Ontologie Économique, description du centre.

Chaque item de la description du centre possède une définition propre. Ceci est fait dans le but d'avoir la plus grande modularité possible, tout en gardant la structure minimale des paramètres. Cette modélisation est importante car, grâce à elle, nous pouvons choisir non seulement le degré de détails, mais également faire évoluer l'ontologie pour les futurs besoins de l'outil informatique.

En ce qui concerne la description du protocole, il a été conclu qu'il reste plus judicieux d'utiliser une modélisation par séances, puisque la description donnée par les spécialistes est souvent organisée en séances de différents types. Dans les différentes séances, pour suivre l'idée donnée par la méthode ABC, nous avons modélisé des activités qui décrivent les manipulations effectuées. Cette description nous permet de maintenir deux niveaux de détails. Le premier niveau contient uniquement l'information la plus essentielle pour pouvoir utiliser la méthode ABC. Dans le deuxième niveau l'utilisateur peut s'il le souhaite, donner la description complète du personnel qui participe, des équipements utilisés et des consommables. Ces deux niveaux rappellent le degré de détails choisi par l'ensemble du prototype (voir figure 4.11). Lorsque la description est incomplète ou incorrecte au niveau des attributs, un message d'alerte est affiché. Lors de l'initialisation de la description du protocole pour la partie économique l'utilisateur a le choix d'utiliser l'une ou l'autre méthode pour la description de chaque activité à l'intérieur des séances.

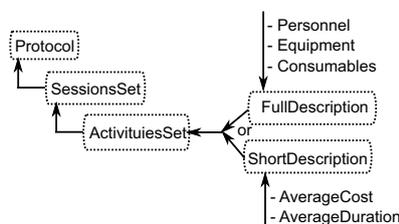


FIGURE 4.11 – Ontologie Économique, description d'un protocole.

La modélisation de l'ontologie économique est très importante pour le prototype car elle est utilisée pour mettre en œuvre certains mécanismes nécessaires pour la comparaison des différents thérapies dans la partie médico-économique du prototype. C'est la raison qui conduit à présenter la dernière partie de l'ontologie, à savoir le dictionnaire de connaissances lié à la partie médico-économique.

4.3.3 Les détails de l'ontologie médico-économique

Dans cette partie, il s'agit de faire une abstraction importante vis-à-vis des détails existants, de prendre en compte le savoir-faire des spécialistes et de garder uniquement les méthodes qui concernent l'étude. Ces méthodes sont reliées à la description des thérapies et à leur comparaison. Notre but est de comparer les stratégies entre elles et avec le prix remboursé par la sécurité sociale. Ceci nous amène à décrire chaque stratégie de façon générique. Nous avons construit un dictionnaire composé des actes utilisés lors des stratégies. Cette modélisation sous la forme d'actes a été justifiée par la description des GHS (Groupes Homogènes de Séjour) que la sécurité sociale en France utilise pour décrire les stratégies de traitement. En effet, les GHS correspondent souvent aux actes effectués par le personnel médical. Dans le dictionnaire nous avons prévu un lien de chaque acte vers un éventuel GHS correspondant, en utilisant l'identifiant de ce dernier.

La modélisation d'un protocole est primordiale car une thérapie est une suite de

protocoles. Dans la description des protocoles, on tient compte de l'hospitalisation, qu'elle soit à domicile ou dans un établissement de soins. Si des transports sont nécessaires, ils sont également prise en compte.

Définition : Thérapie

Une stratégie thérapeutique est une suite de protocoles, utilisée lors du traitement des patients ayant caractérisés par la même indication. Plusieurs stratégies peuvent exister pour une même indication.

De cette définition découle la conséquence de la comparaison des différentes stratégies thérapeutiques entre elles. Ainsi, la définition de la thérapie inclut une description précise des protocoles qui sont utilisés. Un protocole dans notre ontologie médico-économique peut être décrit de deux façons. La première utilise une version courte qui tient compte uniquement du prix moyen de sa mise en œuvre. La deuxième méthode de description reprend la terminologie des GHS. On demande à renseigner tous les actes faisant partie des Groupes Homogènes de Séjour. Cette méthode a été mise en œuvre pour pouvoir réutiliser les standards de l'assurance maladie. Les deux définitions peuvent se remplacer l'une l'autre. La gestion des deux versions peut être réalisée, et le contrôle de l'existence d'au moins une est garanti par la conception de l'ontologie (voir figure 4.12).

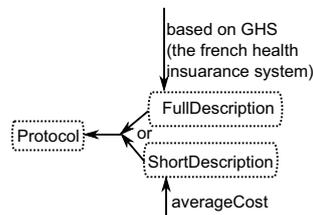


FIGURE 4.12 – Ontologie Médico-économique, description d'un protocole.

Le protocole est un constituant essentiel de la stratégie thérapeutique. Dans la description de la thérapie, on introduit également les statistiques du nombre de patients concernés et leur espérance de vie. Il existe de plus, des actes concernant la partie post-thérapeutique. En effet, la partie de la thérapie concernant le post-traitement et sa prise en charge est souvent peu renseignée. Nous avons décidé de l'inclure dans les possibilités de description ainsi que dans les calculs de prix et la comparaison des stratégies. La post-thérapie est constituée d'actes effectués lors des visites de contrôle, qu'ils fassent partie d'un traitement secondaire ou qu'ils soient prescrits car ils font partie de la stratégie (figure 4.13, page 78). Ils sont en général décrits comme des protocoles ou en utilisant les GHS. Pour les modéliser on les regroupe par périodes, en fonction de nombre de fois qu'ils sont effectués dans cette même période, et après la fin du traitement initial prescrit. On spécifie également la partie des patients uniquement bénéficient de ses traitements, par rapport au nombre total de traitements faits.

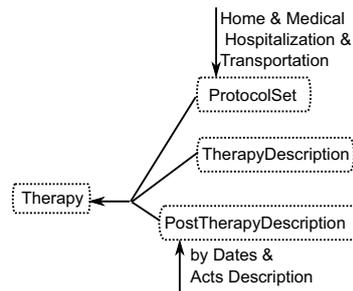


FIGURE 4.13 – Ontologie Médico-économique, description d’une thérapie.

4.4 Agents du prototype et Modèle de recrutement

4.4.1 Introduction sur la méthode de modélisation

Comme cela a été mentionné, le prototype informatique est composé de trois parties, la première concernant la simulation médicale, la deuxième la simulation économique et la troisième la simulation médico-économique. Les trois modèles co-opèrent pour un seul outil informatique, mais peuvent être utilisés séparément. Ils sont indépendants et si les données d’entrée sont correctement renseignées, la simulation peut avoir lieu. Cette séparation permet d’utiliser chaque partie indépendamment des autres. On peut dire alors, en utilisant le vocabulaire multi-agent, que chaque modèle essaie d’atteindre son but, sans utilisation obligatoire des autres modèles du prototype. Puisque les modèles sont liés, lorsque des données d’un des modèles sont existantes et elles sont communes à deux modèles, ces dernières peuvent aisément être réutilisées. De plus, l’utilisation d’un des modèles, ne nécessite pas nécessairement l’emploi des deux autres.

Dans la modélisation du prototype une hiérarchie est créée, elle est mise en œuvre pour pouvoir "piloter" les trois modèles en même temps. On peut tout simplement appeler cette hiérarchie l’environnement commun, qui est suffisant et nécessaire, pour le bon fonctionnement de l’outil informatique. Cette hiérarchie se reproduit pour chaque modèle. Chacun d’entre eux possède un agent maître qui dirige les processus internes, sans oublier l’initialisation qui est d’une très grande importance pour la simulation et l’utilisation du modèle.

Nous avons utilisé le principe du Cased Based Reasoning 4.2. Le choix des hypothèses des premiers tests des modèles a été difficile et crucial car, Nous avons été confrontés à un grand nombre d’hypothèses possibles, certaines complexes à mettre en œuvre. Ainsi, pour certaines hypothèses, nous avons fait le choix de ne pas les implémenter directement sous leur forme complète pour pouvoir tout d’abord tester les bases de la modélisation. Le but secondaire visé est de garder une modélisation et une implémentation simple et valide dès les premiers essais.

Dans les sections suivantes la modélisation du prototype est décrite en détails : la structure du prototype, son analyse fonctionnelle contenant les objets et les agents, les buts personnels et communs des agents, leur coordination, les relations qui

existent entre eux. Ensuite, sont présentées les structures des modèles et la hiérarchie des modèles et des agents.

4.4.2 L'analyse spatio-temporelle du prototype

Comme le prototype est composé de plusieurs modèles, chaque modèle est un agent, indépendant et suffisant à lui-même. Les trois modèles sont des agents non situés et indépendant du temps de la simulation. Pourtant, la simulation qui concerne le modèle de recrutement est dépendante du fonctionnement des centres et par conséquent, il est nécessaire d'introduire une unité temporelle. Compte tenu de la problématique globale, chaque modèle possède ses propres variables spatio-temporelles.

La classification spatio-temporelle porte sur les formalismes utilisés et les modèles créés. Dans le cas présent, ce sont les modèles à pas de temps discrets qui décrivent le formalisme. Ce cas a été traité par Zeigler [Praehofer 2000] et des extensions sont décrites dans [Wainer 2001, Barros 1995].

Définition : DEVS

Un modèle DEVS (Discrete Event System Specification) a la structure suivante :

$$DEVS = (X, Y, S, \delta_{ext}, \delta_{int}, \delta_{con}, \alpha, ta) \text{ où}$$

- X est l'ensemble des ports et des valeurs d'entrée ;
- Y est l'ensemble des ports et des valeurs de sortie ;
- S est l'ensemble des états de système ;
- δ_{ext} est la fonction de transition externe, qui représente la réponse du système aux évènements d'entrée ;
- δ_{int} est la fonction de transition interne, spécifiant les états futurs des états courants ;
- δ_{con} est la fonction de transition de conflit, permet d'écrire l'état futur du système lors d'évènements simultanés ;
- α est la fonction de sortie, qui part de S et a une image dans Y ;
- ta est la fonction d'avancement du temps. Elle donne la durée tant que le système restera dans le même état.

On peut également mentionner les modèles DEVS couplés [Amblard 2006]. Un modèle est couplé lorsqu'il est représenté par un ensemble de sous-modèles pour former un nouveau modèle. Un modèle couplé est composé des structures suivantes :

- L'ensemble des modèles qui le composent ;
- L'ensemble des ports d'entrées qui recevront les évènements externes ;
- L'ensemble des ports de sortie qui émettront les évènements ;
- Les couplages des ports d'entrées et ports de sorties des sous-modèles composant le modèle couplé.

Ainsi, l'algorithme du déploiement d'un modèle couplé est le suivant :

1. Initialisation du modèle principal et de ses sous-modèles ;

2. Lors de la réception d'un événement externe, ce dernier est également transmis au sous-modèles. Si un événement est émis par un sous-modèle, il est envoyé aux autres sous-modèles par des connections internes.

Lors du temps de calcul des tâches, les modèles pères attendent que leurs sous-modèles aient fini le traitement pour pouvoir donner lieu à un nouvel événement.

Dans cette partie du manuscrit est exposée l'analyse spatio-temporelle du prototype. Plus précisément, il s'agit de l'analyse du modèle de recrutement. Pour ce dernier, la gestion à pas de temps discret est utilisée, en utilisant des caractéristiques particulières pour cet agent. Les agents des modèles économiques ne nécessitent pas l'utilisation du temps. Toutefois, les deux modèles peuvent être utilisés conjointement avec le modèle de recrutement, ce qui montre la nécessité de l'utilisation et de la gestion du temps dans l'intégralité du prototype.

Pour préciser la gestion du temps, le prototype utilise son environnement global ou encore la dimension environnementale. En effet, l'agent de l'environnement du prototype est le responsable de la gestion de tous les liens intra-agents. Il est donc d'une grande importance de pouvoir ordonner les actions de ces derniers en fonction des buts que le modèle correspondant doit pouvoir satisfaire. L'environnement est donc responsable d'établir l'ordre des séquences de temps qui sont demandées. En effet, le nombre de séquences de temps dans une simulation est un paramètre important. Il est nécessaire de faire suffisamment de tests pour pouvoir conclure sur des valeurs moyennes significatives des paramètres estimés. Ainsi, avec le changement des paramètres d'entrées et en gardant le même nombre de séquences temporelles, nous pouvons comparer les différentes situations formées.

Le prototype issu de cette étude est à pas de simulation discret. La modélisation a porté sur deux échelles. La première concerne la forme des données que l'on a obtenues et leurs dépendance au temps, toutefois elle existe. La deuxième échelle concerne le modèle de recrutement. L'échelle de temps discret choisie est la semaine. Les raisons de ce choix peuvent être trouvées dans la section consacrée à la description du centre et la modélisation de son agent. Si l'on accepte cette hypothèse, il est important de préciser les détails suivants :

- L'environnement prend en charge la gestion du temps et des séquences temporelles.
- Durant un pas de temps, l'ordonnancement des agents est également géré par l'agent de l'environnement. Nous disposons d'un réseau de connections entre les agents qui évolue lors des pas de temps.
- Les centres radiothérapie dans le prototype sont disposés dans la géographie de façon statique. Les patients peuvent se déplacer, ce sont des agents dynamiques.
- Puisque des changements interviennent lors des pas de temps et que les états du système changent, en occurrence nous disposons d'un système dynamique. Ce système a besoin d'explicitement à chaque changement d'état ses entrées, ses sorties et les conditions des futurs changements. Tout cela est influencé par le temps.

La déduction de cette analyse est l'existence d'un méta-modèle pour l'agent de chacun des modèles ainsi qu'un formalisme correspondant. La suite de cette section présente les méta-modèles utilisés au sein du prototype, ainsi que les liens inter et intra-modèles et les discussions entre les agents.

4.4.3 L'agent du modèle de recrutement

L'agent du modèle de recrutement est le plus complexe et le plus important dans le prototype. Il est chargé d'évaluer le nombre de patients étant susceptibles de vouloir se soigner dans un centre particulier, avec les techniques innovantes proposées. Ceci est fait dans le respect de la simulation, de la compétition des centres hospitaliers, de leurs politiques médicales et l'accueil des patients. Ces termes sont expliqués dans la suite de cette section.

La simulation à pas discret utilise des modèles probabilistes. Le modèle est dépendant des données fournies par l'utilisateur. Le modèle de recrutement utilise des hypothèses médicales, ainsi qu'un modèle de planification des services d'un centre de traitement. Nous avons modélisé toutes les hypothèses en les testant une par une pour s'assurer de leur conformité (Cased Based Reasoning). Ensuite, chaque hypothèse a été rajoutée au modèle, et affinée si besoin.

Une brève description de l'utilisation du modèle de recrutement est donnée sur la figure 4.14, page 82. Elle concerne les agents composant le modèle de recrutement, ainsi que les relations et la hiérarchie entre eux. L'agent du modèle de recrutement est communicant et avec une allocation distribuée des tâches.

La première étape importante de ce modèle est le lancement des vérification de la validité de toutes les données présentes dans le modèle pour s'assurer que la simulation peut avoir lieu. Cette vérification est effectuée par un mécanisme interne qui fait également la relation entre les données et les structures des objets effectuant la simulation.

Le deuxième processus du modèle de recrutement est la création virtuelle des patients. La naissance des patients est un processus qui est géré par un agent spécifique, qui contrôle le générateur de patients. Nous avons fait le choix d'appeler cet agent à chaque pas de temps. Cette décision a été prise par souci de gestion des patients en tant que objets réellement existantes. Les paragraphes suivants exposent la modélisation adoptée pour la présentation des patients. Nous utilisons une représentation virtuelle de ces derniers et nous exposons les motivations pour ce type de représentation. Toutefois, cette représentation virtuelle n'est pas suffisante et nous passons vers une identification des patients dans certains cas. Nous présentons également l'agent du générateur des patients, ainsi que les mécanismes utilisés pour le déplacement des patients dans la géographie lors de la recherche des traitements. Des méthodes faisant partie d'agents spécifiques sont décrites pour le regroupement des patients. Les agents des centres sont présentés de façon détaillée. Enfin, une vue globale sur le prototype est exposée.

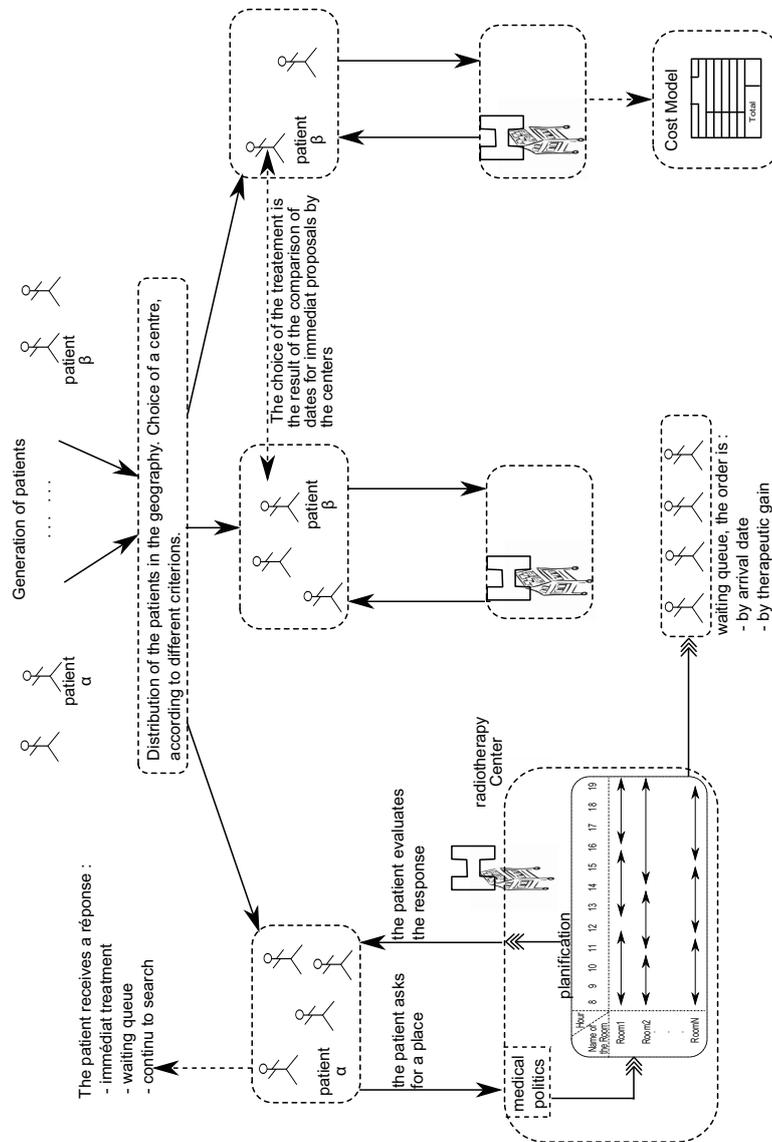


FIGURE 4.14 – Schéma général de l'utilisation des trois modèles. Les patients sont générés et partent à la recherche de traitements dans des centres convenables. Ils sont ensuite planifiés pour ces traitements lorsque les conditions nécessaires et suffisantes sont remplies. Les modèles économiques peuvent être utilisés ensuite.

4.4.3.1 Le générateur de patients

Le générateur des patients est un processus qui agit comme un agent indépendant. La génération proposée, est basée sur les statistiques de données épidémiologiques fournies en section 4.3.1. En conséquence, elle est dépendante de la structure géographique choisie pour la simulation et des indications qui participent à l'étude. À partir des lois des incidences de l'indication et pour chaque zone, est défini le nombre de patients qui apparaissent chaque semaine (voir figure 4.15). Le choix du pas de temps équivalent à une semaine est stratégique. En effet, lors des discussions avec les experts médicaux, il a été constaté que leur réunions régulières ont lieu approximativement toutes les semaines. D'où ce choix, justifié tout en restant aisément modifiable, car c'est un paramètre réglable de la simulation.

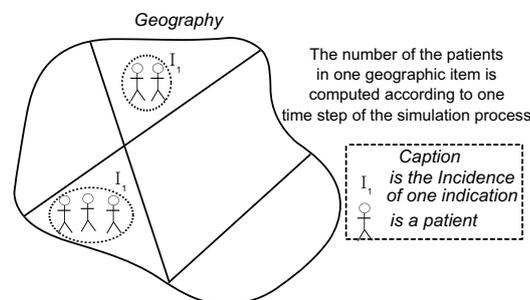


FIGURE 4.15 – Les incidences d'une indication, pour chaque pas de temps, peuvent être différentes en fonction des données.

La générateur de patients a également un rôle concernant l'attribution d'un emplacement géographique pour le patient. En effet, avec l'incidence de l'indication, le patient se voit attribuer un lieu d'habitation. Le lieu d'apparition et d'habitation sont confondus dans la modélisation du prototype. C'est à partir de l'endroit de la genèse que le patient commence à chercher un centre d'accueil, pour un traitement. De la même manière, le médecin traitant du patient n'est pas explicitement présenté. Le rôle d'accompagnement et de guide du médecin traitant est modélisé comme un processus supplémentaire.

Le processus de génération de patient est l'initiateur de la spatialisation des patients. La spatialisation est une technique très utilisée en économie, mais également dans les Système d'Information en Géographie (SIG). On utilise la spatialisation pour créer des termes d'attractivité entre les patients et les différentes régions géographiques ainsi que les centres.

En utilisant le générateur de patients, la gestion par groupes des patients est initiée. Ce mécanisme permet de pouvoir créer des patients de façon virtuelle, ce qui est un avantage considérable au niveau de la gestion de l'espace mémoire utilisé lors de la simulation. Cette dernière hypothèse est importante, car plus on a des patients plus le processus devient lent, compte tenu du nombre d'agents que l'environnement doit gérer.

4.4.3.2 Le gestionnaire des patients par groupes

Le gestionnaire des patients par groupes est un agent spécifique. Il facilite le déplacement des patients lors de leur recherche d'un centre hospitalier et d'un traitement. Lors de la mise en oeuvre de cet agent, quelques hypothèses sont utilisées.

- Le patient a un lieu géographique attribué ;
- Le patient a choisi son meilleur traitement, suivant des critères précis, avec lequel il commence à chercher un centre d'accueil ;
- Le patient accepte de demander, en même temps, à un ou plusieurs centres d'accueil, proposant le même traitement, s'ils possèdent de la place pour l'accueillir ;
- Le patient accepte d'utiliser tous les traitements dits équivalents, par rapport à son indication. Les traitements équivalents ont le même bénéfice médical et par conséquent, le même groupe de priorité.

Avec ces hypothèses, l'agent gestionnaire des patients par groupes peut être utilisé. Le but principal de cet agent est de diriger chaque patient vers un centre hospitalier en accord avec le traitement choisi. Le but secondaire est de permettre la gestion des patients par groupes. En effet, ceci permet d'éviter leur représentation en mémoire en tant qu'objets individuels. Le fonctionnement de l'algorithme modélisant cet agent se résume aux étapes suivantes :

- Étape 1 : Formulation de groupes similaires de patients par indication, traitement et lieu d'habitation.

1. Pour chaque indication, en fonction du lieu d'habitation et du traitement choisi, l'agent évalue le pourcentage des patients susceptibles de partir pour un centre d'accueil visé.

L'hypothèse utilisée est que le patient a choisi au préalable le traitement ou les traitement équivalents. Ensuite, il peut effectuer la recherche des centres. Cette hypothèse est expliquée dans la section décrivant l'agent du patient, son comportement et ses tâches. En utilisant les données épidémiologiques et le coefficient d'attractivité, on peut estimer le nombre de patients prêts à se déplacer pour un traitement. Il s'agit ici, de tenir compte de l'accessibilité de centre d'accueil visé et des réseaux routiers pour que le déplacement prévu puisse prendre effet. Concrètement, en fonction de l'éloignement du centre et de son couplage avec le bénéfice médical attendu du traitement, on dispose des statistiques sur le nombre de patient qui pourront éventuellement se déplacer. Ceci nous permet de répartir les patients en deux catégories possibles. Les patients qui sont prêts à partir et donc susceptibles de demander une place pour un soin et les patients qui refusent de partir. Ces deux groupes sont alors créés par des agents spécifiques.

2. Si des traitements équivalents existent pour une même indication, il convient d'appliquer le même processus que précédemment. Ainsi, un patient peut se retrouver dans plusieurs groupes en fonction du nombre de traitements équivalents pour sa maladie (voir figure 4.16, page 85).

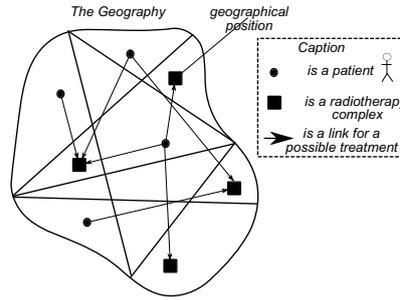


FIGURE 4.16 – Chaque patient se présente aux centres susceptibles de prendre en charge un ou plusieurs de ses traitements équivalents. Ensuite, les patients de toutes les indications, et venant de toutes les régions, sont mélangés pour former des groupes de patients, pour les centres de soin.

- Étape 2 : Envoi des groupes vers les centres d'accueil.

Pour chaque centre de traitement, qui est renseigné pour la simulation en cours, il faut récupérer les groupes de patient qui ont été formés et les représenter en tant qu'un seul groupe. Ainsi, le centre hospitalier peut, s'il le souhaite, faire une étude appropriée pour chaque patient en fonction des préférences médicales du centre.

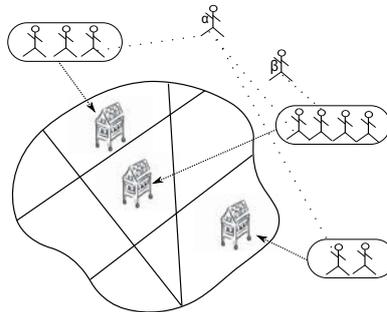


FIGURE 4.17 – Exemple de groupes de patients devant les centres. Le patient α peut être soigné dans plusieurs centres, le patient β dans un seul.

Cette stratégie de groupement des patients est illustrée à la figure 4.14, page 82 et également à la figure 4.17. Les patients de toutes les indications et provenant de tous les régions de la géographie sont mélangés pour former de nouveaux groupes de patients devant les centres de traitement. Lorsqu'un patient est susceptible d'être soigné dans plusieurs centres, il envoie sa demande à tous ces centres. Ceci est illustré sur les deux figures (patient α).

Cette méthode de modélisation nous permet une représentation des groupes des patients. Un groupe de patients de son côté n'a pas besoin de modéliser chaque patient qui y est présent, mais uniquement les caractéristiques générales du groupes et le nombre de patients le concernant. Ce qui implique qu'à ce stade les patients ne sont pas présents en tant qu'objets individuels.

4.4.4 Le patient et son agent dans le modèle de recrutement

Le patient est un agent situé et distribué. Il est caractérisé par son indication et par les moyens de traitement existants. Ces deux caractéristiques définissent le comportement du patient dans sa vie durant la simulation (voir figure 4.18).

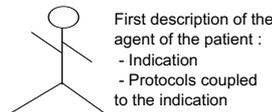


FIGURE 4.18 – Représentation succincte du patient. Cette représentation peut être complétée par des caractéristiques supplémentaires.

4.4.4.1 Représentation de l'indication et du protocole

Nous avons choisi de présenter l'indication et le protocole de façon modulaire. Pour ces deux caractéristiques du patient, un noyau commun existe autour duquel peuvent être rajoutées des spécificités. Ceci permet de tester différents scénarios pour décrire le patient et ensuite observer l'effet sur le modèle de recrutement.

La description de l'indication est simple. Elle est composée du nom de la maladie et de certaines spécificités. Une caractéristique concernant l'urgence du traitement a été rajoutée. Elle est discutée en détails dans les sections suivantes. Quant à la description du protocole, il a été modélisé en fonction des phases de préparation et d'irradiation. La phase de préparation, dans la version du prototype actuel, est rarement présente, mais la possibilité de la décrire reste possible. La phase d'irradiation est renseignée en détails. Elle contient la description du protocole par séances et par type de séances. De plus, nous avons modélisé les caractéristiques du traitement, taux d'irradiation et les délais minimaux/maximaux entre les séances.

La description par l'indication et le protocole décrit la maladie du patient, son état global et les traitements possibles. En fonction des traitements possibles, le patient peut envisager des centres de radiothérapie différents (voir figure 4.19, page 87). En effet, les centres de radiothérapie diffèrent par leur spécialisation. Il est donc indispensable que la spécialité visée soit mentionnée dans le protocole. Le protocole a été conçu de façon modulaire pour l'ontologie et pour la modélisation du prototype. En effet, pour la partie commune du traitement, il n'est pas nécessaire d'évoquer une spécialité. Pour décrire la spécialité un champ supplémentaire a été créé. Cet ajout est géré de façon dynamique dans la partie modélisation et implémentation du protocole.

Dans la suite, l'agent du patient est représenté avec le vocabulaire des Systèmes Multi-Agents. L'esprit de l'agent du patient est décrit par les méthodes aidant à prendre des décisions durant le processus de recherche des centres. Ces techniques peuvent être complétées dans la suite des travaux par des recherches en sciences humaines et sociales. Elles peuvent être fondées sur des résultats du comportement individuel des patients faisant partie d'un groupe. La section suivante décrit l'uti-

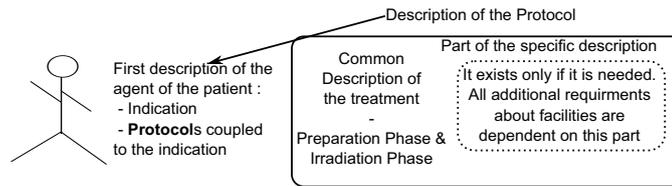


FIGURE 4.19 – Utilisation du protocole pour la description du patient. Partie spécifique du protocole d’un patient. Les spécificités, si elles existent, sont créées uniquement selon les besoins dans la description du patient.

lisation de l’indication et exprime l’urgence d’un traitement en fonction de l’état général du patient.

4.4.4.2 L’ordonnancement des traitements

L’ordonnancement des traitements d’un patient suit les groupes de priorité de chaque protocole associé à l’indication du patient. Un objet supplémentaire a été créé. Il est parfois possible que, dans un seul groupe de priorité, on retrouve plus d’un protocole. Cela veut dire que, dans la version actuelle du prototype, on considère ces protocoles comme équivalents. Une table de passage d’un groupe de priorité à un autre montre comment le patient peut en changer.

En effet, pour changer un groupe de priorité, le patient a constaté qu’après recherche dans son groupe de priorité courant, aucune place dans un centre hospitalier n’est disponible. De plus, pour le groupe de priorité qu’il souhaite prendre il existe des centres qui sont capable de l’accueillir. Faisons l’hypothèse que l’on a un patient qui est caractérisé par une indication qui, couplée aux protocoles, donne un certain nombre de groupes de priorité. En fonction de ces protocoles, un certain nombre de centres hospitaliers peuvent prendre le patient en charge, si des places libres sont disponibles et que les critères médicaux des centres le permettent (voir figure 4.20). C’est une table de correspondance entre les centres susceptibles de prendre en charge le patient et les groupes de priorité.

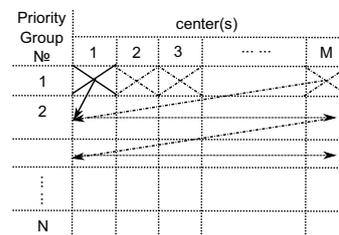


FIGURE 4.20 – Groupes de priorité et ordre de changement des groupes de priorité. Pour chaque groupe de priorité le patient dispose de centres hospitaliers susceptibles de le prendre en charge. Il peut exister des groupes de priorité sans centres hospitaliers disponibles. Les groupes de priorité sont en nombre limité par l’indication du patient et les protocoles associés.

Étant donnée la situation, on doit modéliser les conditions du changement de groupe de priorité du patient. Supposons que l'on ne prenne pas en compte des facteurs extérieurs, comme l'état de santé du patient, qui peut exiger des décisions plus hâtives, les règles sont alors les suivantes :

- Par convention, le patient commence avec son meilleur groupe de priorité. Ceci est imposé par le mécanisme du prototype, dans le but de donner au patient le meilleur traitement possible. Souvent le traitement du meilleur groupe de priorité est un traitement innovant ;
- Pour chaque groupe de priorité, le patient doit explorer tous les centres susceptibles, en théorie, de lui proposer un traitement en accord avec le protocole participant au groupe de priorité ;
- Les centres correspondants à un groupe de priorité sont ceux qui peuvent accueillir un ou plusieurs des protocoles du groupe de priorité courant. Dans ces conditions, le patient peut se présenter pour un traitement à un centre plusieurs fois avec des protocoles différents, ce qui signifie avec la demande de traitements différents. De la même manière, le patient se présente simultanément devant plusieurs centres avec le même protocole ou des protocoles différents du même groupe de priorité ;
- Lorsque les centres hospitaliers ne sont pas disponibles pour un groupe de priorité, ou de tels centres n'existent pas dans la simulation courante, le patient est susceptible de vouloir passer à un groupe de priorité inférieure.

En tenant compte des ces hypothèses, le patient est capable s'il le souhaite de changer de groupe de priorité, tout en sachant qu'un groupe de priorité inférieur diminue la possibilité d'un traitement avec un gain thérapeutique important.

4.4.4.3 La loi pour l'urgence du traitement

Il est également possible pour un patient d'exprimer une urgence pour son traitement. La définition suivante est celle de la Date de Début de Traitement. On doit la considérer comme la date au plus tard à laquelle le traitement choisi par le patient peut commencer.

Définition : Date de Début de Traitement

La date de début de traitement au plus tard est une hypothèse, qui sert à exprimer l'urgence d'un traitement. Chaque indication est caractérisée par sa date de début de traitement. La date de début de traitement est encore appelée DDT.

Avec la DDT, des conséquences au niveau de la modélisation sont à prendre en compte. Plus le patient peut attendre avant de prendre un traitement, plus il aura la possibilité d'explorer différentes propositions de la part des centres hospitaliers pour des traitements possibles. Dans un cas réel, ce comportement du patient ne doit pas être ignoré. Il a été modélisé en tenant compte de la DDT avec l'aide des lois de probabilité. Les paragraphes suivants se rapportent à l'interprétation du comportement du patient en tenant compte de la DDT (voir figure 4.21, page 89).

La DDT est également une caractéristique attribuée à l'indication. Elle donne un comportement intéressant au patient. La loi qui caractérise le comportement

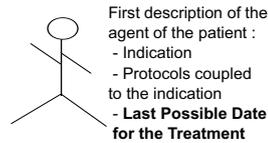


FIGURE 4.21 – L’agent du patient, caractérisée par la Date de Début de Traitement.

du patient est portée par un mécanisme que l’on peut considérer comme un agent spécifique. L’agent qui gère cette loi est soumis à des règles assez strictes. Les entrées de cet agent qui doivent être obligatoirement initialisées sont :

- Le patient avec son indication et ses protocoles attribués.
- Les protocoles du patient sont ordonnés par ordre croissant en fonction du groupe de priorité.
- La date du début de traitement au plus tard est connue.

En fonction des ces données, l’agent en charge de cette loi est sollicité pour évaluer la situation courante du patient et prendre une décision sur l’acceptation ou non d’un traitement possible. Ceci amène à prendre en compte le degré d’urgence de la décision à prendre avant le début du traitement. Nous présentons dans le paragraphe suivant la description mathématique de cette loi. Nous avons choisi d’appliquer une modélisation exponentielle pour la décision du patient (voir la figure 4.22, page 90).

La formule qui correspond à cette loi est la suivante :

$$f_{\varepsilon}(t) = (1 - \varepsilon)(1 - \exp^{-\frac{t}{T-\sigma}}).$$

Les paramètres de cette formule sont les suivants :

- le terme $(1 - \varepsilon)$ est utilisé pour fixer la vitesse d’approche de la courbe vers la valeur 1. Dans cette expression le paramètre ε a la valeur suivante :

$$\varepsilon = k \frac{i}{n} \text{ où}$$

- k est un facteur positif, $k \in [0; 1]$;
- i est le numéro du groupe de priorité ;
- n est le nombre de groupe de priorités disponibles pour le patient.
- T est la durée maximale de traitement ;
- le terme $(T - \sigma)$ fixe la vitesse à laquelle la courbe converge vers la probabilité voulue ;
- t est le pas de temps courant.

En fixant T et t , on peut trouver la valeur de σ pour une probabilité, de choix de groupe de priorité, que l’on veut atteindre. Le paramètre k fixe la distance entre les courbes des différentes priorités.

Le graphe de cette loi est illustré sur la figure 4.22, page 90.

Cette loi modélise le comportement du patient dans son processus de recherche d’un centre de traitement. C’est une loi multimodale, car il s’agit de modifier la

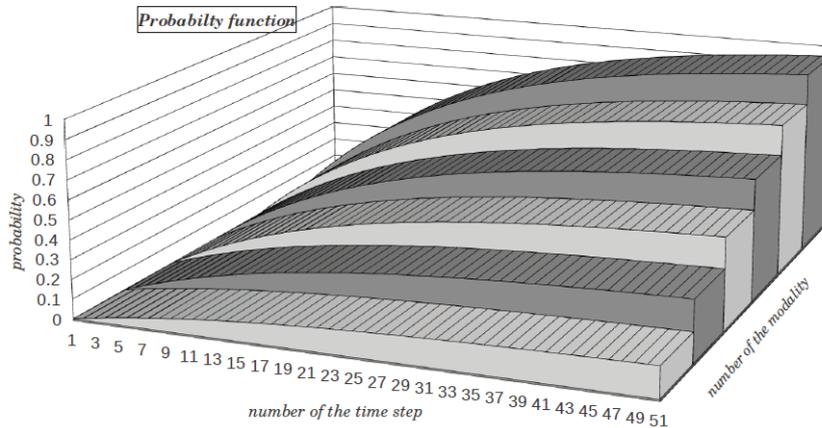


FIGURE 4.22 – Loi du comportement du patient en fonction de temps avant sa date de début de traitement. L'exemple est basé sur 51 pas de temps selon l'axe x et six groupes de priorité sur l'axe y . Sur l'axe z on trouve la probabilité de choix de groupe de priorité.

courbe en fonction du groupe de priorité choisi. Les deux facteurs sont le groupe de priorité et le temps restant avant le traitement. Plus le groupe de priorité est faible en gain thérapeutique, moins le patient aura tendance à le choisir. On appelle ce processus le changement du groupe de priorité, qui est possible lorsque le patient dispose de plusieurs groupes de priorités pour son indication. La deuxième dimension de cette loi multimodale est le temps. Moins il reste du temps avant le traitement, plus le patient aura tendance à changer son groupe de priorité, pour multiplier les chances d'avoir un traitement. On a donc deux dimensions à prendre en compte lors de cette modélisation.

4.4.4.4 Les concurrents du patient

Lorsque le patient est en train de chercher un traitement, il est confronté à des *concurrents*. En effet, ce sont les autres patients qui sont dans l'environnement et qui peuvent choisir le même traitement ou des traitements équivalents. Les *concurrents* d'un patient sont ordonnés suivant des critères précis. Il est possible d'utiliser l'ordonnement suivant :

- On peut tout d'abord ordonner les patients, qui cherchent un traitement en même temps, par rapport à leur groupe de priorité courant. En effet, tous les patients caractérisés par des groupes de priorité avec un gain thérapeutique supérieur sont des *concurrents* de ce patient ;
- Le deuxième niveau est celui de la date de début de traitement. Tous les patients de tous les groupes confondus et avec des dates de début de traitement précédant la date de début de traitement du patient sont des *concurrents* directs pour lui.

La concurrence entre les patients est exprimée lors de leur demande vers les mêmes centres de traitements pour des traitements équivalents. Leurs actions lorsque la réponse des centres pour un traitement est arrivée reflètent directement la concurrence. De son côté, le centre répond en classant les patients par ordre de priorité. La rencontre de ces deux processus permet une évolution de l'état du patient et des centres de traitement au cours de la simulation. En effet, l'environnement du prototype gère tous les processus de manière à obtenir les meilleures performances au niveau des soins des patients et pour satisfaire toutes les contraintes posées par les patients et par les centres de radiothérapie souhaitant évaluer des traitements innovants spécifiques.

Cette organisation est un exemple de hiérarchie entre l'environnement global, les patients, les centres, les mécanismes extérieurs tels que le générateur des patients et le mécanisme du gestion des patients par groupe. Toutes ces entités fonctionnent en même temps dans le même but commun : la réalisation de la simulation du prototype.

4.4.4.5 Recherche d'un traitement

Dans cette partie sont décrits les moyens dont dispose le patient pour chercher un centre de soins qui corresponde à sa demande (voir 4.23).

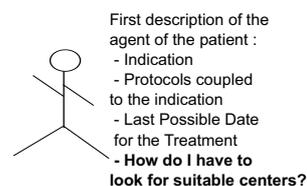


FIGURE 4.23 – L'agent du patient doit ordonner les centres pour pouvoir chercher un traitement.

En considérant les hypothèses faites dans les paragraphes précédents, un processus de recherche valable pour chaque patient est élaboré. Ce processus reste générique et applicable dans toutes les situations. La méthode générique tient compte de la maladie du patient, de son état de santé global et des disponibilités des centres. Pour utiliser cet algorithme, quelques hypothèses doivent être strictement respectées. Toute modification de cet algorithme doit obéir au raisonnement "Cased Based Reasoning" (section 4.2), ceci pour garantir la faisabilité du nouvel algorithme. Les hypothèses fixées sont les suivantes :

- Le patient commence son traitement avec son meilleur groupe de priorité. Cette hypothèse a été annoncée dans le paragraphe des groupes de priorité. Si l'on veut modifier cette hypothèse, on spécifie un parcours des groupes de priorité avec un critère suivant lequel le patient peut les ordonner. Ceci peut modifier le comportement du patient et la sélection des centres. L'intérêt est l'impact sur le recrutement des patients par les centres. Un ordonnancement différent peut avoir comme but une compétition différente entre les traite-

ments innovants et les traitements standards.

- Le patient a choisi son traitement.

Le patient qui a choisi un traitement dans un centre acceptant de le prendre en charge ne peut le refuser, et doit renoncer à tous les autres traitements, qui lui sont proposés en même temps. Il doit également cesser la recherche de places disponibles immédiatement pour céder sa place aux autres patients.

- Le patient accepte une liste d'attente.

Le patient a la possibilité d'accepter une situation particulière dans une liste d'attente d'un centre de traitement. Lorsque cette place lui est proposée, et qu'il l'accepte, il a le droit de garder sa place dans la liste d'attente et en même temps de chercher d'autres centres de traitements. Cela peut être avec le protocole courant, ou avec des protocoles appartenant à des groupes de priorité inférieurs. Dans le cas où le centre de traitement, qui a la liste d'attente, décide de libérer le patient de son état d'attente (i.e. le patient doit sortir de la liste), le patient ne peut rester dans la liste par sa propre volonté. Cette situation, qui dépend de l'organisation interne du centre, est précisée dans la suite.

- Le patient ne trouve pas de traitement.

Lorsque le patient ne peut trouver un centre de traitement convenable, on fait l'hypothèse qu'il est soigné dans un centre disposant de traitements standards. Un mécanisme extérieur compte le nombre de patients sortis du système de cette manière. Cette situation peut arriver soit par manque de centres qui traitent sa maladie, soit parce que le patient ne souhaite pas utiliser les traitements innovants.

En tenant compte de ces hypothèses, l'agent utilise les connaissances dont il dispose pour trouver un traitement. Son comportement a été modélisé suivant plusieurs aspects. Le plus complexe étant son comportement lors de la recherche des centres. Le comportement du patient pendant le processus de recherche est donné par les règles suivantes :

1. Ordonnement des traitements existants en fonction de l'indication.

En effet, lors de sa genèse, le patient est doté d'une position géographique et de plusieurs traitements. Ensuite le mécanisme de l'ordonnement des traitements est appelé. Il s'agit de visiter les traitements en fonction de l'indication et des groupes de priorité. L'agent du patient appelle ce mécanisme (figure 4.24) et reçoit en réponse un ordonnancement qu'il peut suivre lors de la recherche des centres de traitement et durant sa vie dans la simulation.

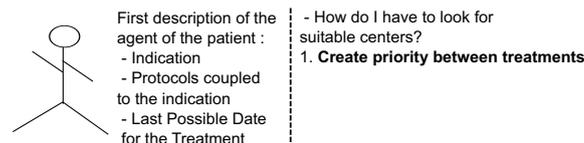


FIGURE 4.24 – L'agent du patient doit ordonner les centres pour chercher un traitement.

2. Ordonnement des centres existant pour chaque groupe de priorité.

Le patient fait appel au mécanisme d'ordonnement des centres en fonction de l'éloignement, par rapport au domicile du patient, et ceci pour chaque groupe de priorité. L'ordonnement repose sur deux critères : les groupes de priorité et l'éloignement (voir figure 4.25). Les centres sont organisés en groupes, chaque groupe contient des centres de distances équivalentes. Chaque priorité est caractérisée par une liste contenant ces groupes de centres.

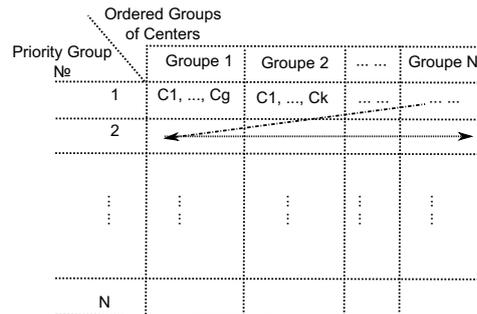


FIGURE 4.25 – Ordonnement des centres en fonction de la distance par rapport au domicile du patient et du groupe de priorité.

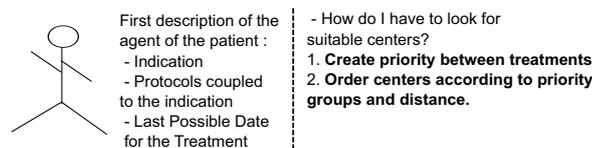


FIGURE 4.26 – Le patient rajoute l'ordonnement des centres dans son processus de recherche.

Pour chaque groupe de priorité, les centres doivent être ordonnés suivant leur éloignement du domicile. Des groupes de centres qui se situent à des distances équivalentes du domicile du patient sont créés. Ceci ne veut pas dire que les centres se trouvent dans la même région, mais uniquement que les accès du patient vers ces centres sont équivalents. Le groupe de priorité courant est caractérisé par la liste des groupes ordonnés de centres et le patient adresse sa demande vers ces groupes en respectant l'ordre. Ceci revient à considérer que le patient préfère d'abord s'adresser aux centres se trouvant au plus près de son domicile (figure 4.26).

3. Attribution pour le départ du meilleur groupe de priorité.

Suivant l'algorithme du classement des traitements, le patient se voit attribuer le premier groupe de priorité par défaut. Si l'on le souhaite on peut modifier ce mécanisme en respectant les règles de modélisation citées plus haut.

4. Formulation de la demande avec le groupe de priorité choisi et envoi vers les centres de traitement susceptibles de pouvoir prendre en charge le patient. Avec le groupe de priorité courant, le patient doit rechercher des centres disponibles pour les traitements existant. Les centres questionnés sont dans la liste des centres de ce même groupe. Ainsi, lorsqu'un groupe de centres est concerné, le patient doit envoyer sa demande à tous les centres du groupe. Les demandes du patient aux différents centres simultanées (figure 4.27).

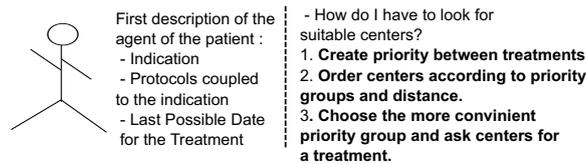


FIGURE 4.27 – L'agent du patient demande un traitement aux centres ordonnés.

5. Récupération de la réponse des centres et évaluation.

Lorsqu'un centre reçoit une demande de traitement de la part d'un patient, il évalue et juge s'il peut accepter le patient. Ce processus est géré par l'agent du centre et plusieurs critères sont considérés. Ces critères sont discutés en détails dans la section consacrée à l'agent du centre et à son fonctionnement. Dans ce paragraphe, on mentionne uniquement les réponses possibles de la part du centre. La réponse envoyée par le centre peut prendre trois formes.

- une réponse positive de traitement immédiat ;
- une réponse avec une proposition de liste d'attente ;
- ou une réponse négative d'impossibilité de traitement.

Le patient reçoit les réponses venant des centres et doit les évaluer (voir figure 4.28). L'évaluation est considérée selon plusieurs critères.

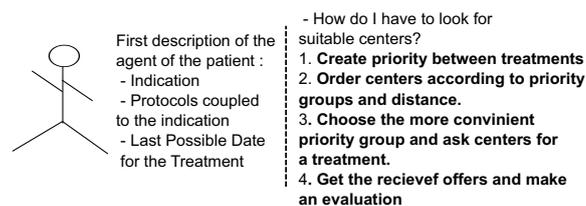


FIGURE 4.28 – L'agent du patient évalue les offres reçues.

- (a) Prise en compte des réponses négatives.

Lorsque le patient reçoit des réponses négatives, il doit en tenir compte. Il est nécessaire d'enregistrer ces réponses négatives surtout si d'autres réponses ne sont pas présentes pour l'ensemble des centres vers lesquels une demande a été envoyée. Dans ce cas, un passage vers un groupe de priorité inférieur est imposé. Il n'est pas bénéfique pour le patient de

rester et chercher des centres avec le groupe de priorité courant, lorsque de tels centres ne sont pas disponibles. La dégradation du groupe de priorité est immédiate.

(b) Comparaison des réponses positives (voir fig 4.29).

Les réponses positives des centres sont évaluées de la manière suivante :

- Le patient choisit le centre qui propose la date de traitement la plus récente par rapport à la date courante. Les réponses sont données, en tenant compte de la date courante de la simulation et le patient peut évaluer la date la plus proche.
- Un patient ne peut refuser une réponse positive pour un traitement. Les centres sont en compétition par rapport à leur disponibilité pour prendre en charge un traitement.

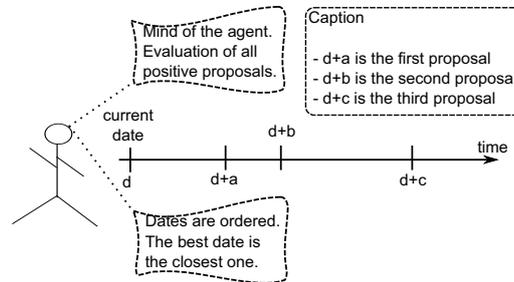


FIGURE 4.29 – L’agent du patient évalue les offres reçues par rapport aux dates proposées. Les dates sont ordonnées en fonction de la date courante. a , b , c sont des décalages dans le temps par rapport à la date courante, désignant trois réponses positives.

(c) Évaluation des centres proposant une liste d’attente.

La proposition d’une liste d’attente n’est acceptée, qu’après évaluation par le patient. Cette proposition est soumise à une évaluation concernant la loi de la DDT (voir section 4.4.4.3, page 88) et surtout influencée par le traitement proposé et le temps restant avant la DDT.

- Plus il reste de temps avant le traitement, plus le patient aura tendance à refuser la liste d’attente proposée ;
- Moins il reste de temps avant le traitement, plus le patient aura envie d’accepter la liste d’attente.

Une liste d’attente n’empêche pas le patient de continuer à chercher d’autres centres avec le traitement courant ou en dégradant son groupe de priorité.

Le patient est en droit de refuser une liste d’attente s’il juge que ceci ne lui convient pas. Lorsque le patient refuse une liste d’attente son évaluation montre que le patient peut, a priori, trouver d’autres centres. Ces centres sont situés soit plus loin dans la géographie, soit avec des groupes de priorité moins importants. À noter que le bénéfice médical diminue avec la dégradation du groupe de priorité. Par conséquent, le

refus du patient pour une liste d'attente avec le traitement courant est par conséquent mémorisé et ne peut se reproduire une deuxième fois pour le même centre.

Des mécanismes de sauvegarde de refus du patient sont implémentés du côté du patient et du côté du centre. Ils permettent de vérifier que le cas ne se reproduise pas. En ce qui concerne le patient, on mémorise uniquement si le centre peut ou ne peut pas prendre en charge le patient. Les raisons pour lesquelles un patient ne souhaite pas aller dans un centre pour un traitement ou dans une liste d'attente peuvent être multiples. Un exemple est l'impossibilité d'une prise en charge adaptée à l'urgence du traitement. Un second exemple peut être que les propositions de la part des centres ne conviennent pas, de par la nature du traitement proposé. Un refus de la part du patient pour une liste d'attente est considéré comme une réponse négative par le centre. Du côté du centre, les identifiants des patients qui ont refusé d'aller dans une liste d'attente ou de prendre un traitement proposé sont mémorisés. Dans ces listes, on ne mémorise que les identifiants des patients concernés. Avec cette méthode, la vérification est double ce qui permet de tenir à jour les refus des patients, ainsi que de réduire les risques de doublons dans les listes du patient et du centre en même temps. Cette double identification est faite dans le but de simplifier la recherche des patients et des centres lors de la simulation.

6. Envoi de la réponse du patient vers les centres choisis.

Lorsque le patient a évalué les réponses des centres, il a choisi ce qu'il doit répondre aux offres proposées. La réponse du patient arrive vers les centres, et ils doivent en tenir compte et mettre à jour leur planning si nécessaire. La réponse des centres peut être exprimée de trois façons :

– Réponse négative.

Lorsque le patient donne une réponse négative, le centre en tient compte uniquement pour les traitements refusés.

– Réponse positive.

Lorsque le patient donne une réponse positive avec un traitement immédiat, le centre doit en tenir compte pour mettre à jour son planning en fonction des contraintes du traitement qui vient d'être accepté. La disposition du traitement est prévu dans le temps de la simulation, suivant les contraintes existantes du centre, les traitements déjà prévus et puis les contraintes exigées par ce dernier.

– Réponse positive pour une liste d'attente.

Lorsque le patient donne une réponse positive à une liste d'attente, il s'ensuit l'ajout du patient dans la liste d'attente. Cette action ne concerne que l'identifiant du patient. Ce dernier est mémorisé dans la liste d'attente pour que le centre puisse contacter le patient et aussi l'informer de l'évolution de sa place dans la liste d'attente. En effet, dans une liste d'attente, le patient

est libre de prendre la décision de partir ou de chercher d'autres centres de traitement disponibles, tout en gardant sa place. À savoir que sa situation dans la liste d'attente évolue avec le temps en fonction de l'activité du centre dans le système. Le centre est donc tenu d'informer le patient de tout changement de son classement et de toute évolution qui peut aussi entraîner une exclusion de la liste d'attente.

Cette évolution est illustrée sur la figure 4.30. Nous pouvons voir que de nouveaux patients peuvent entrer dans la liste d'attente, ce qui entraîne, parfois, un nouveau reclassement du patient courant. Le patient peut très bien voir son classement dégradé ou favorisé. Lors de chacune des deux possibilités, le patient est alerté. De cette manière, le patient est capable de réagir dans une situation réelle qui ne reste pas figée, mais dépendante de son environnement. De plus, des évolutions des ses concurrents ont lieu. Ce sont les autres patients de la liste d'attente ou qui n'ont pas encore trouvé un traitement. Un processus d'évaluation du futur classement des patients est également modélisé. Ce dernier est représenté dans la section présentant l'agent du centre.

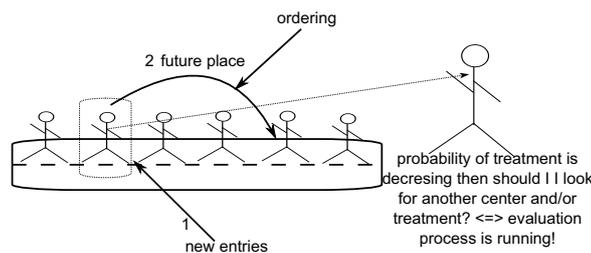


FIGURE 4.30 – Evaluation de l'état du patient lorsqu'il se trouve dans une liste d'attente. Étape 1 : nouveaux arrivants. Étape 2 : futur classement. Étape 3 : évaluation par le patient.

7. Retour de la réponse des centres.

Il s'agit de la mise à jour des plannings des centres pour une réponse positive d'un traitement immédiat ou pour une acceptation d'une liste d'attente. Le patient choisit le traitement parmi ceux qui lui ont été proposés. Cette réponse conduit à la mise à jour de la présence de ce patient en tant que demandeur vers les autres centres susceptibles de le prendre en charge.

8. Possibilité de passage vers un groupe de priorité inférieur.

La dégradation du patient vers un groupe de priorité inférieur est une situation qui peut avoir lieu dans des conditions précises (section 4.4.4.2). Un résumé est présenté, ainsi que les conséquences de la dégradation qui peuvent avoir lieu.

- (a) Lorsque le patient a exploré tous les centres du groupe de priorité courant et que parmi eux, aucun ne correspond aux critères demandés, la

conséquence est un passage direct vers le groupe de priorité inférieur. On ne tient pas compte du temps restant avant le traitement (la DDT vue en section 4.4.4.3).

(b) Lorsque le patient a exploré tous les centres du groupe de priorité courant et qu'aucune place n'est disponible ou que le patient ne remplit pas les exigences des centres pour qu'il puisse être pris en charge, le passage vers le groupe de priorité inférieur est également direct. Le temps restant avant le traitement n'est pas pris en compte car dans tous les cas le patient ne peut trouver un traitement avec son groupe de priorité courant.

(c) Le patient se trouve en liste d'attente et il estime qu'il doit chercher des centres en plus pour un traitement.

Comme il a déjà exploré les centres de son groupe de priorité courant et du groupe d'éloignement courant deux cas peuvent se produire :

i. Premier cas : il trouve un ou plusieurs centres pour le groupe de priorité courant et ceci dans les groupes d'éloignement suivant ;

ii. Deuxième cas : il ne trouve pas de centres en explorant les groupes d'éloignement, existants, pour le groupe de priorité courant. La dégradation vers un groupe de priorité inférieur pour la nouvelle recherche est immédiate.

(d) Le patient ne peut pas dégrader son groupe de priorité.

Cette situation peut arriver lorsque toutes les possibilités ont été explorées. Il s'agit non pas d'exclure le patient, mais de le prendre en charge dans un centre de traitement se trouvant à l'extérieur du système. Ce centre propose un traitement standard. Ces centres sont en général bien répartis dans la géographie, puisque les traitements standards sont évalués et connus. En conséquence, les centres n'ont pas de mal à les prendre en compte. De ce fait, nous considérons qu'il n'est pas nécessaire de les représenter dans le système. Ce qui n'empêche en rien leur présence dans les évolutions futures ou bien pour une simulation particulière. Leur présence exige uniquement leur description en fonction des données demandées pour que la simulation puisse se dérouler correctement.

4.4.5 Le centre et son agent dans le modèle de recrutement

Dans le système actuel, le centre de radiothérapie est un agent aussi complexe que celui du patient. Sa modélisation a été effectuée de manière générique, pour pouvoir ensuite créer des cas spécifiques et extensibles menant à la description de tout type de centre. En effet, lors des discussions nombreuses avec les experts médicaux, les caractéristiques les plus pertinentes des centres ont été extraites et regroupées.

4.4.5.1 La position géographique du centre

Chaque centre est doté d'une position géographique, ce qui a une importance économique pour le centre et dépend de la position relative des autres centres. De plus, il est nécessaire de prendre en compte l'accès aux soins proposés et ceci en fonction des réseaux de soins et de transport. Nous avons pris en compte l'accessibilité des centres thérapeutiques. Pour ce faire, on a élaboré un mécanisme basé sur les paramètres suivants :

- La localisation du centre dans la géographie ;
- L'influence du centre autour de lui qui est exprimée sous forme de couronnes d'influence.

Définition : Couronne

La couronne d'un centre est une réunion de zones géographiques élémentaires. Elle exprime l'accessibilité au centre des patients se trouvant dans ces zones.

La conséquence de cette définition est que le centre peut avoir une ou plusieurs couronnes. Chaque centre définit ses couronnes et elles sont spécifiques pour lui. Ainsi, l'agent du centre possède un mécanisme qui exprime son "attractivité" en terme d'accès aux soins. Il s'agit d'un accès comprenant le réseau de transport urbain, national, maritime, aérien et terrestre.

Les couronnes de deux centres peuvent également avoir une intersection (voir figure 4.31, page 100). De cette manière s'exprime la concurrence entre deux centres. Cela veut dire que :

- La première situation possible est celle d'un patient qui peut avoir une place pour un traitement dans deux centres distincts. Par rapport au domicile du patient, les deux centres se trouvent à des distances différentes, ce qui veut dire que le patient n'est pas dans la même couronne pour chaque centre. Si le traitement est le même, c'est la distance et l'accès aux soins qui vont influencer le choix du patient ;
- La deuxième situation possible est que les deux centres se trouvent à des distances équivalentes du patient, mais dans ce cas les traitements sont différents. Il s'en suit que c'est le bénéfice du traitement qui joue le rôle décisif ;
- Un troisième cas existe. Il présente un accès aux soins équivalent et un traitement équivalent. Dans ce cas, le choix importe peu, car les deux autres critères sont équivalents. Le choix reste alors arbitraire, en considérant des dates de début de traitement équivalentes. Dans le cas contraire, de dates différentes, la date la plus proche est choisie.

La position géographique est attribuée au centre dès l'initialisation du prototype et fait partie des paramètres obligatoires que l'on demande à l'utilisateur. Grâce à cela, on peut dire que le centre est un agent situé. Elle permet également de tenir compte de l'influence que les centres peuvent exercer sur les patients et de la compétition entre eux pour les services offerts. C'est une tendance à ne pas négliger lorsque le centre opte pour la proposition d'un traitement innovant et qui n'est présent que très peu dans un pays voire pas du tout. Dans ce cas, il est nécessaire pour le patient de chercher au niveau continental ou mondial pour

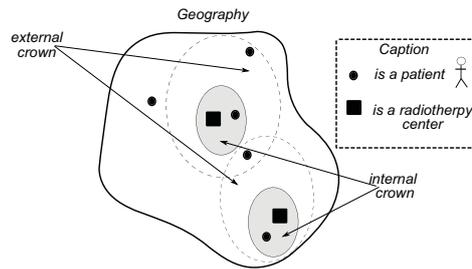


FIGURE 4.31 – Centres et couronnes, situation de concurrence des centres.

trouver un traitement.

4.4.5.2 Modélisation de la spécialité du centre

L'agent du centre est modélisé de façon générique. Les différentes parties qui lui correspondent sont différenciées et peuvent donner lieu à des ajouts de nouvelles fonctionnalités et/ou des modifications. Dans la suite est décrite la modélisation du centre et les interactions de ces agents. Les agents et les méthodes décrivant les interactions entre les patients et les centres sont détaillés.

Le centre est un agent situé et distribué et qui, de plus participe à la spatialisation. Il possède des propriétés spécifiques qui servent lors du processus de recherche du patient (section 4.4.4.5).

Les centres de radiothérapie sont également caractérisés par leur spécialité. Ils sont équipés pour soigner une multitude de maladies cancéreuses, par l'utilisation de machines spécifiques, spécialement adaptées à cet effet. En effet, en fonction de sa spécialité, un centre peut directement être attribué pour le traitement des cas spécifiques. On peut prendre comme exemple un centre d'hadronthérapie ou d'un centre disposant d'un Cyberknife. Les caractéristiques des deux centres reliées spécifiquement aux traitements par ces machines sont différentes. La distinction aux niveaux des spécialités est modélisée sachant que la description des traitements reste générique et équivalente pour tous les centres. La première distinction est celle de la spécialité. Une description a été définie. Elle permet de décrire les spécialités en général, et ensuite la spécialité qui correspond au centre courant pour la modélisation. Chaque spécialité appartient à l'arbre général appelé "centre de radiothérapie", englobant les caractéristiques générales (voir figure 4.32, page 101).

On remarque qu'il s'agit également de l'ontologie des centres de radiothérapie. Cette modélisation est également appliquée lors de l'implémentation de la structure de donnée du centre. L'implémentation correspondante est générique et modifiable, elle permet de décrire toutes les situations existantes. Lorsqu'un centre n'est pas caractérisé par une spécialité, il n'a pas besoin de contenir cette option. Elle existe uniquement en cas de besoin et elle est créée dynamiquement en mémoire (figure 4.33, page 101).

Avec les spécialités des centres il devient inévitable de parler de leur politique médicale. Elle découle de la volonté de chaque centre de définir une préférence pour

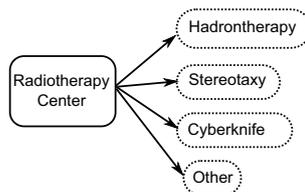


FIGURE 4.32 – L'ontologie du centre de radiothérapie permet de décrire les différentes situations de thérapie en fonction des machines et des traitements correspondants.

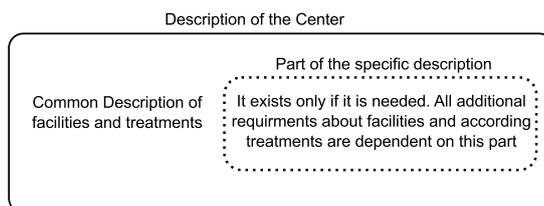


FIGURE 4.33 – Modélisation et implémentation de la partie spécifique des centres de radiothérapie.

les traitements.

4.4.5.3 L'agent de la politique médicale

La politique médicale est un agent faisant partie de l'agent du centre. Plus particulièrement, elle est disposée au niveau de l'esprit de l'agent du centre et des actions que le centre pourrait effectuer pour accepter certains patients spécifiques.

Définition : Politique médicale

La politique médicale est un ordonnancement particulier des traitements proposés par un centre. Elle exprime le choix médical envers les traitements proposés par les centres et en fonction des dispositifs médicaux dont ils disposent.

De plus, avec la politique médicale, il peut émettre des priorités et ordonner les traitements suivant des critères spécifiques. La politique médicale a un effet sur le fonctionnement des centres de radiothérapie. En conséquence, elle doit être modélisée de façon à prévoir l'évolution du prototype. Chaque centre de radiothérapie est caractérisé par l'agent de la politique médicale, qui toutefois n'est pas obligatoire. En effet, le choix est laissé à l'utilisateur pour cette partie de la description du centre. Lorsque la politique médicale n'est pas présente dans la description d'un centre alors les traitements ne sont pas ordonnés. L'acceptation des patients se fait alors en vérifiant uniquement les contraintes imposées par le traitement d'un patient, en tenant compte de la disponibilité des salles de traitement. Puisque la définition de la politique médicale est donnée, nous pouvons définir une règle de la politique médicale. Une règle sert à exprimer l'ordonnancement des traitements d'un centre.

Définition : Règle de la politique médicale

Une règle de politique médicale est construite de la façon suivante :

- Elle dispose toujours d'une liste d'entrées qui sont évaluées. Suite à l'évaluation des entrées en fonction de critères bien précis, des patient sont admis ou non ;
- Une règle stipule quelle est l'importance de ladite règle parmi toutes les autres. La conséquence est que les règles sont ordonnées entre elles.

Définition : Temps réservé

On appelle temps réservé dans le planning d'un centre un temps qui est spécialement dédié à un certain traitement. Il fait partie du planning du centre.

En utilisant cette définition globale, les règles suivantes ont été modélisées :

- La règle des indications prises et refusées.

En effet, chaque centre de radiothérapie peut considérer qu'il n'est pas dans ses capacités ou bien dans son intérêt de soigner des patients avec certaines indications. Ainsi, le patient est obligé de chercher d'autre moyens de soins. Nous pouvons supposer que le centre décide de tester quel est l'effet que le refus des indications désignées aura sur le recrutement durant la période étudiée.

Puisque le centre peut se permettre de ne pas accepter certaines indications, il peut en prioriser certaines. Le but est le même, mesurer l'effet sur le recrutement et ses statistiques en prenant en plus grand nombre certaines indications. La méthode proposée pour cette règle est d'ordonner les patients en fonction des indications. Cette méthode des différents traitements possibles du patient. Il est également nécessaire de vérifier le traitement car avec lui, le centre peut juger de la disponibilité des machines nécessaires.

De cette méthode on retiendra comme entrée l'information venant de l'indication et des protocoles, pour juger des techniques de traitement indispensables et sans oublier de vérifier la date de traitement du patient au plus tard. En effet, si la date est trop récente par rapport à ce que le centre est en mesure de proposer, il n'est pas possible de prendre le patient en charge. En dernier, la réponse donnée au patient est élaborée par le centre, en fonction de ses priorités et disponibilités.

- La règle des couples indication/protocole.

Dans la politique médicale des centres il peut une préférence vers certains couples de traitement [indication/protocole]. Ces couples décrivent avec précision le traitement à appliquer. Cette règle peut avoir un impact sur sur le recrutement du centre. On peut ainsi cibler l'utilisation des machines uniquement sur certains traitements.

Il suffit alors de permettre la description des couples [indication/protocole] et la prise en compte de leur utilisation dans le planning des centres et les soins des patients déjà planifiés. En effet, lors des discussions avec les experts médicaux, nous avons remarqué, qu'il existe des périodes de temps accordées à ces couples [indication/protocole]. D'après les experts médicaux, ces périodes

de temps correspondent à un nombre de patients soignés. Nous avons proposé une modélisation basée sur le nombre de patients à soigner dans une période. Puisque ces périodes se répètent, on demande la date à laquelle une période avec les mêmes caractéristiques réapparaît. Soit cp_i un tel couple caractérisé de la manière suivante :

- le centre réserve pour ce couple un nombre fixe de traitements qui ont lieu toutes les n semaines, par exemple ;
- la réservation de ces traitements prioritaires commence dès la première semaine d’ouverture du centre (ou la première semaine de la simulation) ;
- la façon de planifier ces traitements du couple cp_i reste simple. Des créneaux réservés pour ces traitements ont été créés. Ils correspondent aux séances prévues par le protocoles ;
- Soit i un des couples prioritaires ($i = 1, \dots, I$), et soit k la semaine courante de la simulation ($k = 1, \dots, K$). Soit W_k le temps de travail maximal d’accueil d’un centre pour une semaine. Avec ces notations, soit $C_{cp_i,k}$ le temps attribué au couples i durant la semaine k . Il s’ensuit que :

$$\sum_i C_{cp_i,k} \leq W_k \quad (4.1)$$

L’avantage d’utiliser dans la politique médicale le temps réservé pour les couples [indication/protocole], est qu’aucun patient non prioritaire ne peut le prendre. Ces séances réservées, en avance sont disponibles uniquement pour les patients caractérisés par le couple courant cp_i . Lorsque ces créneaux restent non utilisés, ils sont libérés au bout d’un certain temps. Le temps correspond à la semaine courante de simulation, pour cette version du prototype. C’est-à-dire que si, dans la semaine courante, des patients du couple cp_i ne se sont pas présentés, la place disponible est libérée pour les autres traitements. On donne d’abord un accès aux traitements prioritaires, puis aux traitements standards que le centre a décidé de prendre en charge. Ceci respecte la politique médicale.

Les entrées de cette règle sont tous les couples [indication/protocole] mentionnés par le centre comme prioritaires et les patients qui correspondent. À remarquer qu’un patient, doté à la fois d’un couple prioritaire et d’un couple non prioritaire aura plus de chance d’être pris avec son couple prioritaire. On considère également la DDT (section 4.4.4.3). Les patients les plus urgents sont pris en premiers.

- La règle du groupe de priorité.

Un groupe de priorité est caractérisé par des couples [indication/protocole]. Ici, on peut avoir des couples [indication/protocole] différents et avec des caractéristiques différentes.

La règle pour le temps réservé des couples diffère par rapport aux règles précédentes puisqu’elle dépend du fonctionnement du centre au cours de la simulation. Le règle du groupe de priorité consiste à réserver une part du temps d’ouverture du centre aux patients du groupe de priorité. Ainsi, pour

le chaque groupe de priorité qui fait partie de la politique médicale, on dispose une donnée qui caractérise le temps réservé. À noter que le temps réservé de tous les groupes de priorité participant à la politique médicale ne doit pas dépasser le temps d'ouverture du centre sur la période étudiée.

Soit $PrGr_j$ ($j = 1, \dots, J$) le groupe de priorité courant pour lequel on aura du temps réservé. On lui associe une partie du temps d'ouverture du centre sur la période observée. Soit Op_j , le temps attribué à $PrGr_j$. Il s'en suit de cette règle que :

$$\sum_j Op_j \leq TCap \quad (4.2)$$

où $TCap$ est la capacité totale du centre.

Cette formulation doit être utilisée avec précaution car, il faut tenir compte du temps réservé pour les autres règles de la politique médicale.

Dans ce mécanisme, il est nécessaire de renseigner les informations suivantes en entrée :

- La capacité totale du centre sur la période étudiée ;
- La capacité utilisée par les autres règles ;
- Le temps réservée pour chaque groupe de priorité.

Ainsi, la règle peut être appliquée. Il s'ensuit qu'en fonction du temps réparti entre les priorités, le centre peut donner la priorité aux groupes qu'il souhaite. On peut conclure que les règles ne sont pas complètement indépendantes les unes des autres, et que l'agent du centre doit gérer sa politique médicale en fonction de la situation courante du centre.

- La règle de l'utilisation des machines génératrices de particules.

Dans le prototype actuel, cette règle sert à limiter l'usage de certaines machines génératrices de particules lors du fonctionnement habituel du centre. Les avantages viennent du fait que cette machine génératrice de particules peut être utilisée pour des prestations payantes pour la recherche scientifique ou pour un organisme extérieur à l'hôpital. La règle concerne l'observation de l'usage de la machine génératrice de particules en fonction du taux de production total. Ainsi, lorsque le taux d'utilisation autorisé pour les soins dépasse un certain seuil la machine est arrêtée jusqu'à nouvelle possibilité d'utilisation.

Pour le bon fonctionnement de cette méthode, un mécanisme faisant partie de la politique médicale veille à ce que le taux d'utilisation maximal ne soit pas dépassé par rapport aux utilisations courantes jusqu'au jour courant.

Chaque règle possède ses entrées et ses méthodes d'évaluation de la situation courante du centre de radiothérapie. Une règle peut être vue comme un agent autonome. Cependant, l'agent responsable de la politique médicale dans son intégralité joue également un rôle important. Il contient ces règles et les coordonne pour que les capacités attribuées aux priorités soient respectées. Les règles peuvent avoir des priorités entre elles et de plus, et même entrer en conflit. Lorsqu'il s'agit des prio-

rités à suivre et que les règles de la politiques médicales ne sont pas nombreuses, l'ordonnancement est simple. Lorsqu'il s'agit des conflits pouvant intervenir, il est nécessaire de modéliser le savoir-faire médical qui impose les contraintes. On applique d'abord la règle du couple, puis la règle de la priorité, ce qui est loin d'être une situation évidente lorsqu'il s'agit de modéliser la politique médicale.

Enfin, l'agent de politique médicale est dépendant du centre dans la mesure où le centre décide de renseigner une politique médicale. Le centre, au contraire, n'est pas dépendant de l'agent de la politique médicale. Lorsque la politique médicale ne fait pas partie du fonctionnement du centre, l'agent qui lui est consacré n'existe pas. Une règle renseignée correctement fait partie de l'agent. La politique médicale n'a pas de limite minimum et maximum du nombre de règles qu'elle peut contenir. L'agent de politique médicale est modélisé de façon autonome. La présence de cet agent dans la description du centre repose sur la volonté d'ordonnancement des traitements par le centre.

La politique médicale doit s'insérer dans le fonctionnement du centre. En effet, lorsque les patients arrivent vers les centres, chaque centre vérifie tout d'abord en fonction de sa propre politique médicale les patients qui peuvent être acceptés. Ensuite les patients non prioritaires sont évalués (voir figure 4.34).

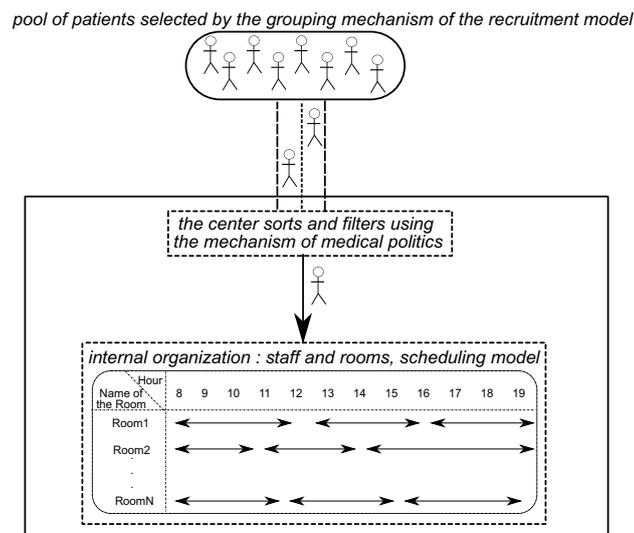


FIGURE 4.34 – Le rôle de la politique médicale dans un centre.

En conséquence, les patients évalués positivement par la politique médicale sont a priori programmés pour leur traitement si une place disponible existe dans le planning du centre. Le planning est organisé en fonction de la politique médicale et lorsque des contraintes spécifiques existent pour le respect des soins sont respectées. Pour donner un exemple, il est possible qu'une machine dans le centre ne soit disponible que dans une des salles de traitement. Ceci impose que tous les traitements exigeant cette machine se fassent uniquement dans cette salle.

De la même manière, il faut mentionner qu'avec les contraintes de la politique

médicale, la planification de chaque salle, qui correspond aux traitements prioritaires, est affectée. Il est donc obligatoire d'avoir un agent de la politique médicale qui gère les échanges entre l'agent du centre et l'agent de la planification. par ailleurs, ce dernier échange également avec les patients (prioritaires ou non).

En effet, l'interaction entre les agents des patients et celui de la politique médicale est importante. On peut distinguer deux rencontres directes qui sont entre l'agent de la politique médicale et les patients prioritaires tout en tenant compte de la conséquence de ces rencontres sur les patients non prioritaires. La politique médicale réagit comme un filtre, lors du "recrutement" des patients. Son agent sélectionne les patients en fonction des caractéristiques données par leurs couples [indication/protocole]. De plus, pour être encore plus précis, un ordonnancement sur les couples a lieu en fonction des priorités des règles énumérées ci-dessus. Plusieurs cas peuvent se présenter. Un premier est celui qui fait que des patients se retrouvent repoussés dans l'ordonnancement de l'accueil du centre, car les patients prioritaires passent avant. Un deuxième cas peut apparaître lorsqu'un patient peut bénéficier de deux traitements dans le même centre, un étant prioritaire et l'autre non. Dans ce cas, c'est le traitement prioritaire qui l'emporte. Il est également possible que le patient soit présent avec deux traitements prioritaires, ça sera le traitement le mieux placé dans la liste des règles qui l'emporte. Lorsque les traitements sont de même niveau, ça sera le traitement pour lequel une place est disponible et lorsque des places existent pour tous les traitements, un choix arbitraire est imposé.

La création de l'agent de la politique médicale a une conséquence directe sur la modélisation du centre. En effet, nous avons créé la politique médicale pour permettre au centre de pouvoir exprimer ses préférences pour certains traitements et en même temps tester l'effet que cela provoque envers les patients. Lorsque l'on permet l'utilisation de la politique médicale, nous devons proposer une solution pour proposer aux patients concernées un soin prioritaire même si une place immédiate n'est pas disponible. La solution concerne la création d'une liste d'attente.

4.4.5.4 L'agent de la liste d'attente

Pour pouvoir expliquer comment réagit l'agent de la politique médicale et comment fonctionne la création de la liste d'attente, nous allons dans un premier temps nous concentrer sur la figure 4.35, page 107.

Ce schéma reprend la figure 4.35 et rajoute deux nouveaux termes, qui sont la liste d'attente et les patients refusés. La collaboration de l'agent du centre utilisant la politique médicale et de l'agent de planification obéit au fonctionnement suivant :

- Les patients prioritaires sont placés, s'il existe des place disponible. Ces patients sont ordonnés suivant les critères déjà mentionnés ;
- Si des patients prioritaires sont demandeurs et le centre n'a pas de place disponible, le patient est placé dans une liste d'attente, sous certaines conditions. Ces conditions sont précisées dans la suite de cette section ;
- Si le centre n'est pas en mesure de proposer un soin aux patients non priori-

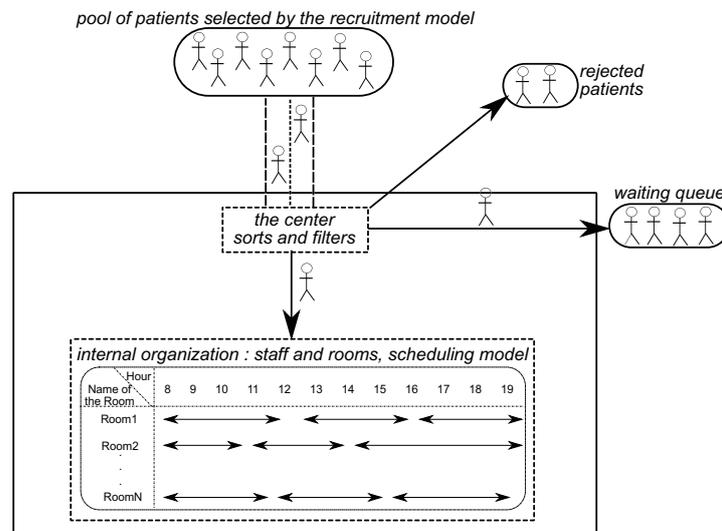


FIGURE 4.35 – La politique médicale dans un centre et sa conséquence directe, la liste d’attente.

taires, il est tenu de les informer, ce qui veut dire qu’ils doivent recommencer leur processus de recherche. Cette action est équivalente à un refus de patients dans la modélisation ;

- La gestion des patients non prioritaires est expliquée en détails dans la section exposant les interactions du centre directement avec les patients.

Puisque la liste d’attente est une conséquence directe de la politique médicale, il est normal d’appliquer un ordonnancement similaire pour la liste d’attente et pour les priorités de la politique médicale. En effet, l’agent de la liste d’attente utilise un mécanisme d’ordonnancement classé tout d’abord par date d’entrée. Ensuite, les patients sont ordonnés en fonction de leur description (l’indication et le protocole). La priorité entre les différents couples est celle imposée par la politique médicale. Cet ordonnancement a pour but le respect des contraintes médicales imposées par le centre avec sa politique médicale. Une prévision de la date éventuelle des traitements présents dans la liste d’attente est systématiquement proposé aux patients. Pour faire ceci, une moyenne mobile est calculée, créée par couple [indication/protocole]. Cette moyenne vise le nombre de traitements effectués dans une période élémentaire de simulation, qui est équivalente à une semaine de l’organisation des centres de radiothérapie. Nous proposons cette moyenne dans le but de pouvoir prévoir une éventuelle prise en charge du patient en fonction de l’évolution du planning du centre. De cette manière, la réponse donnée à un patient, avec proposition de liste d’attente, est accompagnée d’une date.

Comme cela a été expliqué précédemment, la place du patient dans la liste d’attente évolue avec le temps. En effet, en utilisant la moyenne mobile, nous pouvons prévoir si le traitement du patient aura lieu avant sa DDT (section 4.4.4.3) ou après.

- Lorsque le traitement a de bonnes chances d’avoir lieu avant, le centre n’a pas

- de raison de faire partir le patient de la liste d'attente ;
- Dans le cas contraire, le patient se voit refuser sa place dans la liste d'attente car les chances pour qu'il soit soigné dans les bons délais est trop faibles ;
 - Une autre raison pour qu'un patient ne soit plus dans la liste d'attente est que ce dernier a décidé de chercher un autre traitement car il a estimé son attente trop longue et il en a trouvé un. Dans ce cas c'est le patient qui part de la liste d'attente.

Les départs des patients et les arrivées des nouveaux patients font que la liste d'attente est un agent dynamique (illustration 4.36 et 4.37, page 109).

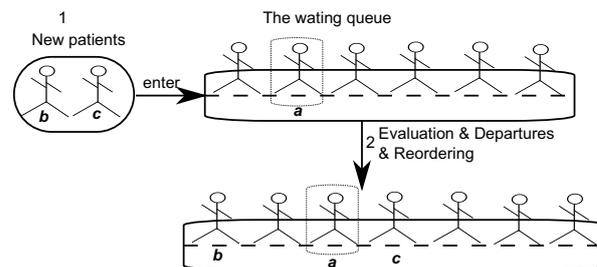


FIGURE 4.36 – L'agent de la liste d'attente, (1) - arrivée des nouveaux patients, (2) évaluation, départ et réordonnancement de la nouvelles liste d'attente.

De plus, l'agent de la liste d'attente est un agent d'une grande importance lorsque la politique médicale est mise en place. En effet, l'agent de la liste d'attente doit discuter avec plusieurs entités à la fois. Tout d'abord la discussion est menée avec le centre qui gère la politique médicale et qui envoie des patients pour des traitements. Ensuite, si le traitement des patients n'est pas possible mais qu'ils sont prioritaires, l'agent de la liste d'attente est sollicité pour répondre aux exigences de garder les patients prioritaires. L'agent de la liste d'attente doit également discuter directement avec l'agent de la planification, lorsque des places pour les patients en attente doivent être trouvées. Enfin, il ne faut pas oublier que lorsque les patients sortent de la liste d'attente, ils doivent passer dans un état de recherche et c'est l'environnement général du prototype qui va les prendre en charge (voir le schéma 4.37, page 109).

Pour la liste d'attente, il est nécessaire de connaître la description précise du patient, de ses traitements et l'indication correspondante. À noter que les patients sont ordonnés en fonction de leur date d'entrée dans la liste d'attente. Enfin, il ne faut pas oublier la discussion de cet agent du centre avec l'agent de chaque patient qui est en attente (figure 4.38, page 109). La discussion a lieu dans les deux sens. La liste d'attente doit prévenir le patient à chaque fois qu'un changement a lieu par rapport à sa place courante. Le patient, de son côté, doit prévenir la liste d'attente au cas où il trouve une place dans un centre différent de celui de la liste d'attente.

Un dernier cas, par rapport au patient et la liste d'attente est la présence éventuelle d'un patient plusieurs fois dans la liste d'attente d'un même centre. Ce cas est possible lorsque le patient se présente pour plusieurs traitements prioritaires et que

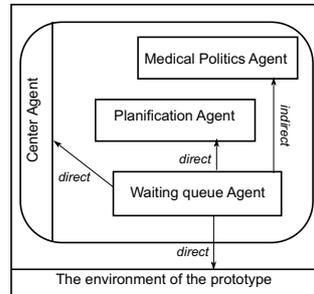


FIGURE 4.37 – Discussions entre les agents de la liste d'attente, du centre, et de l'environnement du prototype.

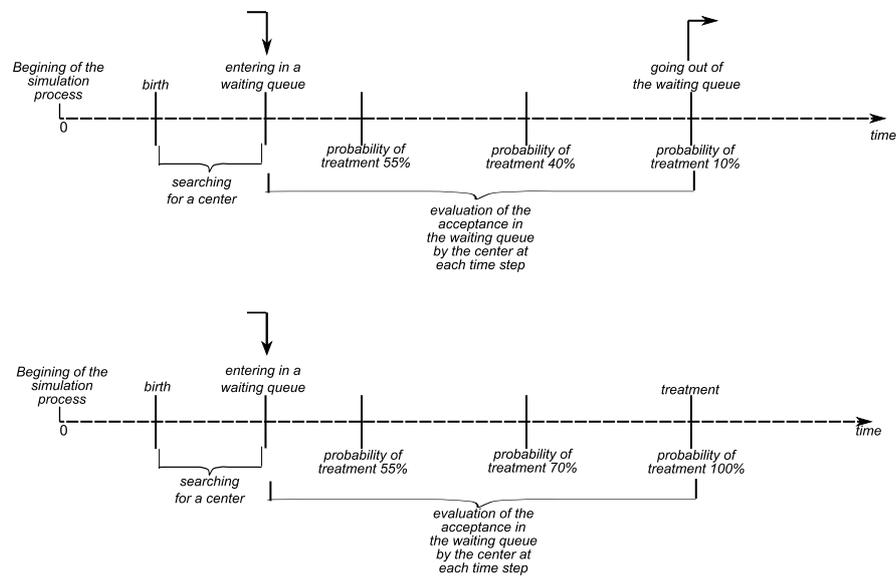


FIGURE 4.38 – Évaluation de l'état d'un patient dans la liste d'attente, dirigée par l'agent du centre.

ces derniers ou une partie d'eux peuvent être pris en charge par un même centre. Dans ce cas, le patient se retrouve placé à différents niveaux dans la liste d'attente en fonction de ses couples [indication/protocole], lorsque les couples offrent un gain thérapeutique différent. Lorsque les couples offrent un gain équivalent, les niveaux de la liste d'attente le sont également.

La liste d'attente existe uniquement si l'agent de la politique médicale existe. La discussion avec l'agent de la politique médicale est indirecte car elle passe par l'agent du centre. En ce qui concerne le lien, il est direct. La liste d'attente doit pouvoir discuter avec l'agent de la planification et l'agent du centre en général. Dans le cas contraire, la planification des patients en attente n'aurait pas lieu. Enfin, la liste d'attente est en lien direct avec l'environnement du prototype pour pouvoir lui passer les patients qui sont expulsés de l'attente d'un traitement. Il est important de mentionner que le départ du patient d'une liste d'attente ne signifie pas son départ de toutes les listes d'attente dans lesquelles il est présent. En effet, chaque liste d'attente se gère de manière différente en fonction des départs, des arrivées et des différentes politiques médicales. En ce qui concerne le centre, chacun possède sa propre politique médicale, donc sa propre liste d'attente. Il y a donc autant d'agents de listes d'attentes et de politique médicales que de centres.

4.4.5.5 L'agent de planification

L'agent de planification joue un rôle important dans la modélisation d'un centre de radiothérapie. Pour pouvoir décrire correctement les services et les disponibilités proposées par un centre envers les patients, il est nécessaire de représenter son planning. De plus, pour répondre avec une certaine certitude quant à un traitement futur pour un patient, la planification de ce dernier devient une contrainte inévitable. La politique médicale et les règles décrites, nécessitent une représentation correcte dans le planning du centre pour pouvoir répondre aux exigences requises par les experts médicaux. Ces quelques contraintes exigent la création d'un modèle de planification permettant la gestion des patients et de leurs traitements, et également la représentation de la politique médicale. Nous avons abordé l'aspect de ce modèle sous deux visions différentes, la première étant préliminaire à la seconde. Dans les paragraphes suivants est présenté le rôle de l'agent de planification. Pour la modélisation de cet agent, il a été supposé que le personnel médical nécessaire au bon fonctionnement du centre existe et nous simulons uniquement la prise en charge capacitaire des patients. Le modèle optimise cette prise en charge et maximise le nombre de patients traités tout en respectant la politique médicale. Une extension de ce modèle est proposée, tenant compte de la planification, en utilisant un modèle dynamique d'optimisation sous contraintes linéaires. Cette partie sera discutée dans le chapitre suivant.

Le modèle de planification doit répondre aux exigences suivantes :

- Il doit tenir compte des spécificités des traitements des patients, imposées par les protocoles. Cela oblige à respecter les contraintes techniques et médicales décrites pour chaque patient ;

- Puisque le modèle de planification doit permettre la mise en place de la politique médicale, il doit tenir compte de ses spécificités et règles. Ainsi, une discussion constante de l’agent de la politique médicale et l’agent de la planification est entretenue, et leurs buts sont équivalents, c’est-à-dire la mise en place d’un accueil le plus performant possible et dans les meilleures conditions pour les patients ;
- L’agent du modèle de planification doit discuter en permanence avec l’agent du centre. Le modèle de planification est une partie de l’agent du centre. Il agit à l’intérieur de lui et en même temps discute avec toutes les entités qui se trouvent dans le centre et qui sont elles-mêmes des agents.
- Enfin, l’agent du modèle d’optimisation des traitements des patients doit être suffisamment indépendant et générique pour pouvoir répondre aux différents contraintes d’un centre quelconque de radiothérapie. En effet, chaque centre de radiothérapie possède son propre planning, ce qui lui permet d’imposer ses contraintes médicales spécifiques.

La description précise des protocoles nous permet de pouvoir constituer un premier modèle de planification, simple et suffisant pour tester les hypothèses créées précédemment. En effet, nous avons décrit les protocoles en fonction des séances du patient. Pour chaque séance nous avons mentionné la durée et, de plus, nous avons regroupé les séances par types. La représentation en mémoire de cette modélisation est de type RLE (Run Length Encoding) [Miller 2010]. Ainsi, notre représentation est optimale, tout en conservant l’information minimale, suffisante et nécessaire pour pouvoir planifier les traitements. La liaison entre l’agent du patient et l’agent de planification est donc effectuée. En ce qui concerne les contraintes techniques des traitements, elles doivent être également vérifiées. Cette vérification a lieu avant la planification et elle est effectuée par l’agent du centre. Il s’agit ici des contraintes parfois imposées par la présence de certains outils ou machines pour que le traitement du patient puisse avoir lieu. Ainsi, le modèle de planification ne fait que l’attribution de l’ordonnancement des traitements dans le planning du centre et ne se préoccupe pas de vérifier des détails préliminaires concernant la politique médicale lorsqu’elle existe (voir figure 4.39).

En ce qui concerne la politique médicale, le modèle de planification doit la gérer à part. Nous avons conçu des mécanismes correspondant à la planification de chaque règle de la politique médicale. Ainsi, lorsqu’elle existe, sa gestion est effectuée tout en tenant compte de la gestion du planning des patients non prioritaires. Lorsqu’elle n’existe pas, l’agent du centre ne gère que le planning des patients ordinaires. Reprenons les règles de la politique médicale pour décrire leur implémentation.

- Les indications prises et/ou refusées.

Les deux listes de ces indications n’ont pas un impact sur la planification du centre. En effet, les protocoles qui peuvent être couplés à ces indications sont pris pour que la planification ait lieu. Il n’est pas nécessaire de justifier la présence d’un mécanisme précis pour cette règle, car c’est avec la méthode de recrutement que ces indications sont visées. La prise en charge des patients suit cette politique.

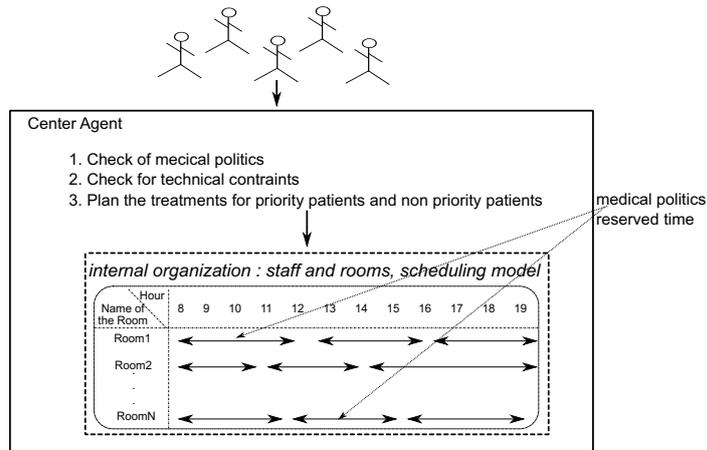


FIGURE 4.39 – Les actions du centres et le modèle de planification.

- Les couples prioritaires.
Les couples prioritaires, contrairement à la règle précédente, sont représentés par un mécanisme de réservation des plages qui leur sont attribuées. Nous utilisons la description donnée dans la section précédente pour décrire ces plages. Ainsi, lorsque cette règle de la politique médicale existe, les plages sont programmées à l'intérieur du planning ordinaire et les deux mécanismes/entités sont forcées de mener une discussion constante due aux réservations et libérations des plages.
- Les groupes de priorité.
Les groupes de priorités possèdent le même mécanisme que les couples. La différence porte sur la réservation des plages. En effet, on ne dispose plus d'une description précise sur les séances de traitement, mais uniquement d'un taux de temps pris sur le fonctionnement global du centre. Nous avons donc créé un mécanisme permettant de détecter quelles sont les salles de traitement qui peuvent accueillir des patients des groupes de priorité désignés et nous avons réservé le temps correspondant. Ce temps est également concerné par la réservation et le libération des plages. Il a été donc nécessaire de proposer un mécanisme distinct.
- La règle des machines génératrices de particules.
La gestion de la limitation de l'usage de machines génératrices de particules ne nécessite pas de prendre un agent à part. En effet, nous avons créé un mécanisme de surveillance de l'utilisation de cette règle, qui ne perturbe en aucun cas le planning ordinaire.

Les entrées nécessaires pour le bon fonctionnement de cet agent sont :

- Une bonne description et fonctionnement du centre, d'où découle la politique médicale. Ici on peut distinguer deux cas possibles. Un premier où la politique médicale n'existe pas et un second avec politique médicale. Dans le premier cas, l'agent de planification optimise l'ordonnancement des patients

et de leurs traitements. La tâche de cet agent est bien définie, il doit discuter avec le centre pour l'accueil des patients, tout en tenant compte de la description de leur traitements. Lorsque l'on se trouve dans la deuxième situation, la discussion de cet agent avec la politique médicale est inévitable, tout en sachant qu'elle passera par le centre. En effet, le centre appliquant la politique médicale transférera les patients correspondant à cette dernière à l'agent de planification ;

- La deuxième entrée, très importante, est la bonne description des traitements des patients. Il est obligatoire de connaître tous les détails du protocole à prendre en charge afin de pouvoir optimiser la disposition des traitements à placer.

L'autonomie de cet agent nous a permis de pouvoir assez aisément l'utiliser avec différentes méthodes mathématiques. Nous avons séparé sa construction de la construction du prototype entier, ce qui nous permet de pouvoir le remplacer au besoin. Son indépendance nous donne également la possibilité d'introduire l'utilisation de logiciels d'optimisation à l'usage du prototype. Dans le chapitre suivant sont présentés les différents modèles d'optimisation que nous avons modélisé et testé avec le prototype.

4.4.6 Les interactions des agents du modèle de recrutement

Le modèle de recrutement est un agent complexe qui contient plusieurs processus et agents et qui dispose d'un environnement commun pour pouvoir les gérer. La difficulté consiste à relier toutes les entités et assurer leurs discussions constantes. Nous avons utilisé pour cela une gestion centralisée des connaissances données par l'ontologie et également par passage de messages entre les agents. Dans cette partie, sont décrits les interactions entre les agents et le processus global de simulation pour le modèle de recrutement. La figure 4.40 présente l'enchaînement global des actions entreprises par l'agent maître du modèle, et les processus mis en œuvre.

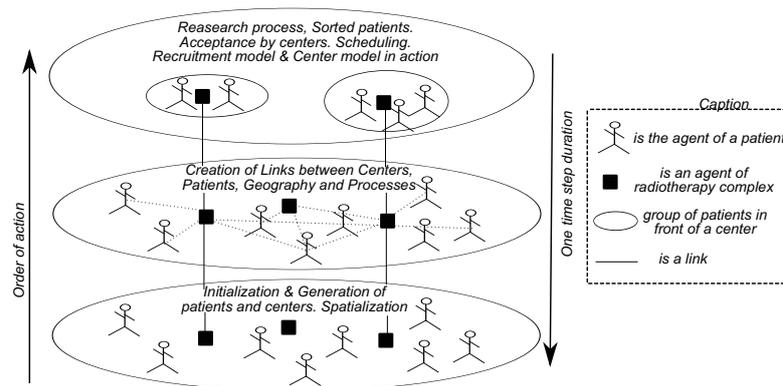


FIGURE 4.40 – Les processus dans le modèle de recrutement. Initialisation et spatialisation des patients et des centres. Création des liens entre les agents. Processus de recherche.

4.4.6.1 L'utilité d'un méta-modèle et le rôle de l'environnement

La modélisation des quatre modèles principaux du prototype logiciel a été décrite en grandes lignes. Dans cette section nous présentons le mécanisme gérant les interactions globales entre les modèles. Ce dernier peut être assimilé à un modèle des modèles et peut être encore appelé un méta-modèle. Nous présentons une revue brève sur des systèmes construits à l'aide des systèmes multi-agents, et nous introduisons la définition d'un méta-modèle, ainsi que la complexité qu'il peut introduire.

Le lecteur a vu que la modélisation du modèle de recrutement est établie au niveau micro pour la structure de chaque agent. Ici, il s'agit des perceptions des agents et des méthodes d'actions dont ils disposent. Nous avons également décrit la partie correspondante aux interactions entre les agents que l'on peut caractériser comme une modélisation à un niveau macro. En effet, en supposant que l'on se trouve au niveau macro, on se demande s'il existe une possibilité d'agréger certaines méthodes et groupes d'agent et quelles en seront les conséquences [Breton 2002, Breton 2000, Servat 1998, Servat 2000, Drougoul 1993]. En ce qui concerne la modélisation de l'outil présenté dans ce manuscrit, certaines des méthodes d'agrégation et de groupement générique des agents ont été exposées au préalable. Nous pouvons prendre comme exemple l'agent du groupement des patients ou encore l'agent de la politique médicale. Ce sont des extraits d'agents génériques qui nous permettent de simplifier la modélisation en fonction des exigences attendues, et d'exprimer en même temps différents mécanismes qui ont un but commun.

Il s'ensuit la définition d'un méta-modèle, qui s'ajoute aux différentes méthodes d'agrégation.

Définition : Méta-modèle

Un méta-modèle est une structure qui, au sein d'une organisation, fait intervenir différents modèles et les agents leurs correspondant. Il est éventuellement capable d'organiser leurs interactions et/ou de les aider à communiquer. Il peut également comporter différents types d'abstraction [Treuil 2008].

Dans un méta-modèle, il est possible de trouver les mêmes types d'agents comme dans [Breton 2002, Breton 2000, Hemelrijk 2000, Hemelrijk 2002, Hemelrijk 2003, Sim 2012], ainsi que différents types d'agents [Servat 1998, Servat 2000, Drougoul 1993, Aquino 2002] et des niveaux d'abstraction différents [Servat 1998, Servat 2000]. Dans les parties précédentes de ce chapitre nous avons également décrit les comportements des agents utilisés, leurs mécanismes de décision et leur comportement, qu'il soit individualisé ou en groupe. Dans la suite, on donne l'interaction et l'ajustement entre le comportement individualisé et partagé des agents.

Nous essayons tout d'abord de définir ce qu'est un environnement. Par la suite, nous développons l'utilité de l'environnement dans le cadre de la modélisation proposée.

Définition : Environnement

Un environnement est un ensemble de l'information qui est non portée par les agents [Treuil 2008].

D'après ces mêmes auteurs [Treuil 2008], cette définition est uniquement suffisante au niveau de l'implémentation, tandis qu'au niveau de la modélisation d'après eux on a besoin de plus de précisions. En effet, ils rajoutent que l'on doit cerner les parties qui regroupent les agents et puis les faire apparaître, ce qui permettra de dégager également un méta-modèle construit à base d'agents génériques. On peut rajouter également que l'environnement dans notre cas doit également permettre l'accès à l'information commune accessible à tous les agents et également la transformer dans une forme correcte et interprétable pour qu'ils puissent s'en servir. Dans le paragraphe suivant sont citées quelques caractéristiques que l'on peut rajouter à la définition de l'environnement (voir la figure 4.41).

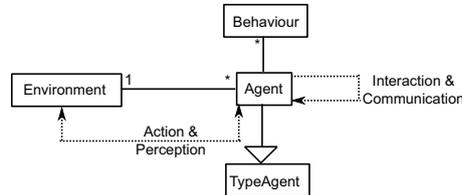


FIGURE 4.41 – Méta-modèle construit avec un schéma UML. L'environnement est en relation avec les agents. Il peut gérer leurs perceptions et leurs interactions.

- Un environnement peut être vu comme un ensemble de contraintes structurales. Il peut représenter une organisation qui agit sur la forme des agents en fonction des contraintes imposées [Breton 2002, Breton 2000]. Pour l'outil, en construction présenté ici, l'exemple est du côté des spécificités des centres hospitaliers d'accueil ou dans la description du protocole, qui mène indirectement vers la description du patient ;
- L'environnement est également un champs médiateur. Il facilite certains calculs intermédiaires pour les agents, comme par exemple un champs [Servat 2000, Servat 1998, Lardon 2001, Kreft 2001, Picioareanu 2004, Xavier 2005] ;
- L'environnement peut être un support de perception. Les agents peuvent accéder ou non à certaines caractéristiques-clés des agents les entourant ou avec lesquels ils collaborent [Drougoul 1993, Hemelrijk 2000, Hemelrijk 2002, Hemelrijk 2003, Ross]. Un exemple concret sont les centres qui accèdent à toutes les caractéristiques des patients les concernant ou plus précisément, le traitement pouvant être effectué dans ce centre. Il est également possible que l'environnement limite la perception des agents ([Aquino 2002, Sim 2012]) ;
- L'environnement peut contrôler les actions. Il peut contrôler les lois physiques de déplacement par exemple comme dans [Sim 2012] ;
- L'environnement est également un médium de communication. Il est chargé de transférer dynamiquement les messages des agents. Tel est le cas dans

notre outil, ainsi que chez [Drougoul 1993, SAiD 2003] ;

- L'environnement est un organisateur relationnel. Il s'occupe des réseaux entre les agents. Dans le prototype, il existe des agents qui servent à créer les réseaux, mais ils sont commandés par l'environnement ;
- Les auteurs de [Treuil 2008] précisent que l'on peut également avoir une multitude d'environnements pour un seul agent [SAiD 2003, Sim 2012]. Nous avons également un exemple en prenant le cas de l'agent, qui, en fonction de son groupe de priorité, est plongé dans différents types de réseaux de soins et donc des environnement différents ;
- En dernier lieu l'environnement peut être vu comme une entité autonome. Il peut être décrit comme un agent possédant ses propres mécanismes. Il agit en faisant appel aux autres agents dans le système.

4.4.6.2 Description du processus de simulation

Tout en s'inspirant du modèle Agent Groupe Rôle de Ferber [Ferber 2003b, Ferber 2003a] pour montrer les interactions entre les agents, les groupes qui ont été décrits dans les sections précédentes seront introduits par la suite. En même temps que les groupes, le processus global de simulation est présenté.

Initialisation La première action effectuée par le prototype et le modèle de recrutement est la vérification des données et leur initialisation. Qu'il s'agisse du modèle de recrutement ou des modèles économiques, l'initialisation des données est une étape importante qui concerne la validation de l'information contenue dans les données. Si cette dernière n'est pas correctement renseignée, alors la simulation ne peut avoir lieu. Lorsque l'initialisation a lieu, les paramètres spécifiques de la simulation concernant les spécificités des centres et des traitement effectués sont chargés (voir figure 4.42).

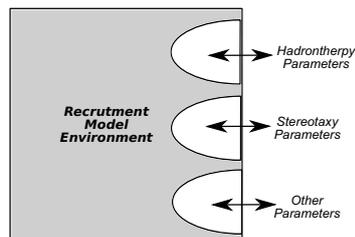


FIGURE 4.42 – Le modèle de recrutement est initialisé en fonction des spécificités des centres.

En même temps que l'initialisation des données, la création des centres et leurs spatialisation prend effet. La génération des patients s'ensuit avec l'attribution de leur position dans la géographie. La totalité de la spatialisation est maintenant effectuée. Les agents qui participent à cette partie de la simulation sont l'environnement du prototype, le générateur de patients. Les dictionnaires de connaissances

sont la base du chemin parcouru pour une bonne modélisation. Les groupes qui sont en train de se former sont les patients et les centres. Chaque groupe a un but, et pour l'ensemble des agents qui en font partie, il est le même par groupe. Dans le groupe des patients, chaque agent doit trouver un traitement et ceci dans un délai précis. Dans le groupe des centres, les agents sont des offrants et leur but commun est la prise en charge des patients. Les agents des patients et des centres échangent des messages en étant guidés par l'environnement. Les patients, dès leur genèse appartient à des groupes différents (figure 4.43, page 118) :

- Le groupe de la date de genèse.
C'est le groupe qui détermine la date d'apparition d'un patient dans le système.
- Le groupe de la région géographique.
Le groupe de la région géographique caractérise le lieu d'habitation du patient, sa distance aux centres susceptible de l'accueillir et donc son comportement.
- Le groupe d'une indication et des protocoles qui peuvent être associés.
Ceci est la caractéristique principale du patient et indépendamment des deux autres groupes, les patients sont répartis suivant leur appartenance à une indication et ensuite en fonction des protocoles.
- Le groupe d'un groupe de priorité.
Il est également nécessaire de mentionner qu'avec l'indication et le protocole, on doit définir le groupe de priorité. En effet, un patient est caractérisé par différents groupes de priorité, car son indication peut être couplée avec différents protocoles, ce qui induit sa présence dans ces groupes au niveau de la modélisation.
- Le groupe formé par le protocole et sa spécialité.
Lorsque les traitements sont décrits par les protocoles, il contient la spécialité du traitement. Cette spécialité est donnée au patient pour qu'il puisse chercher un traitement. Il en résulte que le patient appartient à ce groupe également.

De la même manière que les patients, les centres appartiennent à plusieurs groupes.

- Le groupe de l'appartenance géographique.
Le centre appartient à une zone géographique, une caractéristique importante, qui couplée aux traitements qu'il propose conditionne son attractivité envers le patient.
- Le groupe de la spécialité.
Les centres sont caractérisés par leur spécialité. Ceci induit leur appartenance à un groupe spécifique. On peut donner comme exemple le groupe de l'hadronthérapie ou encore le groupe de la stéréotaxie. La contrainte qui ici est imposée par l'environnement est qu'une étude ne peut avoir lieu que dans une seule spécialité à la fois.

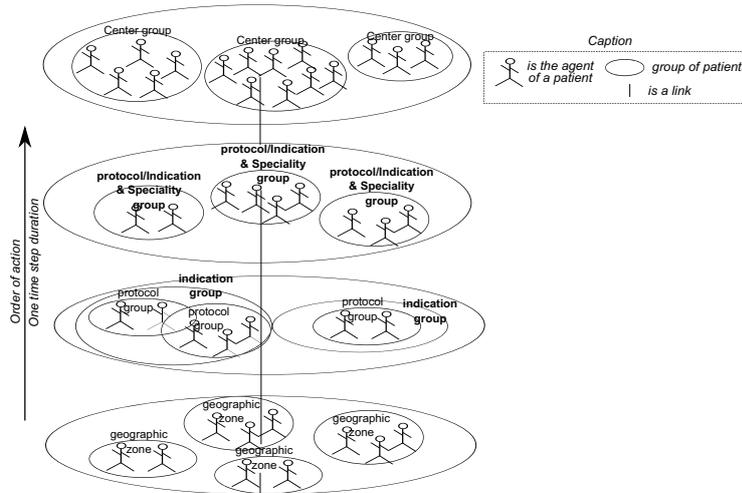


FIGURE 4.43 – Répartition des patients en groupes dès lors genèse.

- Groupe de la politique médicale.

Pour aller plus loin, on peut considérer également le groupe des centres ayant défini leur politique médicale et le groupe des centres n'ayant pas spécifié cette contrainte. On peut également subdiviser le groupe d'une politique médicale en essayant de repérer les centres ayant une politique médicale similaire, tout en sachant qu'il est important d'avoir un critère de jugement sur la similarité.

À la suite de l'initialisation, l'environnement de l'outil peut commencer la création des liens entre les agents pour leur permettre de discuter et de créer les dépendances nécessaires pour que le but de chaque agent puisse être effectué.

Création des liens et modèles préparant la simulation. On peut donc utiliser les données qui relient les centres et les patients pour créer les dépendances et les attractivités entre eux. Suite à ces relations, le processus de recherche pourra prendre place. Lors du processus de recherche, la concurrence entre les centres et les patients apparaît, les relations entre les agents sont créés suite à quoi les discussions et les dépendances gérées par l'environnement sont possibles.

Le premier lien entre les patients et les centres est la construction de la carte géographique, et les distances entre eux. Suite à la construction des communications entre les agents, les actions de l'environnement peuvent prendre effet. Puisque le prototype gère les interactions entre patients et centres, il est nécessaire d'initialiser toutes les données qui correspondent aux réseaux d'acointance entre eux. La hiérarchie entre les agents et leurs sous-agents apparaît alors. Prenons, par exemple les patients et les centres qui ont été initialisés au préalable. Dès leur apparition, ils transmettent l'information nécessaire pour l'initialisation de tous les agents et processus.

Le deuxième lien est celui des connexions entre l'indication du patient et les différents protocoles. C'est une caractéristique essentielle, qui fait partie de la descrip-

tion de l'agent du patient mais qui participe également à la création du coefficient de préférence qu'un patient aura pour un traitement ou non. En effet, avant que toute évaluation d'un traitement proposé puisse avoir lieu par l'agent du patient, il est nécessaire de classer ces traitements en fonction du bénéfice médical attendu. Suite à cette action le patient peut commencer à rechercher des centres d'accueil avec son traitement favori. On rappelle que par défaut dans le prototype, c'est le traitement avec le meilleur gain thérapeutique.

Après le réseau, la création des dépendances avec la géographie prend effet. Les couronnes d'influences sont modélisées en fonction des paramètres des centres. En tenant compte des caractéristiques des patients, le paramètre de l'attractivité est également initié. Lorsque le coefficient d'attractivité est initialisé, chaque patient peut ordonner les centres de traitement en fonction de ses groupes de priorité et en fonction de l'éloignement par rapport à sa position géographique.

À ce niveau de la modélisation, on peut initialiser la politique médicale des centres de radiothérapie, si elle existe. Son initialisation peut se faire ici ou lors de l'initialisation du centre. Il n'y a pas une différence conséquente au niveau de l'implémentation. Le même chose vaut pour la liste d'attente.

Le processus de recherche. Lorsque tous les liens pour le processus de recherche des patients sont effectués, les agents des patients initiés par l'environnement sont guidés pour que leur but commun à trouver un centre soit accompli. En effet, à ce stade de la modélisation, les patients doivent se diriger vers les centres de soins qu'ils ont choisis pour leur premier traitement dans l'ordre établi.

Passages vers les centres suivants. Lorsque les patients ont visité leur premier centre et qu'ils ont évalué les réponses reçues, ils peuvent décider de la possibilité d'accepter une réponse positive pour être pris dans une liste d'attente ou bien continuer vers des centres plus éloignés. Cette décision implique la gestion par l'environnement des agents des centres et des patients, tout en considérant les liens entre eux et les processus intervenant pour la recherche des centres.

Évaluation de la politique médicale pour et par chaque centre. La politique médicale étant un mécanisme existant pour chaque centre qui l'a décrit, son action joue un rôle important pour l'évaluation des nouveaux traitements. En effet, la concurrence des centres s'exprime au niveau de la politique médicale également. Les agents concernés à ce niveau sont les patients et les centres. L'environnement n'intervient pas dans ce processus. La politique médicale est un agent complexe qui agit pour aider le centre à mieux gérer son futur recrutement en fonction des traitements visés.

Le centre et sa planification. Après l'action de la politique médicale, vient la planification. Elle est prise en charge par le centre. Les agents en action sont le centre avec ses mécanismes et le patient qui impose ses contraintes techniques.

Lorsque la liste d'attente existe, les traitements des patients qui en font partie sont prioritaires. Par conséquent dans la planification des centres la priorité est donnée aux patients se trouvant dans une liste d'attente. Le modèle de planification est en action tout le long de cette étape. Il est sollicité en même temps par la politique médicale (patients prioritaires), par la liste d'attente (patients prioritaires en attente) et par la planification des patients non prioritaires.

Mise à jour des processus des centres. La liste d'attente est mise à jour lorsque de nouveaux patient se présentent. De plus, l'évaluation de la place de chaque patient a lieu. Ce processus a été discuté dans les parties précédentes concernant les agents des patients et des centres. L'agent en action est le centre, utilisant la liste d'attente. Les statistiques pour la moyenne mobile sont également mises à jour.

Passage vers un groupe de priorité inférieure. Lorsque tous les centres susceptibles de prendre un charge un patient ont été visités et qu'aucun d'entre eux ne peut le prendre en charge, un passage obligatoire vers un groupe de priorité inférieure est obligatoire, si toutefois il existe. Les deux agents en action restent le centre et le patient.

Décisions supplémentaires prises par le patient. Dans cette partie du processus de modélisation, le patient doit évaluer son état de recherche par rapport aux résultats qu'il attend. Lors de cette évaluation, il peut prendre la décision de commencer une recherche supplémentaire alors qu'il se trouve dans une liste d'attente. Cette décision est prise en compte par l'agent gérant la loi de la DDT (section 4.4.4.3, page 88). Ici, le seul agent qui agit est celui du patient.

Fin des processus et préparation du nouveau pas de temps. Les processus concernant la mise à jour des agents ayant effectué des actions durant le pas de temps courant sont mis à jour. Les initialisations pour me pas de temps suivant sont effectuées. Il s'agit de la genèse des nouveau patients. L'environnement est préparé pour le lancement du nouveau pas de temps.

4.4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation globale du prototype a été présentée. Nous avons décidé de séparer l'outil informatique en plusieurs parties indépendantes. Ceci nous a permis d'appliquer une évaluation et des tests séparés pour chaque modèle. Cette modélisation nous donne la possibilité de remplacer chacun des modèles indépendamment par une version plus performante. De plus, si l'on veut comparer les modèles tout en restant dans l'environnement déjà créé, cela reste possible grâce à la généricité de l'outil.

Nous avons présenté l'ontologie concernant le prototype. Elle est un dictionnaires de connaissance indispensable au bon fonctionnement de tout outil reliant

plusieurs domaines. Nous avons défini un dictionnaire avec un format propre à l'outil. L'ontologie concernée est définie et fonctionnelle, utilisée par le prototype. Cette ontologie permet les discussions entre les entités de l'outil. En effet, on parle des relations inter-prototype et des relations dans chacun des modèles. Elle garantit également l'unicité de l'information.

Nous avons présenté l'analyse spatio-temporelle du prototype et plus précisément de l'agent du modèle de recrutement. Nous avons discuté de l'existence de l'environnement de cet agent et du méta-modèle utilisé. La généralité et la modularité dépendent étroitement de l'utilisation de ces entités. Ainsi, nous introduisons l'utilisation de deux agents importants pour la gestion de patients, à savoir le générateur de patients et le gestionnaire par groupe des patients. Ces deux agents sont initiés par l'environnement et sont utilisés tout au long du processus de simulation.

Les centres de traitements et les patients sont modélisés, tout en tenant compte de leurs caractéristiques médicales et de leurs préférences. Il s'agit de décrire le comportement du patient, facteur non négligeable dans le choix du traitement. De même, côté centre, c'est la politique médicale qui est tenue d'exprimer les préférences médicales des centres concernant les traitements proposés. Ces deux descriptions mises en commun, nous sommes en mesure d'exprimer la concurrence entre les patients et les centres, sans oublier de mesurer l'attractivité des centres pour les patients et la volonté de ces derniers de se déplacer et de faire le pas vers des soins par une thérapie innovante. Pour remédier à l'attente des patients lorsqu'un traitement immédiat n'est pas disponible, nous proposons une liste d'attente dédiée aux patients faisant partie de la politique médicale. La liste d'attente est une méthode pour garder la possibilité pour les centres de conserver ses priorités médicales et pour permettre aux patients l'accès aux soins innovants. Enfin, les interactions entre les différents agents sont décrites, en présentant un algorithme global et générique de gestion des patients et des centres.

Le modèle de recrutement est le modèle le plus important du prototype. Il permet de prendre en compte la spatialisation des patients et des centres. Cette caractéristique permet la prise en compte de la concurrence. De plus, c'est en évaluant le nombre théorique de patients intéressés par les soins d'un centre de thérapie que l'on est en mesure de proposer une conclusion sur l'efficacité d'un centre hospitalier. En effet, cette évaluation théorique sert lors du calcul du prix par traitement, appelé encore prix par patient. De même, ce prix est utilisé pour la comparaison des stratégies employées par la suite.

Modèle de Planification et Modélisation Économique

Sommaire

5.1	La planification	124
5.2	Les problèmes nécessitant l'optimisation des ressources utilisées	126
5.3	Modélisation du modèle de planification	131
5.3.1	Modélisation mathématique	131
5.4	Modèle économique	142
5.4.1	La méthode ABC et son interprétation	142
5.4.2	Les éléments essentiels de la modélisation	145
5.4.3	Modélisation Mathématique du coût du protocole	150
5.5	Modèle médico-économique	154
5.5.1	Comparaison des stratégies	154
5.5.2	Les éléments retenus pour la modélisation	155
5.5.3	Le modèle mathématique	156
5.6	Conclusion	161
5.6.1	Utilisation du modèle de planification pour le modèle de recrutement	161
5.6.2	Les modèle économiques	161
5.6.3	De l'intérêt d'un modèle de planification pour améliorer les modèles économiques	162

Le chapitre présente le modèle de planification et les deux modèles économiques utilisés dans notre prototype. Les raisons pour lesquelles la planification est une partie indispensable au modèle de recrutement sont précisées. De plus, nous proposons quelques modèles mathématiques du modèle d'optimisation des traitements. Une introduction à la problématique de la planification est exposée en première partie du chapitre, puis la formalisation des problèmes proches de notre étude. Dans la suite du chapitre, on introduit les modèles économiques, qui sont d'une grande importance pour l'évaluation d'un centre de radiothérapie utilisant des techniques innovantes. Nous introduisons une méthode du calcul du prix par traitement et une méthode de comparaison des stratégies thérapeutiques. Le couplage du modèle de recrutement et du modèle de planification permet une estimation du nombre de patients intéressés par les techniques innovantes proposées dans un centre.

5.1 La planification

La planification a des origines très anciennes. Le mot planifier signifie organiser des actions, diriger des tâches suivant un plan et en poursuivant un but. En effet, on peut planifier avec diverses intentions. Lorsqu'on vise un plan stratégique de développement économique d'un pays, on peut parler de planification. On peut également planifier la gestion des organisations humaines ou la production industrielle. La planification est utilisée pour ordonner les tâches d'un processus de façon optimale.

D'après Aaron Wildasky ([Régnier 2004]) "La planification se développe dans un nombre tellement important de directions différentes que les planificateurs ne peuvent plus en distinguer la forme. Le planificateur peut être un économiste, un spécialiste des sciences politiques, un sociologue, un architecte ou un scientifique."

D'après Mintzberg ([Régnier 2004]), en ce qui concerne la gestion des entreprises, une définition de la planification est la suivante :

Définition : Planification

La planification est une procédure formalisée, qui a pour but de produire un résultat articulé sous la forme d'un système intégré de décisions.

En ce qui concerne les sciences cognitives, Hoc [Hoc 1987] donne la définition suivante :

Définition : Planification

La planification est une activité de résolution de problèmes consistant en l'élaboration/utilisation d'un plan-solution et qui s'appuie sur :

- *des activités de schématisation qui vont exploiter des relations hiérarchiques entre représentations à l'intérieur d'un même système ;*
- *l'emploi de règles de fonctionnement et d'utilisation qui permettent au gestionnaire d'anticiper les conséquences de ses choix futurs.*

De plus, il définit un plan comme une représentation schématique et/ou hiérarchisée susceptible de guider l'activité du sujet.

Enfin Regnier, [Régnier 2004], définit encore la planification comme un ensemble de méthodes formalisées, afin de produire un plan. Il considère un plan comme un réseau de décisions reliées entre elles. Le réseau guide l'action d'un ou plusieurs agents ayant à agir dans un monde particulier pour leur permettre d'atteindre un but fixé au préalable. D'après cet auteur, les caractéristiques essentielles d'un plan sont :

- *son taux d'abstraction*

Il concerne la granularité des actions à définir pour que le plan soit effectué ;

- *son taux de description*

Ce sont les différentes relations qui existent entre les composantes d'un plan.

On cherche à connaître la hiérarchie de toutes les composantes ;

- *son taux de contrôle*

Il s'agit de décrire les structures du contrôle des composantes. Dans ce cas précis, on voudrait trouver s'il n'existe qu'une seule structure ou si plusieurs

contrôles sont appliqués pour la résolution du plan.

La planification est utilisée pour guider les différentes composantes d'un processus. Pour guider un processus, on peut imaginer différents contrôles, parmi lesquels certains peuvent être utilisés pour une optimisation des ressources utilisées. Ainsi, lorsque l'on veut optimiser des ressources, on doit pouvoir également anticiper les actions, pouvant se produire en fonction des différents cas possibles. La planification est donc un outil de résolution des problèmes et un outil de coordination.

Plus particulièrement, la planification en Intelligence Artificielle (IA) répond à la modélisation de l'ordonnancement des actions pour un problème [Draa 2001]. Les systèmes basés sur des agents autonomes sont concernés par la planification, car ils sont facilement utilisés pour constituer un ordonnancement. En ce intelligence artificielle, on dispose de plusieurs façon de modéliser la planification : [Régnier 2004].

- La planification modélisée comme une étude de cas.

Ce type de planification est encore appelée "cased-based planning" [Régnier 2004]. Elle consiste en la réutilisation de solutions déjà existantes. Ces solutions sont reprises et réadaptées pour résoudre les nouveaux problèmes qui apparaissent. Une deuxième caractéristique est l'utilisation du système échec/succès. Ce système permet de trier rapidement les bonnes méthodes de résolution. Un exemple de systèmes utilisant ce genre de méthodes sont [Hanks 1991, Kambhampati 1992]. Les auteurs utilisent une méthode basée sur la transformation de solutions existantes. Il existe également des approches utilisant la dérivation des nouvelles solutions à partir de solutions existantes [Velooso 1993, Kambhampati 1994] ;

- La planification à partir de la connaissance des experts.

Cette méthode est encore appelée "knowledge based planning" [Wilkins 2001]. Les systèmes HTN (Hierarchical Task Networks) sont ceux qui utilisent ce genre de planification pour résoudre les problèmes posés. Ce qui les caractérise est la possibilité de résoudre les problèmes, par l'expertise des experts. Cet avantage est également un désavantage, car les experts ne sont pas toujours disponibles. Les systèmes HTN sont construits de manière hiérarchique, en décrivant plusieurs niveaux de détails possibles. Une solution, présentée par un plan, est constituée par des nœuds. Chaque nœud représente une tâche à exécuter. Un nœud est caractérisé par ses fils qui peuvent contenir les détails de la tâche à accomplir, sous une forme plus détaillée. Les actions sont décrites par la hiérarchie entre les nœuds et leurs fils. En conséquence, les différents plans peuvent contenir des descriptions des tâches. Chaque tâche est composée de méthodes nécessitant plus ou moins de détails pour leur résolution [Sacerdoti 1975, Wilkins 1995, Tate 1994, Laborie 1995] ;

- La planification par une approche logique.

Cette méthode utilise les opérateurs de logique et des changements d'états. C'est une approche générale et non dépendante d'un domaine ou des spécialistes d'un domaine. Elle est caractérisée par :

- Une description du domaine du problème à résoudre, ainsi que du problème lui-même.

Le problème doit être représenté par son état initial, les buts à atteindre et les opérateurs que l'on peut utiliser pour accomplir les buts ;

- Un algorithme permettant de résoudre le problème.

L'algorithme est un graphe de plans partiels. Un plan partiel est une solution du problème de planification à un état donné. Les plans décrivent un ensemble d'actions, de contraintes et d'états. Chaque plan fait partie de l'arbre ;

- Des heuristiques permettant la résolution des plans. Il est possible que ces heuristiques n'existent pas. Dans ce cas le plan ne possède pas de solution. Plusieurs méthodes sont connues pour la recherche de plans-solutions. Certaines d'entre elles sont décrites dans [Fikes 1971, Sacerdoti 1975, Chapman 1985, Blum 1997, Kautz 1999, Do 2001].

Pour la planification et la recherche qui a été menée dans ce domaine, il est nécessaire de mentionner les critères de comparaison pour les algorithmes et les plans de solutions. Avec une approche globale, les trois critères les plus importants d'après [Régnier 2004] sont :

- le cumul des coûts des actions du plan ;
- le temps minimal nécessaire à l'exécution du plan ;
- la flexibilité du plan.

5.2 Les problèmes nécessitant l'optimisation des ressources utilisées

La problématique que l'on traite dans ce manuscrit, concernant la planification des séances, est connue dans la littérature comme un problème RCPSP (Resource Constrained Project Scheduling Problem) [Brucker 1999]. Dans ces problèmes, on doit modéliser l'accès à une ressource de façon optimale. La ressource visée est souvent disponible en quantité limitée, d'où le besoin d'optimiser son accessibilité. De même, on peut modéliser un accès minimal lorsque cette ressource n'est disponible qu'en quantité limitée. Dans ce cas, il est également possible d'imaginer des accès à la ressource, prioritaires ou non, pondérés par des poids. Ce genre de modélisation est utilisée dans les systèmes d'ingénierie, tels que la gestion des stocks pour les entreprises, la gestion des machines pour une fabrique, la gestion des vols aériens dans les aéroports etc. La planification et l'optimisation des tâches est un problème identifiés et reconnus comme difficile à résoudre.

La modélisation des problèmes RCPSP est connue [Hartmann 2010] sous la forme d'optimisation de différentes activités, faisant partie d'un processus et accédant à des ressources communes. L'accès à ces ressources est souvent limité. Généralement on cherche à optimiser l'utilisation d'une ou plusieurs ressources. Le modèle mathématique utilise les variables suivantes :

- On dispose de J activités ($j = 1, \dots, J$). Une activité est caractérisée par un temps de départ pour son déroulement, noté S ;
- Chaque activité a des prédécesseurs, notés $P_j = \{i = 1, \dots, j - 1\}$ pour

5.2. Les problèmes nécessitant l'optimisation des ressources utilisées 127

l'activité j ;

- Soit une ressource k , ($k = 1, \dots, K$). La disponibilité d'une ressource k est notée R_k . On note $r_{j,k}$ les unités nécessaires d'une activité j , utilisant une ressource k . $r_{j,k}$ peut représenter du temps, un taux de disponibilité, un nombre de personnes, etc.

D'après les mêmes auteurs, nous disposons de concepts communs concernant les contraintes qui peuvent être modélisées pour les activités : le temps, et les ressources. Ces contraintes sont réparties comme il suit :

1. Les contraintes sur les activités.

Les contraintes et formalisations sur les activités définissent plusieurs concepts portant sur l'ordonnancement des activités, leur précédence et leur dépendance. Nous pouvons distinguer les cinq type d'ordonnancement :

- (a) Ordonnancement avec préemption.

Pour le RCPSp classique, une activité ne peut être interrompue lors de son exécution. L'ordonnancement avec préemption s'intéresse à une éventuelle coupure dans l'exécution d'une tâche. Cette coupure peut intervenir durant l'exécution à des moments qui peuvent être spécifiés d'avance dans le programme d'optimisation [Vanhoucke 2008]. Lors de la coupure, il est nécessaire de respecter des normes strictes qui peuvent mentionner le temps autorisé pour la coupure ou encore le taux de l'activité, qui doit être accompli avant que ladite coupure ait lieu ;

- (b) Ordonnancement d'activités dont la demande des ressources varie avec le temps.

Dans le RCPSp classique une activité a toujours la même demande pour une ressource. Néanmoins, la demande pour les ressources présentes dans un modèle peut varier avec le temps. Cette demande dépend des besoins de l'activité. Soit la notation suivante :

$$r_{j,k,t}$$

la demande de l'activité j , utilisant la ressource k et ceci à la période t du temps global de l'optimisation. Le plus souvent cette modélisation concerne les ressources renouvelables disponibles et utilisées par les activités à des moments précis [Cavalcante 1998] ;

- (c) Ordonnancement d'activités demandant un temps de préparation des ressources.

Lorsqu'on utilise des ressources, il est parfois nécessaire de les préparer. Le temps de préparation d'une ressource, appelé "setup time" peut être prévu avant le lancement de la tâche ayant besoin de cette ressource [Mika 2008]. Il existe également des méthodes permettant de synchroniser la préparation de la ressource, avec les prédécesseurs de la tâche courante. Le temps de préparation d'une ressource peut être également vu comme une activité séparée. Ceci est une représentation d'une activité qui doit être accomplie avant l'activité courante.

- (d) Ordonnancement d'activités ayant des modes multiples ;
 Lorsque l'on modélise différentes tâches, il est tout à fait possible, qu'une tâche puisse être modélisée de différentes manières. La modélisation consiste en différents ordonnancements pour les activités de cette tâche [Słowiński 1994]. La contrainte imposée est celle de finir l'activité dans le mode de modélisation dans lequel elle a été commencée. Les notations pour les différents modes de modélisation sont les suivantes :
- Soient les différents modes notés comme il suit

$$m \in \{1, \dots, M_j\} \text{ pour l'activité } M_j ;$$

- Soit P_{jm} le temps de traitement pour l'activité j et pour son mode m ;
 - On note $r_{j,m,k}$ la demande pour de l'activité j dans son mode m et pour la ressource k .
- (e) Ordonnancement de problèmes de charge de travail minimum par activité.
 Soit une modélisation, concernant une charge de travail minimale effectuée par une activité j . Cette situation utilise les notations suivantes :
- Soit P_j le temps d'exécution de l'activité j ;
 - Soit k la ressource renouvelable dont l'activité a besoin. On note par $r_{j,k}$ le besoin de l'activité j pour la ressource k ;
 - Soit ψ_j la charge de travail minimale que l'activité j doit assurer. On obtient alors l'inéquation suivante :

$$p_j r_{j,k} \geq \psi_j \tag{5.1}$$

Des contraintes existent pour la vérification de cette inéquation [Hartmann 2010].

2. Les contraintes sur le temps.

Les contraintes de temps portent sur l'espacement temporel entre les activités, ainsi que sur les délais imposés pour la dates de début et de fin d'activité. On peut séparer les contraintes temporelles comme suit [Hartmann 2010] :

- (a) Des contraintes de délais minimal entre deux activités [Klein 2000b, Brucker 1999, Klein 2000a].

Dans le RCPSP classique, une activité doit être obligatoirement finie pour que ses successeurs puissent prendre effet. Soient les notations :

- C_i est la date finale de l'activité i et S_j est la date de début d'un successeur j de i ;
- $d_{i,j}^{FS}$ est le délai minimal entre la date finale de l'activité i et le début de l'activité j ;
- dans ce cas on doit respecter la contrainte suivante

$$C_i + d_{i,j}^{FS} \leq S_j \tag{5.2}$$

sachant que dans le RCPSP classique on retrouve $d_{i,j}^{FS} = 0$.

5.2. Les problèmes nécessitant l'optimisation des ressources utilisées 29

Des contraintes de délai minimal peuvent être établies entre la fin d'une activité et le début d'une autre, le début d'une activité et la fin d'une autre ou le début d'une activité et le début de la seconde.

- (b) Des contraintes de délais maximal entre deux activités.

Nous pouvons également trouver des situations dans lesquelles le délai entre deux séances peut prendre une valeur maximale. Avec les mêmes notations que précédemment, on note $d_{i,j}^{-FS}$ le délai maximal entre la date de fin d'une activité i et la date de début d'une activité j . La contrainte à respecter est alors :

$$C_i + d_{i,j}^{-FS} \geq S_j \quad (5.3)$$

ce qui veut dire que l'activité j ne pourra pas commencer plus tard que la date donnée par $C_i + d_{i,j}^{-FS}$. Des contraintes maximales de délais entre deux séances peuvent être établies entre les débuts des deux activités, le début de la première activité et la fin de la seconde ou entre les dates de fin des deux activités ;

- (c) Des contraintes minimales et maximales entre deux séances [Brucker 1999, Hartmann 2010].

Dans ce genre de contraintes, on doit réunir les deux descriptions précédentes. On peut aussi envisager de modéliser les activités sous différents modes, ce qui impose la notation suivante :

- Soit m_i le mode de l'activité i et soit m_j le mode de l'activité j ;
- Avec ces hypothèses on a :

$$d_{i,m_i,j,m_j}^{-FS} \text{ où } d \text{ est le délai entre l'activité } i \text{ et } j .$$

- (d) Des contraintes de début et de fin imposées [Brucker 1999, Kis 2006, Klein 2000b].

On peut imposer des délais de début et de fin de traitement des activités. Ceci revient à introduire les notations suivantes :

- Soit r_j la date de début, au plus tôt, à laquelle l'activité j peut commencer ;
- Soit d_j la date, au plus tard, à laquelle l'activité j peut être finie ;
- Il s'ensuit que les deux dates r_j et d_j délimitent la période de temps dans laquelle l'activité j doit être exécutée ;
- Les deux dates limites pour une activité j peuvent être également vues comme des délais minimaux et maximaux. Dans ces conditions r_j est le délai minimal de temps entre la fin de l'activité i et l'activité j . Le paramètre d_j est le délai maximal de temps entre la fin d'une activité i et la fin de l'activité j .

D'autres contraintes existent concernant les temps imposés pour les activités dans un plan d'ordonnancement, [Hartmann 2010]. Il est important de mentionner que ce type de contraintes rendent le problème NP-complet.

3. Les contraintes sur les ressources.

Les contraintes que l'on peut exprimer pour les ressources se présentent sous la forme suivante :

- Contraintes doubles sur les ressources.

Les ressources peuvent être vues comme contraintes sur une seule période ou sur la longueur de tout le projet. Les ressources peuvent être renouvelables ou non renouvelables. La classification en ressources renouvelables et non renouvelables est donnée dans [Roman 1981];

- Contraintes sur des ressources partiellement renouvelables.

Les ressources partiellement renouvelables ont été introduites par [Böttcher 1999, Drexel 2000, Schirmer 2000]. Ces contraintes peuvent être modélisées avec les notations précédentes : $r_{j,k}$ est la demande de la ressource k par l'activité j . La ressource k est disponible sur l'ensemble de périodes de disponibilité π_k et elle est de capacité $R_k^\pi(Q_{k,i})$ durant une période d'utilisation de la ressource k à partir du temps t_i $Q_{k,i} \in \pi_k$ et $t_i \in \{1, \dots, T\}$, T est la date maximale de simulation du modèle;

- Contraintes sur des ressources cumulatives.

Ce type de ressource peut être disponible en quantité limitée dans un dépôt. Elles ont été introduites par [Neumann 2003]. Les ressources cumulatives sont décrites par la modélisation suivante :

- Soit \overline{R}_k la capacité totale de la ressource cumulable k ;
- Soit \underline{R}_k la quantité minimum disponible de cette même ressource dans le dépôt;
- À ces notations, on rajoutera le fait qu'une activité j peut produire (ou consommer) la quantité $r_{j,k}$ d'une ressource cumulative k .

Ce type de ressources a été également utilisé dans le problème RCPSP [Bartels 2009, Neumann 2005];

- Contraintes sur des ressources continues.

Jusqu'à maintenant, les ressources ont été décrites avec des quantités discontinues. Il existe également des ressources qualifiées par des quantités continues, comme par exemple les liquides ou l'énergie. Ce concept a été formalisé par [Weglarz 1977];

- Contraintes sur des ressources dédiées.

On peut aussi modéliser des ressources dites dédiées [Bianco 1998]. Ce type de ressource n'est disponible que pour une seule activité et pour une seule période. Dans le problème RCPSP, ce type de ressources existe aussi, traité comme un cas spécial;

- Contraintes sur des ressources ayant une capacité variable avec le temps.

Ce problème a été traité dans [Bomsdorf 2008, Klein 2000a, Schwindt 2000, Brucker 2002]. Les ressources ayant une capacité variable avec le temps sont modélisées par la notation $R_{k,t}$, k étant une ressource renouvelable et t étant la période de disponibilité. Dans le modèle RCPSP, on peut modéliser ces ressources avec des délais minimaux et maximaux entre les activités qui les consomment. La formalisation avec l'introduction des "time lags" du

problème RCPSP est la suivante :

- On caractérise les périodes étudiées avec les valeurs maximales disponibles ;
- Les périodes avec des capacités moins importantes possèdent une activité artificiellement créée pour réduire la capacité nécessaire. Ainsi chaque activité, artificiellement créée, est caractérisée par un délai minimal ou maximal pour être ajustée ;
- Avec cette description, les contraintes des ressources ayant une capacité variable sont un cas particulier du problème RCPSP.

5.3 Modélisation du modèle de planification

Le modèle de planification, construit dans ce prototype, a pour but l'optimisation des ressources fournies par l'hôpital. On vise, de plus, le service rendu au patient du point de vue économique. Du point de vue médical, son but est l'optimisation des ressources mises en oeuvre pour les soins du patient. Enfin, on désire pouvoir estimer l'efficacité ainsi que la politique médicale des établissements.

Le modèle de planification en tant qu'agent, permettant au modèle de recrutement de fonctionner, a été décrit précédemment. Dans la suite de cette section, nous présentons les différents modèles mathématiques, conçus et testés avec le modèle de recrutement, pour le modèle de planification. Nous comparons ces modèles dans la partie suivante du manuscrit.

5.3.1 Modélisation mathématique

Comme cela a été mentionné, le prototype repose sur une modélisation générique. En conséquence, nous imposons ce type de modélisation pour le modèle de planification. Nous exposons dans cette partie, le point de vue adopté sur la modélisation mathématique et les points connexes avec la planification en IA (Intelligence Artificielle). En première place, il s'agit de décrire en détails les traitements et les contraintes techniques et médicales les concernant. Dans un deuxième temps, il est nécessaire d'intégrer correctement la politique médicale des établissements de soin. Ces deux contraintes sont modélisées dans chacun des modèles présents dans le manuscrit.

D'après la modélisation que l'on a appliquée, les caractéristiques nécessaires sont les suivantes :

- Caractéristiques générales du centre.
Les caractéristiques générales du centre concernent les horaires de son ouverture. Dans ce cas, il est nécessaire de disposer de l'information suivante :
 - le nombre de semaines d'ouverture du centre dans une année ;
 - le nombre de jours d'ouverture dans une semaine ;
 - le nombre d'heures d'ouverture du centre pour une journée.

- **Caractéristiques d'un traitement.**

Les caractéristiques d'un traitement sont celles qui précisent sa durée et la disposition dans le temps de la simulation. De plus, en utilisant l'indication, nous tenons compte des contraintes spécifiques, telle que l'urgence du traitement du patient. Nous avons basé la simulation sur une unité élémentaire équivalente à une semaine. Par conséquent, les traitements des patients, donnés par les protocoles, sont décrit de la même manière. Les caractéristiques obligatoires à prendre en compte, lors de la description des traitements et les protocoles leurs correspondant, sont :

- Le traitement est décrit en fonction des types de séances qui le composent. Lorsqu'on décrit une séance, on donne sa durée qui dépend du type de séance. Par exemple, la première séance est d'un type spécifique, car elle est plus longue. Elle est utilisée pour la préparation du patient et requiert de nombreux spécialistes. En effet, ces séances nécessitent souvent l'intervention de spécialistes. De plus, elles sont utilisées pour la préparation du patient, lorsque cette dernière n'a pas eu lieu avant ;
- La deuxième caractéristique est l'espacement entre les séances de traitement. Ces espacements sont caractérisés par un délai minimum et maximum. Ce sont des contraintes médicales imposées par les protocoles.

Les caractéristiques d'un traitement sont comparables aux termes modélisant le problème RCPSP. On en déduit que la modélisation des séances est semblable à une modélisation utilisant des "time-lag". Ce problème est modélisé dans la partie suivante de ce chapitre. Nous nous rapprochons de cette technique en vue d'optimiser le nombre de patients admis dans un centre de radiothérapie.

- **Planning concernant la politique médicale.**

La politique médicale est essentielle pour un centre de radiothérapie. Comme cela a été mentionné, elle permet de positionner l'établissement de soins, de façon globale, sur le plan des réseaux d'établissements hospitaliers. La description de la politique médicale a été discutée dans le chapitre précédent. Le fonctionnement de la politique médicale a été présenté comme un agent intervenant pour le centre et présentant les contraintes médicales et politiques imposées par ce dernier.

- **La gestion des plages prioritaires.**

Les plages prioritaires d'un centre de radiothérapie font partie du mécanisme de la politique médicale (section 4.4.5.3). Nous rappelons que les plages prioritaires sont caractérisées par un effet de réservation/déréservation pour la planification des traitements. La réservation est prévue pour les patients dits prioritaires, tandis que la déréservation donne accès à tous les types de patients. Dans la modélisation de la politique médicale, nous avons prévu la réservation, ainsi que la déréservation des plages prioritaires pour chacune des règles de la politique médicale. Les caractéristiques qui doivent être respectées lors de ces actions de réservation/déréservation sont les suivantes :

- Des plages sont réservées pour chaque groupe de priorité (voir chapitre 4). La durée de la plage et sa fréquence sont propres à chaque règle. Lors de la création d’une plage prioritaire, on respecte les conditions suivantes :
 - Un mécanisme de réservation/déréservation est utilisé pour la gestion des plages. Ses mécanismes sont gérés par le biais du modèle de planification ;
 - Une plage réservée est prévue pour tous les traitements spécifiques. Cette réservation est valable jusqu’à l’attribution effective d’un traitement ou jusqu’au délai, d’expiration de sa réservation, fixé au préalable.
- Le mécanisme de réservation suit la méthode suivante :

- Réservation et gestion générale.

Pour chaque règle attribuée à un groupe de priorité, la réservation du temps est spécifique. Néanmoins, la règle pour la réservation du temps global d’utilisation des plages prioritaires doit être respectée. Ceci est possible grâce à un mécanisme de surveillance. Il est important de spécifier que chaque plage réservée, sans tenir compte de la règle, est créée par le modèle de planification. En effet, le modèle de planification est le responsable de la gestion, la création et la suppression des plages prioritaires.

- Spécificités.

En ce qui concerne certaines spécificités, nous devons donner une grande importance à la gestion des plages prioritaires concernant les groupes de priorité. En effet, des groupes de priorités spécifiques sont désignés, par les centres pour faire partie de la politique médicale. Les groupes de priorité possèdent des caractéristiques qui permettent de faire passer un temps réservé et non utilisé, d’un groupe de priorité vers un autre groupe. La règle à suivre obéit à ce que l’on appelle la “hiérarchie des groupes de priorités”.

Définition : Hiérarchie des groupes de priorités

La hiérarchie des groupes de priorités consiste en la réaffectation d’un groupe vers un autre, du temps prioritaire non utilisé. Ce passage respecte des contraintes strictes.

En effet, les groupes de priorités définies dans la politique médicales peuvent être ordonnées pour permettre l’utilisation des heures non utilisées dans un groupe courant i pour les groupes se trouvant plus bas dans la hiérarchie définie. Dans le tableau suivant 5.1, on présente un exemple de la hiérarchie d’une liste de groupes de priorité.

TABLE 5.1 – Exemple d’hiérarchie pour le temps réservé des groupes de priorités.

# groupe de priorité	% attribué	capacité cumulée
1	10	10
2	50	60
3	30	90
4	10	100

Supposons que le temps réservé pour les groupes de priorité représente une certaine valeur dans le planning du centre de radiothérapie. Ce temps est réparti entre les groupe de priorité. Pour chaque groupe, l'utilisateur doit renseigner le temps attribué. En considérant la hiérarchie entre les groupes, cet ordonnancement est renseigné dans le tableau 5.1. En effet, à partir de ce tableau, on voit que le temps pour chaque groupe de priorité est un cumul du temps des groupes de priorité précédents. Ainsi, lorsqu'un temps réservé pour un groupe de priorité n'est pas utilisé, il peut être automatiquement transféré vers le groupe de priorité suivant dans la hiérarchie pour ne pas perdre la notion du temps réservé. De cette manière, les patients prioritaires sont pris pour des soins sur les plages prévues à cet effet. De plus, lorsque ces plages ne sont pas suffisantes, et que des patients prioritaires se manifestent, le mécanisme de transfert du temps réservé d'un groupe à l'autre permet leur prise en charge. Ainsi, les patients sont admis pour des soins lorsque cela est possible.

5.3.1.1 Premier modèle

Dans ce premier modèle, nous avons utilisé des variables binaires pour construire un programme linéaire permettant l'optimisation de la planification des séances de traitement. Les caractéristiques générales de ce modèle sont les suivantes :

- Les variables binaires peuvent prendre uniquement une valeur dans l'ensemble $\{0,1\}$;
- Nous optimisons le nombre de patients pris pour des traitements dans un centre hospitalier. Nous optimisons une prise en charge optimale au niveau de la planification des séances. Ainsi, nous sommes en mesure de proposer un délai d'attente le plus court possible au patient, en accord avec le délai du début de traitement, fixé par son indication.

Les variables qui sont créées pour la modélisation des contraintes linéaires de ce modèles sont :

- On désigne par $i = 1, \dots, n$ le numéro de séance d'un patient, selon son protocole de traitement ;
- On désigne par $j = 1, \dots, m$ les dates auxquelles les séances peuvent éventuellement être placées ;
- Soit $x_{i,j}$ la variable qui désigne que la séance i d'un patient prend effet à la date j .

$$x_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{si la séance } i \text{ du patient } j \text{ n'est pas placée ;} \\ 1 & \text{si la séance est placée} \end{cases}$$

Les contraintes sous lesquelles le programme cherche une solution sont :

1. Une séance n'est placée qu'une seule fois :

$$\sum_{j=1}^m x_{i,j} = 1 \quad \forall i = 1 \dots n ; \tag{5.4}$$

2. Le nombre de toutes les séances d'un traitement est de n :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{i,j} = n; \quad (5.5)$$

3. Le délai entre deux séances est situé entre une valeur minimale et une valeur maximale :

$$\min \leq \sum_{j=1}^m j \times x_{i+1,j} - \sum_{j=1}^m j \times x_{i,j} \leq \max \quad \forall i = 1 \dots n \quad (5.6)$$

où \min est la valeur minimale, \max est la valeur maximale ;

4. Vérification du temps pour chaque séance : Soit p_i pour $i = 1 \dots n$ le plus grand des temps restant de disponibilité des salles et t_i le temps nécessaire pour chaque séance

$$\sum_{j=1}^m p_j \times x_{i,j} \geq t_i \quad \forall i = 1 \dots n; \quad (5.7)$$

5. Un délai maximal d'étalement du traitement

$$\sum_{j=1}^m j \times x_{n,j} - \sum_{j=1}^m j \times x_{1,j} \leq M \quad (5.8)$$

M étant le délai d'étalement maximum du traitement ;

6. Une contrainte de prise en compte des jours fériés dans la planification. Pour les jours fériés, on doit s'assurer qu'aucune séance n'est planifiée. Ceci revient à dire que

$$\sum_{i=1}^n x_{i,j} = 0$$

et si l'on note $j = 1, \dots, J$ le numéro du jour férié, J étant le nombre maximal de jours fériés, l'équation est :

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^n x_{i,j} = 0. \quad (5.9)$$

Cette équation doit être vérifiée pour tous les jours fériés dans l'année de planification du centres.

Pour pouvoir obtenir le nombre de jours fériés dans une année, on utilisera les conventions suivantes :

- Soit e le nombre de jours travaillés dans une semaine ;
- Soit z le nombre de jours non travaillés dans une semaine e . Ici on ne parle que du samedi et du dimanche. Ce sont des jours fériés avec répétition ;
- Les jours j , non travaillés, sont calculés de la manière suivante :

- Pour un jour j quelconque et une semaine e on a :

$$j = e + 1, \dots, j = e + z$$

ensuite

$$j = 2e + z + 1, \dots, j = 2e + 2z$$

et puis

$$j = ke + z + 1, \dots, j = ke + kz$$

- avec k un entier qui permet de marquer la répétition des jours fériés consécutifs. Nous avons fait l'hypothèse que la semaine avec laquelle on commence les traitements commence avec le premier jour d'une semaine de travail, un lundi. Un décalage doit être appliqué lorsque cela n'est pas le cas.

La fonction minimise la date de la dernière séance par l'expression suivante :

$$\sum_{j=1}^m j \times x_{n,j} \quad (5.10)$$

Nous avons ainsi créé le problème d'optimisation linéaire associé au modèle de planification. Cette partie a été intégrée au prototype logiciel. Les algorithmes et méthodes utilisés sont expliqués dans le chapitre suivant. Ce chapitre présente également des résultats théorique évaluant la prise en charge des patients.

5.3.1.2 Proposition d'un deuxième modèle

Après avoir testé l'outil informatique avec la première version du modèle de recrutement, nous avons continué le travail sur ce modèle avec pour but de le faire évaluer pour qu'il puisse prendre en compte les ressources. Les ressources pour ce modèle peuvent être multiples. Nous pouvons donner un exemple basique qui est la ressource temps pour les salles de traitements. Cette ressource est limitée et doit être gérée correctement pour pouvoir ensuite estimer le nombre de patients soignés dans le système pour chaque centre participant à l'étude. Ainsi, dans cette section, nous proposons un premier modèle simple, nous permettant de tester la faisabilité de notre modèle avec de nouvelles contraintes linéaires implémentées cette fois sous l'outil **Cplex**.

Ce modèle est modélisé à l'aide de contraintes linéaires. Les variables, ainsi que les hypothèses que nous avons utilisées, sont listées ci-dessous.

- Soit N le nombre total de patients à la recherche d'un centre de radiothérapie ($i \in N$);
- Soit T l'horizon de planification $t \in T$;
- Soit K le nombre d'indications possibles, une indication étant associée à chaque pathologie;
- Soit C le nombre de centres de soins et N_c ($l \in N_c$) le nombre de salles présentes dans le centre c ;

- Soit P le nombre de protocoles thérapeutiques possibles. Des paramètres, mentionnés par la suite, assurent la correspondance entre les patients et les indications, les protocoles et les indications, les centres et les protocoles ;
- Des variables de décision permettent de déterminer la date, le centre et la salle où la j -ème séance du patient i aura lieu ;
- Soit $x_{i,c}$ la variable qui relie un patient à un centre.

$$x_{i,c} = \begin{cases} 1 & \text{si le patient est affecté à un centre } c ; \\ 0 & \text{sinon ;} \end{cases}$$

- Soit $S_{i,j,l,c,t}$ la variable qui désigne une séance j pour un patient i à une date t .

$$S_{i,j,l,c,t} = \begin{cases} 1 & \text{lors du début d'une séance ;} \\ 0 & \text{sinon ;} \end{cases}$$

- Soit $A_{i,p}$ le paramètre définissant le protocole p utilisé pour le patient i ;
- Soit $y_{i,p}$ la variable reliant le protocole p au patient i .

$$y_{i,p} = \begin{cases} 1 & \text{si le protocole est choisi pour un patient ;} \\ 0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

- Soit $Z_{c,p}$ le paramètre reliant un protocole et un centre ;

$$Z_{c,p} = \begin{cases} 1 & \text{si un protocole } p \text{ est réalisable dans un centre } c ; \\ 0 & \text{sinon ;} \end{cases}$$

- On note par T_p^{max} le temps maximum attribué à chaque protocole p . T_k^{max} est le temps maximal d'attente autorisé par l'indication d'un patient, qui représente l'urgence du traitement ;
- Soit $\delta_{j,p}^{min}$ et $\delta_{j,p}^{max}$ respectivement le délai minimum et maximum entre deux séances d'un protocole p pour toutes ses séances ($\forall j = 1, \dots, N_p$) ;
- $U_{i,j}$ est la durée de la séance j pour le patient i ;
- Soit H une très grande constante positive.

Les équations linéaires que l'on a modélisées sont les suivantes :

1. Pour tous les patients i on vérifie qu'ils sont placés dans au plus un centre $c \in C$.

$$\sum_{c=1 \dots C} x_{i,c} \leq 1 ; \quad (5.11)$$

2. On ne place pas de séances pour des patients qui n'ont pas été affectés à un centre c et ceci $\forall i = 1, \dots, N, \forall c = 1, \dots, C$.

$$\sum_{j,l,t} S_{i,j,l,c,t} \leq x_{i,c} H ; \quad (5.12)$$

3. Un patient n'est traité qu'avec un seul protocole $\forall i = 1 \dots N$

$$\sum_{p=1 \dots P} A_{i,p} y_{i,p} = 1 ; \quad (5.13)$$

4. Le patient choisit un protocole et ceci dans un seul centre. L'équation est vérifiée pour tous les patients i et tous les centres c .

$$x_{i,c} \leq \sum_p^{1 \dots P} Z_{c,p} y_{i,p} ; \quad (5.14)$$

5. On associe le bon nombre de séances pour chaque protocole réalisé dans un centre. L'équation est vérifiée pour tous les patients étant acceptés dans un centre.

$$\sum_{j,t,l,c} S_{i,j,l,c,t} = N_p y_{i,p} A_{i,p} ; \quad y_{i,p} \leq A_{i,p} ; \quad (5.15)$$

6. Une séance d'un protocole ne peut être placée deux fois dans un centre de traitement. L'équation doit être vérifiée pour toutes les séances et dans tous les centres concernant les patients acceptés.

$$\sum_l S_{i,j,l,c,t} \leq 1 ; \quad (5.16)$$

7. On assure que le délai maximal pour la disposition des séances dans le planning du centre est respecté ($\forall p = 1, \dots, P$). On fait de même pour assurer l'urgence du traitement exprimé par l'indication ($\forall i = 1, \dots, N, \forall k = 1, \dots, K$) où $z_{i,k}$ est la variable à 1 si l'indication k est attribuée au patient i et H est une constante qui tend vers $+\infty$.

$$\sum_{t,c,l} [tS_{i,N_p,l,c,t} - tS_{i,1,l,c,t}] \leq T_p^{max} y_{i,p} + (1 - y_{i,p})H \quad (5.17)$$

$$\sum_{t,l,c} tS_{i,j,l,c,t} \leq T_k^{max} z_{i,k} + (1 - z_{i,k})H ; \quad (5.18)$$

8. On s'assure que les délais minimum et maximum entre les séances de traitement d'un patient i sont respectés.

$$\sum_{t,l} [tS_{i,j+1,l,c,t} - tS_{i,j,l,c,t}] \geq U_{i,j} + \delta_{j,p}^{min} \quad (5.19)$$

$$\sum_{t,l} [tS_{i,j+1,l,c,t} - tS_{i,j,l,c,t}] \leq U_{i,j} + \delta_{j,p}^{max} ; \quad (5.20)$$

9. La fonction objective doit maximiser le nombre de patients pris en charge dans les différents centres :

$$Max \sum_{i,c} x_{i,c} . \quad (5.21)$$

Le modèle exposé ici nous a permis de vérifier la faisabilité de notre première proposition. Partant de cette base, nous proposons un troisième modèle.

5.3.1.3 Troisième modèle

Le troisième modèle présenté dans ce manuscrit développe les contraintes du second et rajoute la vérification de la contrainte sur la ressource temps, plus particulièrement le temps concernant le personnel. Ce modèle est également développé sous le logiciel **Cplex**. Nos variables et hypothèses pour cette modélisation sont données ci-dessous :

- Soit T l'horizon sur lequel on planifie ($t = 1, \dots, T$) et C le nombre de centres participants à l'étude ($c = 1, \dots, C$). Pour chaque centre c , on dispose de salles L_c ($l = 1, \dots, L_c$);
- Soit N le nombre de patients à placer pour un centre de radiothérapie ($i = 1, \dots, N$);
- La variable $S_{i,j,l,c,t}$ vaut 1 si une séance j pour un patient i est planifiée, en utilisant la salle l dans le centre c et à la date t . La variable $x_{i,c}$ vaut 1 si le patient i est affecté au centre c ;
- Soit P le nombre de protocoles ($p = 1, \dots, P$) et N_p le nombre de séances nécessaires pour un protocole. La variable $Z_{c,p}$ vaut 1 si un protocole p est réalisable dans un centre c ;
- La variable Soit $S_{i,j,l,c,t}$ désigne une séance j pour un patient i à une date t .

$$S_{i,j,l,c,t} = \begin{cases} 1 & \text{pour une séance placée;} \\ 0 & \text{sinon;} \end{cases}$$

- Soit $A_{i,p}$ le paramètre définissant le protocole p utilisé pour le patient i ;
- Soit $y_{i,p}$ la variable reliant le protocole p au patient i .

$$y_{i,p} = \begin{cases} 1 & \text{si le protocole est choisi pour un patient;} \\ 0 & \text{sinon;} \end{cases}$$

- Soit $Z_{c,p}$ le paramètre reliant un protocole p et un centre c .

$$Z_{c,p} = \begin{cases} 1 & \text{si un protocole } p \text{ est réalisable dans un centre } c; \\ 0 & \text{sinon;} \end{cases}$$

- On note par T_p^{max} le temps maximum attribué à chaque protocole p . T_k^{max} est le temps maximal d'attente autorisé par l'indication k d'un patient. T_k^{max} indique aussi l'urgence du traitement;
- Soit $\delta_{j,p}^{min}$ et $\delta_{j,p}^{max}$ respectivement le délai minimum et maximum entre deux séances d'un protocole p pour toutes ses séances ($\forall j = 1, \dots, N_p$);
- $U_{i,j}$ est la durée de la séance j pour le patient i ;
- $Se_{i,j,l,c,t}$ vaut 1 durant toute la durée de la séance j pour le patient i , dans la salle l , du centre c et à partir de la date t et 0 dans le cas contraire. Soit $Se_{i,j,l,c,t}$ la variable valant 1 lorsque la variable $S_{i,j,l,c,t}$ vaut 1.

Les contraintes linéaires composées avec ces variables et paramètres sont les suivantes :

1. On vérifie que le patient i ($\forall i = 1, \dots, N$) est affecté dans un seul centre.

$$\sum_{c=1}^C x_{i,c} \leq 1; \quad (5.22)$$

2. On vérifie que les séances j ont lieu dans le centre c correspondant au patient i . $\forall i = 1, \dots, N, \quad \forall c = 1, \dots, C,$

$$\sum_{j=1}^{N_p} \sum_{l=1}^{L_c} \sum_{t=1}^T S_{i,j,l,c,t} \leq x_{i,c} H; \quad (5.23)$$

3. Puisque le patient i peut bénéficier de plusieurs protocoles, on s'assure qu'il n'est traité qu'avec un seul.

$$\forall i = 1, \dots, N \quad ; \quad \forall p = 1, \dots, P$$

$$y_{i,p} \leq A_{i,p} \quad (5.24)$$

$$\sum_{p=1}^P y_{i,p} = 1; \quad (5.25)$$

4. Le patient i choisit un protocole p dans un centre c . $\forall i = 1, \dots, N, \quad \forall c = 1, \dots, C$

$$x_{i,c} \leq \sum_{p=1}^P Z_{c,p} \times y_{i,p}; \quad (5.26)$$

5. Le nombre de séances j pour le protocole p est assuré. $\forall i = 1, \dots, N, \quad ; \quad \forall p = 1, \dots, P$

$$\sum_{j=1}^{N_p} \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_c} S_{i,j,l,c,t} \leq \sum_{c=1}^C y_{i,p} + (1 - y_{i,p}) H \quad (5.27)$$

$$\sum_{j=1}^{N_p} \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_c} S_{i,j,l,c,t} \geq \sum_{c=1}^C y_{i,p} + (y_{i,p} - 1) H; \quad (5.28)$$

6. Une séance j ne peut être placée dans deux salles l différentes à la fois.

$$\forall i = 1, \dots, N, \quad \forall p = 1, \dots, P, \quad \forall j = 1, \dots, N_p$$

$$\sum_l S_{i,j,l,c,t} \leq 1; \quad (5.29)$$

7. On assure que le délai maximal pour la durée du traitement est respecté.

$$\forall i = 1, \dots, N, \quad \forall p = 1, \dots, P \quad \forall c = 1, \dots, C$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_c} [tS_{i,N_p,l,c,t} - tS_{i,1,l,c,t}] \leq T_p^{max} x_{i,c} + (1 - x_{i,c}) H; \quad (5.30)$$

8. On assure le temps maximal autorisé avant l'indication.

$$\forall i = 1, \dots, N, \quad \forall k = 1, \dots, K$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_c} \sum_{c=1}^C t S_{i,1,l,c,t} \leq T_k^{max} z_{i,k} + (1 - z_{i,k})H; \quad (5.31)$$

9. Chaque patient n'a qu'une indication affectée.

$$z_{i,k} \leq E_{i,k} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (5.32)$$

$$\sum_{k=1}^K z_{i,k} E_{i,k} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, N; \quad (5.33)$$

10. Contraintes de vérification des délais (maximum et minimum) entre deux séances consécutives ainsi que la date de la dernière séance.

$$\forall i = 1, \dots, N, \quad \forall j = 1, \dots, N_p, \quad \forall p = 1, \dots, P$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_c} [t S_{i,j+1,l,c,t} - t S_{i,j,l,c,t}] \geq \sum_{c=1}^C [U_{j,p} + \delta_{j,p}^{min}] y_{i,p} \quad (5.34)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_c} [t S_{i,j+1,l,c,t} - t S_{i,j,l,c,t}] \leq \sum_{c=1}^C [U_{j,p} + \delta_{j,p}^{max}] y_{i,p} \quad (5.35)$$

$$\forall i, \quad \sum_{l=1}^{L_c} \sum_{t=1}^T t S_{i,N_p,l,t} \leq (T^{max} - U_{i,N_p}) y_{i,p}; \quad (5.36)$$

11. Une salle l ne peut accueillir qu'un patient i à une date.

$$\forall p = 1, \dots, P, \quad \forall j = 1, \dots, N_p, \quad \forall c = 1, \dots, C, \quad \forall l = 1, \dots, L_c, \quad \forall t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{i=1}^N S_{i,j,l,c,t} \leq 1; \quad (5.37)$$

12. Gestion de la ressource salle.

On réserve les salles de traitement lors de la durée des séances des patients. Une salle ne peut être utilisée que pour une séance et durant toute la durée de la séance est bloquée pour d'autres traitements.

$$\forall i = 1, \dots, N, \quad \forall j = 1, \dots, N_p, \quad \forall l = 1, \dots, C_l, \quad \forall c = 1, \dots, C, \quad t = 1, \dots, C, \quad \forall p = 1, \dots, P$$

$$\sum_{q=t}^{t+U_{j,p}-1} S_{e_{i,j,l,c,q}} \leq D_{j,p} + (2 - S_{i,j,l,c,t} - y_{i,p})H \quad (5.38)$$

$$\sum_{q=t}^{t+U_{j,p}-1} S_{e_{i,j,l,c,q}} \geq D_{j,p} + (S_{i,j,l,c,t} + y_{i,p} - 2)H \quad (5.39)$$

Fonction objectif qui maximise le nombre de patients pris en soins.

$$Z = \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^C P_{i,c} x_{i,c} . \quad (5.40)$$

où $P_{i,c}$ sont les priorités fixées par chaque centre pour ordonner les patients en fonction de leur bénéfice médical.

La modélisation du modèle de planification étant annoncée, nous pouvons poursuivre la construction du prototype avec les deux derniers modèles. Ce sont les modèles économiques et le modèle médico-économique.

5.4 Modèle économique

L'étude du modèle économique est importante, car elle permet d'évaluer l'efficacité d'un centre de radiothérapie en considérant son organisation sur le plan médical et en tenant compte des financements. Dans cette partie sont décrites les méthodes et les mécanismes permettant l'implémentation de ce modèle. Nous utilisons des méthodes économiques connues pour le calcul du prix par traitement en partant de la méthode d'Activity Based Costing.

5.4.1 La méthode ABC et son interprétation

Dans cette section, la méthode ABC (Activity Based Costing) est exposée en détails. Elle fut construite dans les années 1980 pour les besoins l'industrie. Par la suite, son utilisation est devenue standard pour l'évaluation des coûts dans le domaine de la santé. Comparable avec les méthodes directes de calcul de coût, elle tient compte des activités et des produits utilisés [Kaplan 1998]. Puisque cette méthode exprime les coûts par les activités, il est nécessaire de mentionner le processus appelé Activity Based Management (ABM). Ce processus est utilisé, en appliquant la méthode ABC, pour faire apparaître les décisions à prendre en analysant en même temps les niveaux opérationnels et stratégiques. En général, il est une suite logique de la méthode ABC [Miller 1996]. De plus, il est adapté spécialement pour la description des services de santé et des activités différentes.

La méthode que l'on utilise est celle qui répartit les coûts typiques des différentes activités accomplies lors de la réalisation des protocoles. En effet, lors de la réalisation des protocoles par les centres de soins, des activités sont effectuées. Ces activités sont accomplies par le personnel et fait appel à différents outils/biens. On peut prendre comme exemple l'intervention d'une infirmière durant une séance, ou l'utilisation d'une machine en particulier. Ce sont des activités, utilisées durant les séances prévues par les protocoles, durant leurs séances. Pour comprendre la méthode ABC, on dira simplement qu'une activité consomme des ressources. On doit rajouter les activités une fois réunies représentant les services rendus au patient. Le protocole est un service rendu à chaque patient, qui en bénéficie. Nous allons considérer que le protocole est un produit effectué par l'hôpital pour le patient. Le

coût d'un produit est alors la somme des coûts des activités, qui sont utilisées pour le décrire. Par conséquent, le coût d'un produit est également la somme des coûts des ressources consommées par ces activités. Dans ce contexte, pour pouvoir décrire les coûts, on introduit les notations de coûts directs et de coûts indirects.

Définition : Coûts directs et indirects

- *Les coûts directs sont ceux qui peuvent être directement évalués ;*
- *Les coûts indirects sont ceux des biens utilisés lors des activités indirectes auprès du patient.*

On peut dire qu'un coût direct est par exemple attribué à un consommable utilisé lors d'une séance. Un exemple est un masque. Un coût indirect sera l'intervention d'un physicien des particules dans une séance de protocole. Cette intervention est décrite comme une activité.

La méthode ABC a été créée pour mieux évaluer l'utilisation des produits complexes lors de la réalisation des protocoles au sein d'un centre de traitement. En effet, en tenant compte des activités effectuées lors des protocoles, on estime l'utilisation des ressources consommées en terme de volume de production. Le but de cette méthode est l'évaluation de la performance du centre en tenant compte de son fonctionnement durant une période étudiée au préalable. Un calcul détaillé du coût par produit permet l'analyse du processus de production et de l'offre proposée aux patients. De plus, lorsqu'ils s'agit de mesurer le coût des activités, plusieurs auteurs proposent l'utilisation de la méthode ABC [Henri 2003, Shank 1992]. Pour pouvoir correctement estimer le coût des services rendus, on doit tenir compte des activités, qui dépendent en même temps de coûts directs, indirects et des capitaux investis [Roztocki 2008].

Le schéma 5.1, page 144, montre l'utilisation de la méthode ABC pour le calcul des coûts des protocoles. À noter que les protocoles sont considérés comme des services. Ce schéma doit être lu de bas en haut et illustre les différentes étapes qui doivent être respectées :

- La définition des coûts.
La première étape définit le coût. Il s'agit des coûts indirects (outils médicaux, etc.) et les coûts indirects associés (eau, électricité, etc.) ;
- Définitions des activités avec analyse des procédures.
En second lieu les activités à mener lors de la réalisation des protocoles sont définies. Ici les séances des protocoles sont définies en fonction des activités à mener. Il s'agit de décrire tous les protocoles qui sont réalisés au sein du centre ;
- Définition des clés de répartition.
En troisième lieu, on définit ce que l'on appelle les clés de répartition.

Définition : Clé de répartition

Une clé de répartition désigne l'utilisation des biens dans les différentes activités accomplies.

La clé de répartition renseigne plus précisément la répartition d'un bien entre

différentes activités par exemple. De cette manière le coût du bien est réparti entre les différentes activités ;

- Allocation des coûts aux activités.

En avant dernier lieu, ce sont les coûts des activités qui sont calculés. L'allocation des coûts aux activités fait la somme des différents coûts des biens utilisés ;

- Calculs des coûts par bien.

On calcule dans cette phase les coûts pour tous les biens utilisés. On peut référencer dans cette partie la somme des coûts directs et des coûts indirects.

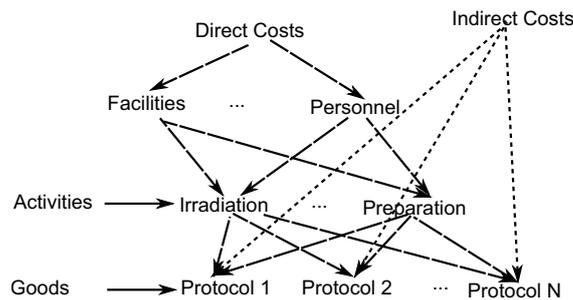


FIGURE 5.1 – Modélisation des coûts suivant la méthode ABC. Les activités consomment des biens. On attribue des coûts directs/indirects aux activités/biens.

Répartition des coûts pour estimer un traitement. Puisqu'on a prévu l'utilisation de différents niveaux de détails, ceci est équivalent pour la description économique des données. En effet, le niveau de précision pour les données économiques doit tenir compte du niveau de précision recherché. Ce niveau de précision doit être du même ordre de grandeur sur les quantités et les coûts unitaires. Pour comprendre comment formaliser l'information nécessaire et quelles sont les sources de données possibles, on détaille quelques méthodes [Pommier 2005] :

- Micro-costing.

C'est une méthode basée sur la mesure des quantités unitaires consommées pour un bien. Les quantités sont exprimées en nombre d'unités élémentaires ou en temps. Les unités élémentaires peuvent également désigner par un nombre de consommables utilisés lors d'une séance pour un traitement. Le temps est utilisé pour mesurer l'intervention d'un personnel. Puisque le but que l'on souhaite atteindre est l'évaluation du prix par protocole, et qu'il est constitué de différentes activités, le micro-costing est une bonne méthode à utiliser en couplage avec la méthode ABC ;

- Coût moyen.

Souvent lors de la comparaison des coûts, des différences très faibles apparaissent. Elles n'ont pas d'impact sur la comparaison globale des stratégies et traitements. Dans le cas de telles différences, on peut se permettre d'utiliser un coût moyen pour décrire les ressources. Un coût moyen est souvent utilisé pour décrire les frais généraux par traitement ou par patient ;

– Case-Mix.

Un case mix est une solution intermédiaire provenant des deux précédentes. Il permet de représenter un ensemble de ressources utilisées pour effectuer une procédure. On peut citer le coût hospitalier par jour d'un patient hospitalisé et sa description en groupes homogènes de séjour.

Le modèle de coût, point de vue économique. Pour modéliser le modèle de coût, il est nécessaire de représenter les coûts qui entrent dans le coût d'un protocole. Les coûts que l'on représente durant cette étude sont ceux des activités. Il est nécessaire de décrire la phase thérapeutique de préparation et la phase d'irradiation des protocoles, utilisées dans un centre de radiothérapie. Puisque les deux phases sont effectuées dans les centres, il est également nécessaire d'inclure les coûts d'investissement dans les machines et des produits utilisés pour les soins, mais encore les bâtiments et les frais généraux.

Les activités dont on tient compte lors de la description des deux phases sont celles qui concernent directement le patient. Les autres activités sont considérées comme secondaires et ne sont pas incluses dans la modélisation actuelle. Néanmoins, nous tenons compte de l'intervention du personnel médical et des spécialistes lors des séances.

Pour les produits utilisés lors des calculs du coût, nous considérons que ce sont les protocoles. Chaque protocole étant un produit, nous décrivons ensuite les activités qui le constituent et ainsi de suite, jusqu'aux ressources qui le constituent. Nous utilisons des clés de répartition pour la description des ressources utilisées. La première clé de répartition qui doit être décrite est celle du partage des ressources entre la phase de préparation d'un protocole et sa phase d'irradiation. La deuxième clé de répartition est celle qui répartit l'utilisation pour les protocoles des méthodes de calcul du coût, à savoir, un coût moyen, un case mix ou un micro-costing.

La table suivante 5.2, page 146 montre la répartition des coûts dans un protocole. Elle donne des indications sur les manières possibles de considérer les différentes informations pour calculer le prix par protocole dans le prototype.

En reprenant la table de la répartition des coûts, parmi les éléments des protocoles, on voit qu'il est nécessaire d'établir une bonne répartition de l'information sur plusieurs niveaux. Ce qui confirme notre choix de construire une ontologie pour le modèle économique contenant deux niveaux de détails. La section suivante reprend les informations données dans la table et détaille ce que l'on a décidé de modéliser comme un coût fixe par protocole ou par patient, ainsi que les coûts variables. À noter que le coût par protocole n'est pas toujours équivalent à un coût par patient. Par leur estimation détaillée, les coûts variables permettent de mettre en oeuvre une estimation bien établie de la méthode du micro-costing.

5.4.2 Les éléments essentiels de la modélisation

La méthode de calcul de coût par protocole tient compte des activités du protocole. Les activités d'un protocole sont toutes décrites dans l'ontologie économique.

TABLE 5.2 – Clés de répartition par protocole pour le personnel et les équipements.

Nom de la donnée	Allocation des coûts	
	Protocole	Preparation vs irradiation
<i>Personnel</i>		
Personnel médical -activité médicale directe	Micro-costing : Unité : temps en minutes par catégorie	Méthode ABC
Activité médicale indirecte et absences	En fonction de la proportion de l'activité médicale directe et indirecte	Prépartition pour l'activité médicale directe
Autre personnel médical	coût moyen par protocole	portion de la totalité du coût des deux phases
Personnel technique	utilisation de la salle de traitement en minutes	portion de la totalité du coût des deux phases
<i>Équipement médical, phase de préparation</i>		
CT, Simulator, TPS	coût moyen protocole	Phase de préparation
PET, RMI, Resp Gating	si utilisation dans le protocole	
<i>Équipement médical pour la phase d'irradiation</i>		
On-line TEP CT Scan, Resp Gating	si utilisation dans la salle de traitement ou protocole	Phase d'irradiation
Linac, Synchrotron	utilisation salle de traitement	
Spécifique H,V,Gantry	utilisation dans salle de traitement et protocole	
Autre équipement	coût moyen protocole	portion de la totalité du coût des deux phases
<i>Consommables</i>		
Équipements d'immobilisation, MRI & PET(hors centre)	coût direct par protocole	Phase de préparation
Maintenance tout équipement	en fonction du temps utilisé en minutes de la salle	Phase d'irradiation
électricité, eau	en fonction du temps utilisé en minutes de la salle	portion de la totalité du coût des deux phases
<i>Coûts supplémentaires</i>		
personnel administratif et de recherche	coût direct par protocole	portion de la totalité du coût des deux phases
bâtiments	en fonction du temps utilisé en minutes de la salle	portion de la totalité du coût des deux phases

Puisque le prototype permet de maintenir plusieurs niveaux de détails pour les données : il est prévu de prendre en compte tous les détails qui peuvent être donnés par l'utilisateur. En conséquence, le prototype contient des mécanismes et des méthodes pour vérifier la quantité de données présentes et pour effectuer la méthode d'évaluation correspondante.

Dans la suite de cette section sont présentés les détails concernant la modélisation de la méthode ABC, concernant le calcul du coût par protocole. Le protocole

est composé de deux phases, la phase de préparation et la phase d'irradiation, la modélisation leur correspond.

Pour la phase de préparation, la modélisation tient compte des items suivant :

- Le personnel du centre.

Le personnel d'un centre est spécifié : en personnel intervenant directement auprès du patient, et en personnel intervenant de façon indirecte. Nous spécifions alors le personnel médical et non médical, le personnel administratif et le personnel technique.

Une catégorie de personnel est toujours décrite avec les renseignements suivants :

- le temps complet de travail de la catégorie, en nombre d'heures et par semaine, avec le nombre de semaines ;
- le salaire correspondant ;
- la part du temps consacrée aux congés et à l'absence moyenne d'une personne de cette catégorie due aux maladies et indisponibilités.

Pour que l'on puisse correctement décrire l'utilisation du personnel dans le calcul du coût par protocole, nous avons modélisé les activités médicales et non médicales.

Définition : Activité médicale directe et indirecte

L'activité médicale directe est caractérisée par le fait qu'elle concerne directement le patient. Une activité médicale indirecte est une activité qui ne le concerne pas directement.

Avec ces deux activités et les différentes catégories de personnel, les activités qui incluent le personnel médical et non médical sont entièrement décrites. Les deux définitions appliquées aux personnels intervenant pour les traitements donnent la description qui leur est relative pour les protocoles. Ainsi, pour chaque catégorie de personnel, on décrit les activités correspondantes :

1. L'activité médicale directe.

Les informations par catégorie professionnelle sont :

- le pourcentage de l'activité médicale directe ;
- le temps d'intervention pour l'activité désignée ;
- une clé de répartition pour différencier le temps consacré à la phase de préparation et d'irradiation.

2. L'activité médicale indirecte.

Le coût concernant l'activité médicale indirecte peut être calculé de deux manières.

- La première méthode concerne le calcul global de l'activité médicale indirecte.

Cette méthode concerne l'information sur le prix global de l'activité renseignée par l'utilisateur, ainsi que le nombre de patients soignés dans l'établissement pour la période étudiée ;

- La deuxième méthode est celle qui présuppose l'existence des détails fins, au niveau de l'activité médicale directe.

Il est nécessaire de modéliser le prix de l'activité médicale indirecte pour le personnel médical et pour le personnel non médical. On distingue deux cas :

- Coût de l'activité médicale indirecte pour le personnel médical.

Il faut déterminer, pour chaque catégorie du personnel médical, la part consacrée à l'activité non médicale ainsi que le temps consacré et le coût salarial associé. Ensuite, la clé de la répartition, pour la catégorie courante, entre la phase de la préparation et la phase d'irradiation est utilisée ;

- Coût de l'activité médicale indirecte pour le personnel non médical.

On peut obtenir ce coût par deux méthodes. La première utilise un prix fixe par patient et la deuxième l'attribue directement aux activités du protocole. Pour la première méthode, l'utilisateur doit fournir le nombre de patients qui ont été soignés par le centre pour la période étudiée. De plus, le prix annuel du personnel pour chaque catégorie est demandé. Le prix obtenu est ensuite affecté au protocole, en tenant compte de la clé de répartition entre la phase de préparation et la phase d'irradiation. La deuxième méthode de calcul du coût de l'activité médicale non directe pour le personnel non médical est la même que pour le personnel médical.

- Les machines.

Les machines sont spécifiées par le coût d'achat, le coût d'utilisation et le coût d'entretien. Ayant cette information, les équipements ont été séparés en deux types :

1. Les équipements avec un coût fixe par patient/protocole.

Pour être en mesure de calculer un coût fixe d'un équipement par protocole, on doit connaître :

- La dépréciation, le coût de maintenance, et l'investissement annuels consacré à l'équipement ;
- Le nombre de patients par an (ou pour la période étudiée) pour le centre.

2. Les équipements avec un coût spécifique par protocole.

Dans ce type de modélisation, on calcule le prix en fonction du temps d'utilisation de la machine pour le protocole. Les informations nécessaires pour ce prix sont :

- La dépréciation, le coût de maintenance et l'investissement annuels ;
- Le nombre d'heures d'utilisation annuelle de l'équipement ;
- Le temps d'utilisation de l'équipement par le protocole.

On peut également donner un prix fixe par utilisation unitaire de l'équipement. Nous pouvons prendre une heure d'utilisation comme unité élémentaire. À partir du coût horaire, on déduit prix d'utilisation pour le protocole. Il est également nécessaire de prévoir l'utilisation de l'équi-

pement pour la phase de préparation ou la phase d'irradiation. Dans ce cas, la clé de répartition entre les deux phases doit être renseignée.

- Les bâtiments.

Les bâtiments décrivent les locaux communs et spécifiques. Le prix des bâtiments est exprimé par la différentiation en plusieurs catégories :

1. Les bâtiments où les soins sont effectués. Pour ce faire, le prototype localise les salles de traitements, et puis applique la clé de répartition entre la phase de préparation et l'irradiation. Il existe deux méthodes pour calculer le prix des bâtiments pour un protocole :
 - (a) On renseigne le nombre de minutes d'utilisation du bâtiment, d'après le protocole. Cette méthode donne un prix spécifique par traitement ;
 - (b) On décide d'attribuer un prix fixe par protocole et on demande le nombre total de patients par protocole pour le centre et pour la période étudiée.

2. Les bâtiments communs.

Le coût est calculé en utilisant une des deux méthodes précédentes.

Il est également nécessaire d'utiliser la clé de répartition entre la phase de préparation et la phase d'irradiation pour les bâtiments lors du calcul du prix par protocole.

- Le coût des consommables.

Le coût des consommables est donné en fonction de leur clé de répartition entre la phase de préparation et la phase d'irradiation. Ainsi, la clé de répartition doit être renseignée pour chaque consommable. Nous avons séparé les consommables en deux types :

1. Les consommables utilisés dans tout le centre et pour tous les traitements de type eau, électricité.

On peut calculer le prix de ces consommables en fonction de la durée et de la quantité utilisée pour chaque protocole. Il est alors demandé de renseigner le nombre d'heures annuelles d'utilisation de ce consommable, pour tout le centre (salles de traitements et autres locaux confondus) ;

2. Le deuxième type de consommables correspond à ceux qui sont utilisés uniquement pour certains protocoles et ne font pas partie des consommables généraux(eau, électricité, gaz etc.).

Prenons comme exemple le masque de contention. C'est un consommable qui peut être utilisé plusieurs fois de suite. Dans ce cas, il est nécessaire d'écrire le nombre d'utilisations du consommable, son prix unitaire et le nombre d'achats de ce consommable pour la période étudiée.

La modélisation annoncée est suffisamment générique pour pouvoir proposer un modèle mathématique évaluant un prix par traitement.

5.4.3 Modélisation Mathématique du coût du protocole

La phase de préparation et la phase d'irradiation sont les éléments structurants d'un protocole. D'après la description donnée, il reste tout à fait possible de décrire ces deux phases de manière similaire, tout en utilisant les activités de chaque phase. Plus précisément, il s'agit des éléments nécessaires à l'outil informatique pour la mise en oeuvre de la méthode ABC. Comme cela a été exposé dans la section précédente, nous avons séparé les éléments pour le calcul de coût en éléments avec un coût fixe et un coût variable. Cette séparation est utilisée pour le modèle mathématique. Nos travaux sont fondés sur [Pommier 2005].

1. Les éléments avec un coût fixe.

D'après la description du mode d'affectation des éléments de coût, on peut avoir des facilités de calcul pour certaines données. En effet, on peut utiliser ce que l'on appelle un coût fixe ou un coût par patient. La différence étant qu'un coût par patient donne le même coût pour tous les protocoles, tandis qu'un coût par protocole est spécifique au protocole et se déduit du nombre de patients concernés par ce seul protocole.

Soient les notations suivantes :

- C_{aam} est le coût annuel d'amortissement ;
- C_{am} est le coût annuel de maintenance ;
- C_a est le coût annuel ;
- TPS_{time} est le nombre d'heures total d'utilisation du TPS (logiciel de configuration de l'emploi du temps) par tous les acteurs de la planification.

- (a) Calcul du coût de l'activité médicale indirecte pour le personnel (C_{IMA}). La formule que l'on utilise est la suivante :

$$C_{IMA} = \frac{\text{Coût total activité médicale indirecte}}{\text{Nb patients}} \quad (5.41)$$

où l'activité médicale indirecte est calculée à partir des temps d'affectation des personnels pour le protocole courant et les salaires leur correspondant. On utilise la méthode suivante :

- Pour chaque catégorie de personnel, la part de l'activité médicale indirecte doit être connue ;
- À partir du salaire annuel de base, on calcule le coût d'une personne de cette catégorie, en utilisant le nombre d'heures à effectuer par an et le temps utilisé par le protocole ;
- À partir des données précédentes et des données de fonctionnement du centre, tenant compte du nombre de patients soignés, on peut déduire un prix fixe par patient.

- (b) Le coût des bâtiments, les locaux médicaux ($C_{HoraireLocauxM}$).

Les locaux médicaux ont un coût fixe par patient. Nous faisons en premier la liste de tous les locaux médicaux utilisés pour les traitements des

patients. Le prix de chaque salle utilisée est alors inclus dans le prix du protocole.

$$C_{HorairesLocauxM} = \frac{C_{aam} + C_{am}}{Nb \text{ patients par an}} ; \quad (5.42)$$

(c) Le coût des équipements auxiliaires (C_{equip}).

Ce sont par exemple la ventilation ou les systèmes d'information. Ils représentent un coût fixe par patient.

$$C_{equip} = \frac{C_{aam} + C_{am}}{Nb \text{ patients par an}} ; \quad (5.43)$$

(d) Le coût des consommables.

Les consommables comme l'électricité, l'eau, le chauffage ont un coût fixe par patient soigné dans le centre. Un autre type de consommable est le dispositif qui immobilise le patient.

$$C_{cons} = \frac{C_a}{Nb \text{ patients par an}} \quad (5.44)$$

Certains consommables, comme l'imagerie, peuvent être réalisés en dehors du centre. On dispose alors d'un coût fixe par examen.

2. Les éléments avec un coût variable.

Les éléments étant caractérisés par un coût variable sont décrits par leur temps d'immobilisation avec un protocole spécifique. Ces éléments sont :

(a) Certaines équipements.

On parle d'utilisation des équipements spécifiques pour les traitements des patients. Ce sont des éléments de la phase d'irradiation. En premier lieu, il faut renseigner le prix des machines installées dans le centre et ensuite des installations spécifiques pour chaque salle. Les équipements sont séparés alors en :

i. Les sources, accélérateurs, synchrotron, cyclotron, lignes de distribution des faisceaux.

$$C_{HorairesEqTech} = \frac{C_{aam} + C_{am}}{Nb \text{ heures annuelles par an}} \quad (5.45)$$

$$C_{EqTech} = Nb_{heuresProtocoleSalle} \times C_{HorairesEqTechSalle} ; \quad (5.46)$$

ii. Équipement technique des salles : faisceau fixe, machine de type Gantry

$$C_{HorairesInvestissement} = \frac{Coût \text{ investissement technique salle} + C_{am}}{Nb \text{ heures annuelles par an}} \quad (5.47)$$

$$C_{EqTechSalle} = Nb_{heuresProtocoleSalle} \times C_{HorairesInvestissement} ; \quad (5.48)$$

- iii. Équipement médical pour phase d'irradiation : PET (Position Emission Tomography) Scan, CT (Computed Tomography) Scan, Respiratory Gating ...

$$C_{\text{HoraireEqTech}} = \frac{C_{\text{aam}} + C_{\text{am}}}{\text{Nb heures annuelles par an}} \quad (5.49)$$

$$C_{\text{EqTech}} = \text{NbheuresUtilisation} \times C_{\text{HoraireEqTechSalle}} \cdot \quad (5.50)$$

On peut aussi décrire les éléments de la phase de préparation, concernant la préparation du patients avant les traitements. La répartition entre les équipements est alors la suivante :

- i. CT Scan, Simulateur, IRM (Imagerie par raisonnance magnétique), PET, Gating : On a un coût fixe par examen.

$$C_{\text{ScanSim}} = \frac{\text{Coût annuel investissement} + C_{\text{am}}}{\text{Nb patients par an}} ; \quad (5.51)$$

- ii. TPS

$$C_{\text{HoraireTPS}} = \frac{C_{\text{aam}} + C_{\text{am}}}{\text{TPS}_{\text{time}}} \quad (5.52)$$

et

$$C_{\text{TPS}} = C_{\text{HoraireTPS}} \times \text{NbheuresUtilisation} \quad (5.53)$$

ou lorsque les données ne sont pas renseignées :

$$C_{\text{HoraireTPS}} = \frac{C_{\text{aam}} + C_{\text{am}}}{\text{Nb patients par an}} \quad (5.54)$$

ce qui donne un coût fixe par protocole ;

- iii. Équipement à l'extérieur d'un centre.

On utilise un coût fixe pour une heure de traitement en fonction de l'appareil. Ce coût ne tient pas compte de l'amortissement, qui est pris en charge par la structure extérieure et inclus dans le coût de la prestation.

- (b) Le personnel.

- i. Personnel avec activité médicale directe

$$C_{\text{catégorie}} = \text{NbheuresCatégorie} \times C_{\text{horaireCatégorie}} \quad (5.55)$$

L'affectation est directe en fonction de la phase dans laquelle le personnel intervient ;

- ii. Personnel avec activité médicale indirecte et autre personnel

On utilise la méthode des coûts non variables.

(c) Les frais généraux.

Les frais généraux peuvent être traités comme des consommables. La différence est que l'on a un coût variables en fonction de l'utilisation des consommables.

- i. Fluides : eau, électricité ;
- ii. Assurances et fournitures.

$$C_{cons} = Nb_{heures\ protocole\ salle} \times C_{horaireFluide} . \quad (5.56)$$

(d) Les frais financiers.

Les frais financiers sont déjà pris en compte pour le calcul de coût de chaque entité. L'ajout de leur valeur est automatique ;

(e) Coût de la recherche.

Le coût de la recherche n'est pas pris en compte lors de l'implémentation de cette version du prototype. Néanmoins, on a relevé certaines caractéristiques lors des discussions avec les spécialistes. La recherche peut être définie comme une activité du centre. La recherche, en effet, n'a pas toujours lieu d'être prise en compte, car certains centres ne comportent pas de salles spécifiques dédiées à la recherche. A notre connaissance, les salles de recherche existent dans les centres d'hadronthérapie, par exemple. En tenant compte des coûts de construction du centre de radiothérapie, celui correspondant à la salle de recherche doit être également inclus dans les frais. Souvent, la recherche est financée par des fonds de natures différentes, également utilisés pour financer les activités médicales dédiées aux soins des patients. La formule à utiliser dans ces cas précis est la suivante :

$$C_{recherche} = C_{horaireRecherche} \times Nb_{heuresRecherche} \quad (5.57)$$

Ainsi, la règle d'utilisation de la recherche qui a été élaborée est la suivante :

i. Cas où le centre prête une machine pour de la recherche ;

Le coût annuel de la machine est financé par le coût de la recherche. Le coût de la recherche effectuée sur la machine se déduit en fonction de l'utilisation que le centre autorise. La formule du coût est la suivante :

$$C_{machines} = C_{horaireRechercheMachine} \times Nb_{heuresRechercheMachine} ; \quad (5.58)$$

ii. Cas avec une salle dédiée à la recherche.

- Le prix annuel de la salle de recherche est déduit du prix global annuel du centre ;
- Le coût des expériences finance l'activité globale.

Les modèles mathématiques exposés nous donnent une estimation des prix des protocoles utilisés dans un centre de radiothérapie. Nous tenons compte des bénéfices utilisés pour chaque protocole et ceci en fonction du fonctionnement du centre. L'étape suivante visée par les modèles économiques est l'évaluation des différentes stratégies et leur comparaison. Étant donné que l'évaluation économique est mise en place, nous pouvons comparer les différentes stratégies.

5.5 Modèle médico-économique

L'objectif médico-économique est présent dans ce travail par son apport d'aide à la décision sur l'utilisation des techniques innovantes dans les centres de radiothérapie. En effet, les centres de radiothérapie sont confrontés à une grande incertitude concernant les traitements proposés. Cela vient du fait que le patient connaît mal les dernières innovations. Il est donc essentiel d'évaluer l'efficacité de diffuser les résultats vers les patients. Nous proposons une méthode de comparaison de ces stratégies, utilisant le savoir-faire économique et médical. Pour ce faire il est tout d'abord nécessaire de préciser ce qu'est une stratégie, et le modèle mathématique associé.

5.5.1 Comparaison des stratégies

Définition : Stratégie

Une stratégie est composée d'une indication et de plusieurs protocoles ordonnés.

Nous avons précisé qu'il existe des protocoles qui sont équivalents les uns aux autres. La conséquence qui en découle, pour la définition d'une stratégie et des protocoles associés est qu'une indication est susceptible d'avoir plusieurs suites de protocoles. Chaque suite peut convenir pour former une stratégie. Nous allons donc différencier ces suites couplées à une seule indication, en précisant que ce sont des stratégies différentes, mais qui peuvent être comparées entre elles.

Étant donné les éléments précédents, il est nécessaire de décrire une stratégie au niveau de l'ontologie du prototype. En effet, comme pour les modèles précédents, nous avons pour but de créer une ontologie propre pour chaque modèle. Il en découle que l'utilisation de chaque ontologie, ainsi que de chaque modèle, sont indépendantes du reste de l'outil informatique. Ainsi, la définition de l'ontologie est présente dans le dictionnaire des connaissances. Une stratégie est représentée par les protocoles qui forment une liste attachée à l'indication. Des exemples de la grammaire des stratégies peuvent être vus dans les annexes de ce manuscrit. Ils sont décrits sous forme de schémas XSD.

La comparaison des stratégies s'effectue au niveau des prix attribués à chaque protocole. Pour que le prototype puisse évaluer le prix d'une stratégie, il a besoin de connaître le prix de tous les protocoles inclus dans cette stratégie.

5.5.2 Les éléments retenus pour la modélisation

Une stratégie est généralement subdivisée en trois phases : les phases pré-thérapeutique, thérapeutique et post-thérapeutique. Les trois phases représentent les différentes actions que l'on peut effectuer lors d'une stratégie, que cela soit des actes concernant les spécialistes médicaux, des actes pour des examens de détection des parties cancéreuses ou pour l'évaluation de l'état général du patient. Les trois phases sont décrites comme suite :

- La phase pré-thérapeutique.

Dans la phase pré-thérapeutique sont situés tous les examens effectués avant la prise en charge définitive du patient, dans un ou plusieurs établissements hospitaliers. Ceci peut concerner l'évaluation de différentes stratégies pour le traitement du futur patient, ainsi que l'évaluation de son état global. On peut considérer également des examens spécifiques requis pour choisir une stratégie parmi plusieurs. Le patient doit exprimer son choix durant cette phase de la stratégie. Il est possible d'essayer de proposer au patient des thérapeutiques innovantes pour le soin. Ceci doit être fait en expliquant les bénéfices médicaux attendus au niveau de sa vie après le traitement (gain thérapeutique).

Cette phase pré-thérapeutique n'est pas décrite dans les modèles de coût que l'on propose. Néanmoins, nous pouvons la prendre en compte dans les futurs modèles de l'outil informatique. Les examens effectués lors de cette phase ne sont pas obligatoirement dépendants d'un seul centre radiothérapeutique. Ceci ne pose aucun problème dans la description car nous pouvons considérer que c'est un acte effectué à l'extérieur du centre, où la plus grande majorité de la stratégie prend effet. Pour compléter le parcours, il reste à prendre en compte les éventuels déplacements vers les centres où les actes sont effectués. Cette option n'est pas intégrée dans la version actuelle du prototype. Nous pouvons l'inclure sous la forme d'un coût fixe moyen, pour ne pas complètement ignorer ces frais à inclure dans le protocole ;

- La phase thérapeutique.

La phase thérapeutique est celle qui décrit le traitement du patient. Lorsqu'on parle du traitement du patient, on désigne la phase de préparation du protocole et la phase d'irradiation associée. On considère que la phase thérapeutique inclut les deux mois suivant la dernière séance d'irradiation, consacrés à des soins permettant d'atténuer les effets toxiques de l'irradiation. Ces soins peuvent être considérée comme faisant partie de la phase thérapeutique. Les grandes étapes décrivant la phase thérapeutiques sont les suivantes :

- Les thérapeutiques anti-cancéreuses.

Ces thérapeutiques concernent le choix du traitement par le patient, couplé à l'avis de l'expert médical. On retrouve le traitement du patient dans l'hôpital ;

- Les thérapeutiques de support.

Il s'agit des techniques utilisées lors des soins pour prendre en charge les effets secondaires des traitements lourds des patients. En général, il est nécessaire de décrire la fréquence d'utilisation des thérapeutiques de support pour qu'elles puissent être prises en compte dans le coût de la stratégie ;

- L'hébergement médical et non médical.

L'hébergement médical et non médical est souvent pris en compte dans l'évaluation des coûts. L'hébergement médical correspond à l'hospitalisation qui est fixée avec un coût par l'hôpital. L'hébergement non médical correspond essentiellement à un accueil du patient près de l'établissement de soins, notamment quand le patient habite loin de l'établissement ;

- Le transport.

On peut considérer le transport comme une donnée importante pour l'évaluation d'une stratégie. En effet, il s'agit de la prise en charge des transports qui peuvent être médicaux et non médicaux. Le transport est estimé également en fonction de l'éloignement du domicile du patient par rapport à l'établissement hospitalier.

- La phase post-thérapeutique.

La phase post-thérapeutique tient compte du suivi du patient après son traitement imposé. Il s'agit de suivre le patient jusqu'à son décès dans les scénarios extrêmes, tout en tenant compte des éventuelles complications et/ou récidives. Les caractéristiques de la phase post-thérapeutique sont les suivantes :

- La surveillance systématique.

La surveillance systématique décrit les examens que le patient doit effectuer lorsqu'il est suivi après son traitement. Pour ces examens on établit, en général un calendrier de suivi. Il contient le nombre d'examen à faire et leur fréquence ;

- La prise en charge des effets secondaires.

Les effets secondaires sont variables d'une stratégie à l'autre. Il est donc important de les décrire en fonction de chacune, ainsi que les actes qui suivent la stratégie ;

- La prise en charge d'une progression ou récidive de cancer.

Il s'agit d'une récidive tumorale, de son suivi et de la prise en charge. La description est semblable à la précédente, les actes effectués sont décrits.

5.5.3 Le modèle mathématique

Le modèle mathématique qui a été construit tient compte des spécificités de description des thérapies. Une stratégie thérapeutiques est composée, de trois phases : la phase pré-thérapeutique, la phase thérapeutique et la phase post-thérapeutique. Les trois phases sont présentées dans la description de l'évaluation du coût d'une stratégie.

Phase pré-thérapeutique. Étant donné la complexité de la modélisation des trois phases et la difficulté de trouver des données sur un grand échantillon de personnes, nous avons fait le choix de ne pas inclure la phase pré-thérapeutique dans le logiciel. Par conséquent, elle ne figure pas dans les données présentes dans l'interface graphique utilisateur. Néanmoins nous proposons un modèle simplifié de la phase pré-thérapeutique dans les lignes ci-dessous. Cette phase est composée uniquement d'actes et de transport de patients, qui sont caractérisés par des coûts moyens (ou fixes) par patient et par protocole. Ceci permet, tout de même, de tenir compte de cette phase dans les futures évolutions du prototype. Cette phase ne tient pas compte des protocoles intervenant par la suite dans la phase thérapeutique, car elle ne concerne que de la préparation du patient et l'évaluation de son état de santé. Nous pouvons, par conséquent, considérer les différents examens passés par le patient avec un coût moyen (fixe) en fonction des équipements utilisés. Il est également possible d'en tenir compte en utilisant les Groupes Homogènes de Séjour. La formule est :

$$\sum_{i=1}^A a_i + \sum_{j=1}^T t_j \quad \text{où} \quad (5.59)$$

- a_i est un acte effectué dans les procédures d'analyse de l'état du patient ou lors de sa préparation au futur protocole à choisir. Les actes peuvent correspondre à des examens médicaux spécifiques ou généraux dans les établissements de soins. Ils peuvent représentés également des séances avec des spécialistes. À chaque acte, lorsque cela est possible, on pourrait faire correspondre un GHS et son identifiant ;
- t_j est le coût d'un transport effectué par le patient, qu'il s'agit d'un transport hospitalier ou d'un transport financé uniquement par les moyens du patient. Ces transports pouvant être également remboursés par la sécurité sociale d'un pays, il reste possible de les décrire avec les Groupes Homogènes de Séjour. Les coûts de transport étant souvent très peu connus, en l'état actuel, on a du mal à les décrire précisément ;

Phase thérapeutique. Une stratégie étant composée d'une indication et de protocoles, le schéma à suivre pour évaluer le coût d'une stratégie pour sa phase thérapeutique est de calculer le prix de chaque protocole. La figure 5.2 (page 158) donne les éléments à prendre en compte lors de l'évaluation du prix d'une stratégie : à savoir que chaque protocole doit être renseigné par rapport aux ressources utilisées pour sa mise œuvre dans un établissement.

Le prix d'un protocole peut être obtenu de manières différentes. Il est possible de renseigner ce prix directement dans le prototype. Cela demande une connaissance au préalable du fonctionnement de l'établissement pour pouvoir en déduire le prix et le renseigner. La deuxième méthode que l'on peut employer est celle de la description d'un protocole par des Groupes Homogènes de Séjour. L'utilisation des GHS a déjà été précisée dans les section précédentes. L'utilisateur est en mesure de décrire un

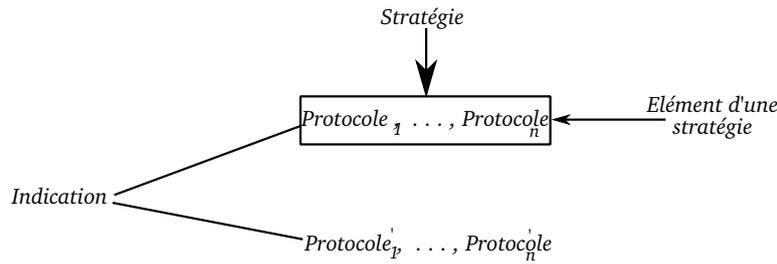


FIGURE 5.2 – Le modèle d’une stratégie thérapeutique.

protocole par les numéros des GHS correspondant à la phase de préparation et à la phase d’irradiation, et leurs prix respectifs. Ensuite, une fois la correspondance faite entre les numéros des identifiants des GHS et leurs prix dans la base de données, l’évaluation du prix consiste simplement à additionner les prix de tous les GHS participant dans le protocole. La formule à utiliser est la suivante :

$$\sum_{i=1}^{N_{GHS}} Ghs_i \text{ où} \tag{5.60}$$

- N_{GHS} est le nombre de GHS participant à l’évaluation du protocole ;
- Ghs_i est le coût du GHS courant.

Lorsque le coût d’un protocole ne peut être décrit par l’utilisateur, il peut utiliser le modèle de coût pour son évaluation. Il doit toutefois fournir des données justes pour que le modèle se comporte correctement. Dans le cas où le prix est donné avec l’aide du modèle de coût, ou avec un prix renseigné par l’utilisateur, la formule à prendre en compte est la suivante :

$$\sum_{p=1}^P p_i \text{ où} \tag{5.61}$$

- p_i est le prix du protocole.

Enfin, dans la phase thérapeutique, nous devons également tenir compte du prix des transports. L’évaluation du coût de la phase thérapeutique est effectuée comme pour la phase pré-thérapeutique. La formule générale de l’évaluation du coût est la suivante :

$$\sum_{p=1}^P p_i + \sum_{j=1}^T t_j \text{ où} \tag{5.62}$$

le prix de chaque protocole peut être remplacé par un GHS.

Phase post-thérapeutique. Reste maintenant à décrire la dernière phase d’une stratégie, la phase post-thérapeutique. Comme cela a été décrit, cette phase détaille le suivi du patient après son traitement et les éventuelles récives, ainsi que leur prise en charge. Lors des discussions avec les spécialistes, nous avons détecté des étapes précises de description, qui sont au nombre de quatre :

- Suivi.

On décrit uniquement le suivi par des examens standards ;

- Les complications.

Si des complications de santé surviennent, il est essentiel d'en tenir compte dans l'évaluation du prix. Nous avons représenté ces complications par les examens médicaux qui les concernent. Un examen médical est souvent décrit par un acte et possède un prix moyen en fonction des moyens utilisés dans l'établissement hospitalier ;

- Récidives.

Cette étape correspond à la prise en charge des récurrences. Lorsque les récurrences se manifestent, il est nécessaire de décrire en détail les examens qui doivent être effectués et l'utilisation du matériel spécifique lors des soins. Les actes bien connus et évalués doivent être également décrits dans la partie des récurrences lorsqu'ils interviennent pour la prise en charge ;

- Le décès.

Le décès du patient est pris en compte sous la forme d'un coût.

Les différentes étapes de la phase post-thérapeutiques étant décrites, détaillons maintenant la prise en charge de cette phase (tables 5.3 et 5.4). Par la suite, nous donnons les formules mathématiques correspondantes pour l'évaluation des prix.

Une stratégie est composée des trois phases. Lorsque cela est possible, les trois phases doivent être décrites pour que l'évaluation de la stratégie, ainsi que sa comparaison avec d'autres stratégies puisse être effectuées. À noter qu'il n'est pas possible de comparer deux stratégies qui ne sont pas décrites avec le même niveau de détails. Cela signifie que, si uniquement deux phases sont présentes dans la description d'une stratégie, les deux phases doivent être présentées dans la description de la stratégie à comparer.

La table 5.3 (page 159) donne un exemple de description du suivi. Il est composé d'une série d'actes. Chaque acte est décrit par son nom, son prix et sa fréquence. Dans la pratique médicale, les actes sont également caractérisés par les dates auxquelles ils sont effectués. Ces dates sont référencées par rapport à la fin de la phase thérapeutique du patient. On dit alors que l'on procède par périodes. Par exemple : "2 mois après la fin du traitement."

TABLE 5.3 – Exemple de description d'une des étapes de la phase post-thérapeutique. Exemple de description de suivi.

Nom acte	Prix	Fréquence
IRM	$prix_{IRM}$	$Freq_{IRM}$
Consultation médicale	$Prix_{consultation}$	$Freq_{consultation}$

Cette manière de décrire les étapes de la post-thérapie est adaptée pour le suivi, les récurrences et le décès. Les complications nécessitent de renseigner une caractéristique en plus : le nombre de complication survenu en moyenne par stratégie. Chaque

complication est associées à plusieurs examens et sera décrite de la même manière que le suivi. De plus, on dispose d'une probabilité d'apparition. Cette probabilité a les propriétés suivante :

1. Elle est répartie en fonction des périodes auxquelles on relève les statistiques ;
2. La valeur de la probabilité d'apparition pour une période courante est le cumul des probabilités des périodes précédentes plus la valeur caractéristique la concernant.

La table 5.4 donne un exemple de cette probabilité.

TABLE 5.4 – Exemple de la règle des probabilités pour les complications de la phase post-thérapeutique. Dans cette table, P_i est la probabilité d'apparition obtenue par la formule pour la période courante

Année après traitement (Période)	Probabilité d'apparition
1	0,02 (soit Pa_1)
2	0,04 = 0,02 + 0,02 (soit Pa_2)
3	0,1 = 0,04 + 0,06 (soit Pa_3)
...	... (soit Pa_i)
10	0,2 = $Pa_9 + Pa_{10}$

Après avoir discuté les différentes possibilités dont on dispose pour évaluer le prix d'une stratégie thérapeutique, le paragraphe suivant est consacré à une comparaison de ce prix avec le prix donné par l'assurance maladie. Dans ce manuscrit, on a étudié uniquement le cas de l'assurance maladie française. La méthode que l'on utilise est basée sur les Groupes Homogènes de Séjour qui sont les éléments fondateurs de calcul du prix remboursé par la sécurité sociale auprès des établissements de santé. L'énumération suivante donne les détails de la modélisation :

- On récupère les données GHS auprès du dictionnaire de connaissances prévu à cet effet ;
- Comme pour les GHS, nous avons modélisé un dictionnaire des actes. Ce dictionnaire est un référentiel pour les prix de tous les actes, qu'ils soient des examens médicaux ou simplement des séances avec des appareils spécifiques. Puisque chaque acte est caractérisé par un prix et en même temps par l'identifiant d'un GHS correspondant, on peut faire la correspondance entre les deux prix. Il est possible qu'un acte n'ait pas de correspondant en GHS, mais il reste tout de même décrit dans le dictionnaire de connaissances ;
- Concernant les coûts de transport et/ou l'hébergement certains d'entre eux ne sont pas remboursés par la sécurité sociale. Ceci est pris en compte dans la modélisation, tout en donnant la possibilité à l'utilisateur de les décrire selon qu'ils sont disponibles ou non.

Les formules à utiliser sont les suivantes :

- Pour un protocole décrit par les GHS : Soient les notations suivantes :
 - $Prix_{GHS_{Pr}}$, le prix concernant l'acte de préparation ;

- $Prix_{GHS_{Irr}}$ le prix concernant l'acte d'irradiation.

$$Prix_{GHS} = Prix_{GHS_{Pr}} + nbSéances \times Prix_{GHS_{Irr}} \quad (5.63)$$

- Concernant le prix du transport décrit par le modèle médico-économique utilisé dans l'outil informatique, c'est un prix moyen qui tient compte du nombre de fois où un transport est utilisé par protocole .

$$Prix_{Protocole} = Prix_{unitaire} * (Nombre\ moyen\ d'apparition \times fréquence) \quad (5.64)$$

5.6 Conclusion

5.6.1 Utilisation du modèle de planification pour le modèle de recrutement

Dans ce chapitre, plusieurs version du modèle de planification ont été proposées. Le modèle de planification, ainsi implémenté de manière différentes, a été testé soigneusement.

Le modèle de planification est présenté en trois versions. La première version est une partie intégrée au prototype, elle a été testée et peut être réutilisée en intégrant de nouvelles hypothèses suivant le modèle établi pour la construction du modèle de planification. Elle a permis de tester le modèle de recrutement de manière à vérifier les hypothèses de modélisation des patients et des centres. Ainsi, nous avons pu valider le processus de recherche des patients et la modélisation de la politique médicale des centres hospitaliers participant à l'étude. Par conséquent, en utilisant cette version du modèle de planification, nous sommes en mesure de nous prononcer sur l'efficacité de la proposition médicale des traitements données par un centre.

Quant aux deux versions suivantes du modèle de planification, elles sont implémentées avec le logiciel **Cplex**. Nous avons créé la première version pour élaborer une base de contraintes et de règles. Cette base, une fois vérifiée et testée sous **Cplex**, été utilisée pour la modélisation et l'implémentation du dernier modèle présent dans ce manuscrit.

Le modèle de planification peut être également utilisé par les deux modèles économique. Cette situation est clarifiée dans la section suivante.

5.6.2 Les modèle économiques

Les deux modèles économiques ont été conçus et implémentés. Nous proposons une implémentation de la méthode ABC et nous l'intégrons dans le prototype pour pouvoir estimer un prix par traitement. L'estimation du prix par traitement est dépendante du fonctionnement du centre, il s'agit de planification de tous les traitements, de l'utilisation des matériaux médicaux et de la gestion du personnel. Nous tenons compte de ces détails, tout en essayant de proposer une description la

plus générale possible. L'estimation du prix d'un traitement dépend également du nombre de patient qui ont été soigné avec, ce dernier résultat nécessite d'être connu au préalable. À ce jour le nombre de patients intéressés par les nouvelles techniques est encore peu connu, voilà pourquoi le modèle de recrutement est proposé et peut être utilisé pour fournir ce résultat ou modèle économique.

En modélisant la comparaisons des stratégies nous visons une meilleure évaluation des prix de ces dernières et également de la prise en charge de la phase thérapeutique et de la phase post-thérapeutique. Nous utilisons des méthode de l'économie de la santé pour la comparaison, de plus nous intégrons une partie de la description des stratégies par la sécurité sociale. Ainsi, nous pouvons proposer une comparaison des stratégies avec le prix remboursé par la sécurité sociale également. De plus nous proposons une description de la phase post-thérapeutique sous une forme générique.

5.6.3 De l'intérêt d'un modèle de planification pour améliorer les modèles économiques

Nous avons présenté dans ce manuscrit deux modèles économiques. Un modèle évaluant le prix par traitement et un modèle comparant des stratégies thérapeutiques. Ces deux modèles sont indépendants l'un de l'autre et peuvent être utilisés séparément.

La seule possibilité qui semble répondre à cette problématique d'évaluation correcte du fonctionnement d'un centre hospitalier est la création d'un modèle de planification séparé qui procède à la planification optimale des placements des patients pour leurs traitements. Cette planification doit tenir compte des contraintes techniques et médicales des séances des protocoles, ainsi que des contraintes médicales des centres de radiothérapie.

En premier lieu le modèle de planification doit représenter les capacités disponibles pour le traitement des patients dans les salles de traitement. Le modèle de planification donne une estimation du nombre de patients qui peuvent être traités dans un établissement hospitalier. Dans un deuxième temps, il est également important de tenir compte du personnel qui est employé dans les centres hospitaliers. Cela nécessite une modélisation des activités et de la prise en charge des patients au sein des établissement. De plus, en modélisant les activités au sein des établissement, nous tenons compte de la compétition entre ces derniers. La compétition est prise en compte par le modèle d'optimisation en donnant les meilleurs délais de soins pour les patients. Ceci ne peut être accompli du côté des centres, que si leur planning de prise en charge des patients est optimisé. Il est également important de ne pas oublier la politique médicale et les contraintes techniques dont le modèle de planification doit tenir compte.

Lors de la comparaison des stratégies thérapeutiques, on utilise également ce modèle de planification optimale. En effet, le prix par protocole doit tenir compte des activités et de leurs prix. Sachant que les activités consomment des ressources disponibles en fonction à horaire fixe, le modèle de planification est élaboré pour

modéliser l'utilisation optimale de ces ressources dans les meilleures conditions pour les patients . Le prix d'un protocole étant estimé avec l'aide du modèle de planification, il est alors possible de le relier au modèle des stratégies thérapeutiques. Ce dernier est utilisé pour la comparaison des stratégies entre elles et avec le prix remboursé par la sécurité sociale.

Implémentation du Prototype et Résultats

Sommaire

6.1 Généralités sur le prototype	165
6.2 Le Modèle de recrutement	168
6.2.1 Implémentation	168
6.2.2 Les diagrammes de classes	168
6.2.3 Les diagrammes de séquences	175
6.2.4 Diagramme d'états/activités du patient	176
6.2.5 Résultats et Tests	178
6.2.6 Résultats généraux de la modélisation	178
6.2.7 Tests	180
6.3 Le Modèle de planification	188
6.3.1 Implémentation	188
6.3.2 Résultats	191
6.4 Les Modèles Économiques	193
6.4.1 Implémentation du Modèle Économique	193
6.4.2 Implémentation du Modèle Médico-économique	196
6.4.3 Résultats	197
6.5 L'interface Utilisateur	199
6.6 Conclusion	204

Dans ce chapitre sont décrits l'implémentation du prototype et les résultats de la modélisation multi-agents. Les premiers résultats des tests de l'outil informatique sont présentés en fin de chaque description des modèles. Ce chapitre présente également les aspects orientés objets de la modélisation, ainsi que certains objets spécifiques.

6.1 Généralités sur le prototype

Nous présentons chaque modèle en précisant les techniques d'implémentation utilisées. On utilise le langage **Java** en utilisant les bibliothèques standards.

L'intégralité du prototype est implémentée sous le langage **Java** (version 1.6), ce qui lui permet de fonctionner sur la majorité des matériels, et systèmes d'exploitation du marché. Le langage **Java** nécessite toutefois l'installation d'une machine

virtuelle Java. En général, on fait référence à la machine virtuelle de Sun, qui déclinée en autant de versions que d'OS (Unix, Macintosh, Windows). Le prototype est utilisable après installation de cette machine virtuelle, ce qui permet de lancer le fichier JAR exécutable. L'outil informatique est modélisée d'une manière générique, ce qui permet la gestion séparée des quatre modèles qui le composent (Recrutement, Planification, Économique et Médico-économique), qui sont conçus et modélisés indépendamment. Ce procédé a permis de prendre en compte les caractéristiques particulières nécessaires au bon fonctionnement de chaque modèle et à la collaboration de l'ensemble. La collaboration est effectuée par l'échange de messages et par l'utilisation d'une base de données commune. La communication entre les modèles est assurée en utilisant la modélisation multi-agents. Nous considérons que chaque modèle est un agent, capable de fonctionner seul. De même l'outil informatique global est un agent, qui fonctionne, grâce à la collaboration des quatre modèles (section 4.4).

La description des modèles nécessite tout d'abord une présentation de l'implémentation des structures, qui sont au coeur de la modélisation. On présente en premier lieu les structures utilisées pour construire le dictionnaire de connaissances. Dans le chapitre 4 (section 4.2, page 68), nous avons présenté l'ontologie développée pour ce projet. Trois types d'ontologies sont modélisées. Chacune d'elles est spécifique au modèle utilisé. Les ontologies sont génériques, et réutilisable dans les domaines concernés. Pour chaque modèle, les données d'entrée ont été structurées hiérarchiquement dans le but de pouvoir conserver la généralité de l'ontologie. De plus, ce dictionnaire de connaissances est implémenté dans une bibliothèque indépendante de l'outil informatique. Cette séparation permet de garder la modélisation du prototype indépendante des éventuelles entrées/sorties. Par conséquent, on assure l'entrée/sortie des données tout en gardant un passage possible par l'interface graphique mise à disposition de l'utilisateur. Pour la modélisation du dictionnaire de connaissances et son implémentation, on utilise deux modules qui concernent respectivement l'implémentation XML et la validation avec la grammaire correspondante XSD. Ils garantissent la pérennité du dictionnaire. Le nombre de lignes de code pour les ontologies est d'environ 7000. L'implémentation XML concerne à la fois la lecture/écriture et la validation des données.

Le schéma qui décrit l'implémentation des classes gérant les fichiers XML est représenté de façon simplifiée sur le diagramme de classe 6.1 (page 167). La classe présentée regroupe toutes les spécificités des méthodes en rapport avec les entrées/sorties en XML. Par conséquent, les objets décrivant les données héritent de la structure. Ceci permet une utilisation automatique des méthodes pré-écrites. Ces méthodes nécessitent une adaptation aux cas particuliers. De plus, les thérapies innovantes sont caractérisées par des propriétés dont certaines sont communes et d'autres spécifiques. Ces propriétés spécifiques, qui sont parfois optionnelles sont créées dynamiquement lors de l'exécution du code binaire ("dynamique creation of objects", figure 6.1). On introduit de plus un encodage pour la sérialisation/désérialisation des objets. Tous les modèles XML de l'ontologie sont conçus de la même manière, ce qui permet, lors du rajout de nouveaux objets de faciliter l'implémentation. Les

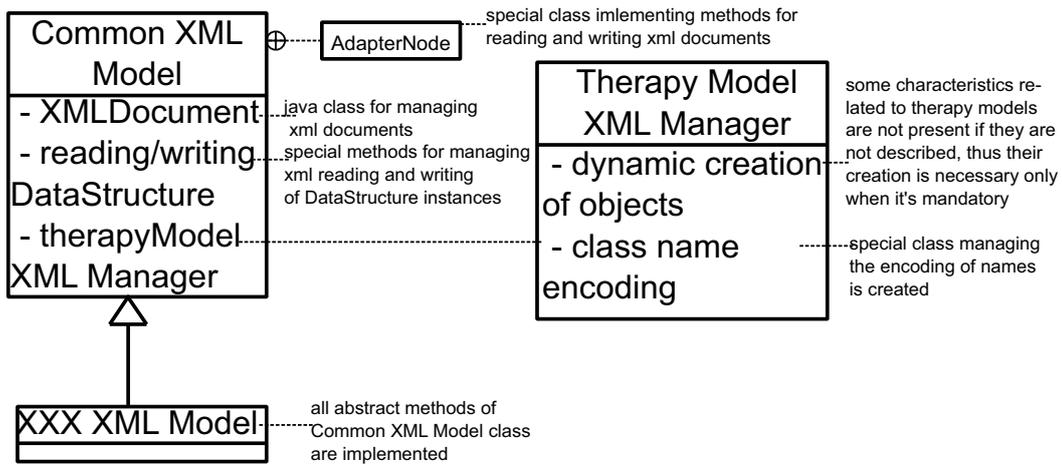


FIGURE 6.1 – Diagramme de classe pour l’implémentation des structures gérant les fichiers d’entrée/sortie XML.

méthodes exigées pour un nouvel objet sont renseignées directement en héritant du modèle commun des documents XML.

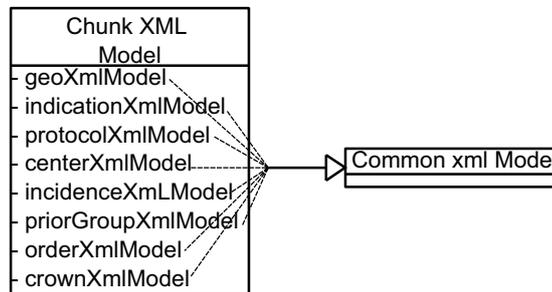


FIGURE 6.2 – Diagramme de classe pour le modèle concernant une ontologie spécifique.

Le diagramme de classe 6.2 présente l’organisation de l’implémentation des entrées/sorties correspondant à une ontologie quelconque des modèles développés. Chaque ontologie est organisée de la même manière : elle contient la description de ses modèles et l’implémentation associée. Un objet spécifique contrôle les actions (écriture/lecture/modification) à effectuer sur l’ontologie.

Dans la suite, sont exposées les relations et les activités existantes entre les agents du prototype complet. Nous présentons tout d’abord le modèle de recrutement comme le modèle général dans la gestion de l’outil informatique ensuite, le reste des modèles.

6.2 Le Modèle de recrutement

Le modèle de recrutement est celui auquel on accorde la plus grande importance. Il estime le nombre de patients en tenant compte de l'activité médicale d'un centre de radiothérapie. Ce modèle peut être également sollicité par le modèle de coût pour fournir des résultats sur le nombre de patients par protocole dans ce même centre. De plus, indirectement par le biais du modèle de coût, ce modèle peut également être utilisé pour la comparaison de stratégies. En effet, comme le modèle de coût fournit un prix par protocole, nécessaire pour l'évaluation des stratégies, le modèle de recrutement peut être indirectement lié à cette simulation. Dans le chapitre 4, nous avons décrit le procédé de modélisation du modèle de recrutement. Pour ce faire, nous avons appliqué les techniques des systèmes multi-agent. Nous modélisons le système de génération de patients, la description des centres, et la description des centres de radiothérapie. Nous avons détaillé les relations entre agents, leur hiérarchie et leur collaboration, ainsi que les buts qui les animent au sein du prototype. Les agents du modèle de recrutement sont tous dirigés par l'environnement et partagent une base de connaissances commune. Elle leur permet une communication facile et assure également la pérennité des données. De plus, par le biais de l'environnement multi-agents et des outils de vérification du dictionnaire XML, on garantit la cohérence des données exigée pour le bon fonctionnement du prototype et le déroulement correct d'une simulation.

6.2.1 Implémentation

Cette section présente l'implémentation du modèle de recrutement. Elle donne les détails de la modélisation, exprimée à l'aide de diagramme UML. Nous montrons les diagrammes de classes UML correspondant à chaque modèle, ainsi que les activités que l'agent coordinateur effectue. Les activités correspondent à la gestion des messages que les agents échangent entre eux. Ces messages font partie de la gestion globale de l'environnement multi-agents. Le modèle de recrutement comporte à environ 61 800 lignes de code.

6.2.2 Les diagrammes de classes

Dans cette section sont présentées les diagrammes de classe du modèle de recrutement. Nous donnons tout d'abord la description des diagrammes des classes des entités principales. Il s'agit des centres, des patients et des entités les décrivant.

6.2.2.1 Les patients et les centres

Les diagrammes de classes présentent les caractéristiques principales de l'implémentation des agents du modèle de recrutement, pour une modélisation générique et extensible du prototype. Nous présentons un modèle thérapeutique d'un centre de radiothérapie, qui permet de centraliser les caractéristiques communes des centres. De plus, on est en mesure d'exprimer les spécificités des centres en fonction de

la politique médicale choisie et/ou de la méthode de soins mise en avant par les thérapeutiques proposées (voir figure 6.3).

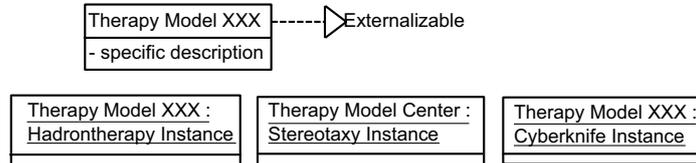


FIGURE 6.3 – Diagramme de classe d’un Modèle d’une thérapie quelconque (centre, salle de traitement ou protocole), et trois instances d’un exemple.

Le modèle thérapeutique générique. Un modèle de thérapie peut s’appliquer pour un centre de radiothérapie, pour un protocole ou pour un patient. Ce modèle de thérapie présente des caractéristiques spécifiques au type de soin correspondant. Ainsi, les thérapies par l’hadron, par la stéréotaxie ou par le cyberknife, sont des exemples possibles. Ces thérapies sont aussi bien caractéristiques d’un centre voulant les exploiter, que d’un protocole décrivant le soin qui correspond. On retrouve la thérapie dans la description du patient grâce au protocole. En effet, une fois doté d’un protocole, le patient cherche à trouver une place pour son traitement dans un centre lui correspondant. À noter qu’une thérapie peut être caractérisée par plusieurs indications à la fois, sachant qu’une indication peut être traitée avec plusieurs protocoles. Comme les protocoles ne sont pas tous décrits par la même thérapie, on peut comparer deux thérapies en termes d’efficacité dans un même centre. Sur la figure 6.3, nous avons le modèle correspondant à une thérapie quelconque et des instances possibles. Ici ne sont énumérées que trois instances. Toutefois, il reste possible de concevoir d’autres instances en suivant la hiérarchie donnée par les classes et les relations du prototype.

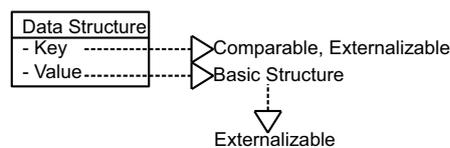


FIGURE 6.4 – Structure de données d’une classe typique du prototype.

En effet, un modèle thérapeutique doit être construit de façon suffisamment générique, pour que l’on puisse par la suite décrire tout type de thérapie. Chacun des modèles doit décrire ses caractéristiques, telles que l’utilisation de machines spécifiques et/ou de traitements particuliers selon les soins proposés au patient. Puisque qu’un centre de radiothérapie est un objet possédant les caractéristiques de son modèle thérapeutique, il s’ensuit qu’il possède toutes les spécificités du modèle de thérapie en question (à titre d’exemple voir figure 6.5, page 170). De plus, un modèle thérapeutique implémente l’interface “Externalizable” qui permet la lecture/écriture de ses données au format spécifique du logiciel.

Sur la figure 6.4 (page 169) est présentée une autre des structures importante du prototype. Il s'agit d'une "Map" ou encore d'une classe utilisant un conteneur de type clé/valeur. La clé de la map est spécifique et adaptée pour les besoins du logiciel. Dans ce but cette clé bénéficie des caractéristiques des interfaces données sur le schéma. De plus la valeur correspondante à cette clé est également conforme aux nécessités du prototype.

Le centre. Cette classe et une partie de ses attributs sont référencés sur la figure 6.5 (page 170). Un centre de radiothérapie est caractérisé par des salles de traitement. La structure d'une salle de traitement est présentée sur la même figure. Nous pouvons remarquer qu'une salle de traitement possède également des caractéristiques pouvant venir d'une thérapie particulière. Ces propriétés s'expriment en termes d'équipement spécifiques à la thérapie, non conventionnels pour les salles de traitement standard.

Le protocole et l'indication. Un protocole comporte un tronc commun et des particularités optimales, hérités du modèle de protocole thérapeutique. Ce schéma de modélisation est présenté sur la figure 6.6 (page 171). La description complète d'un patient est donnée par l'union de l'indication et du protocole, complétée par quelques détails. Le modèle utilisé par l'indication est donné sur la figure 6.7, à la page 171. Elle est représentée par les termes médicaux, ainsi qu'une urgence du traitement pouvant venir de l'état général du patient. Lors de l'implémentation nous avons utilisé la classe mère "Basic Structure" qui permet la description des objets dans un format spécifique à l'outil informatique. Cette classe est souvent utilisée dans la hiérarchie des données pour pouvoir donner plus de souplesse à la description des objets. Il s'agit de pouvoir sérialiser/désérialiser les objets. Ceci permet une création à la volée des objets à partir de leur description binaire. Les techniques de modélisation pour l'implémentation dans le prototype sont adaptées au langage Java. Nous avons modélisé les objets de manière à utiliser les spécificités de ce langage.

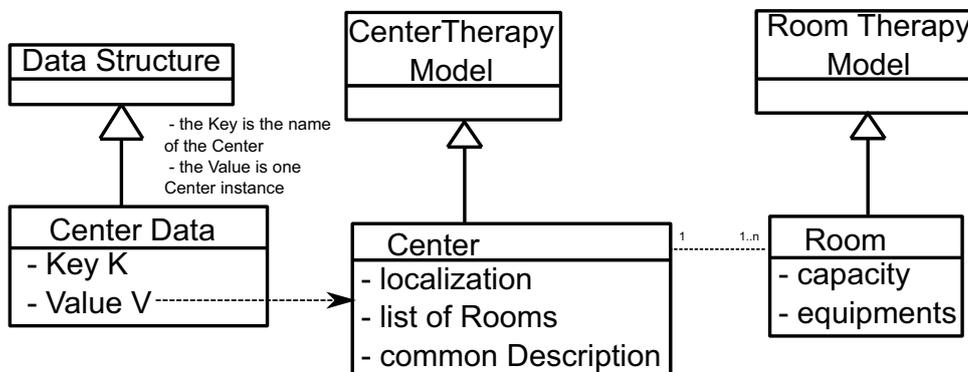


FIGURE 6.5 – Diagramme de classe du Centre

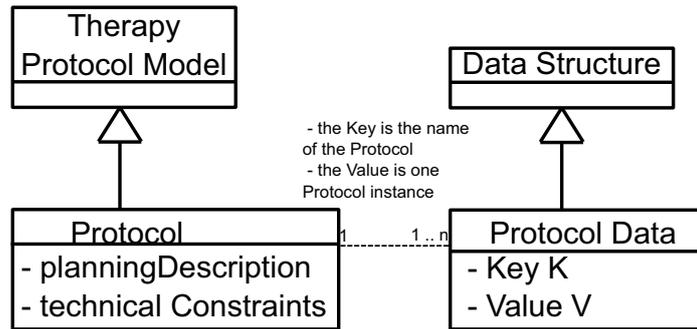


FIGURE 6.6 – Diagramme de classe du protocole avec une caractéristique de thérapie. Diagramme de classe de l’objet référençant tous les protocoles.

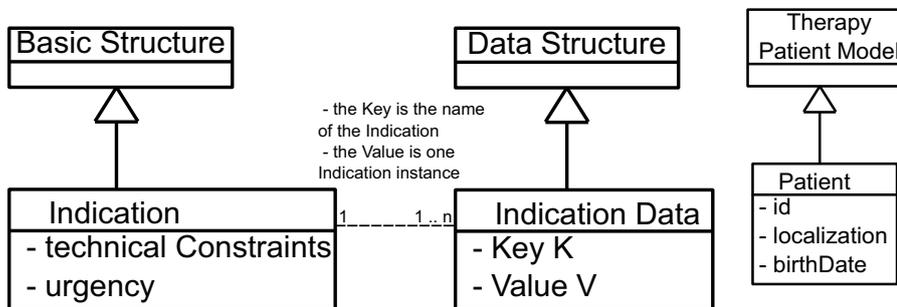


FIGURE 6.7 – Diagramme de classe d’une indication.

FIGURE 6.8 – Diagramme de classe d’un patient.

Le patient Le patient (diagramme de classe figure 6.8) est caractérisé essentiellement par son indication mais également par un identifiant unique et par une date de naissance dans la simulation. On doit rajouter à la description du patient l’indication et les protocoles de traitements. La localisation du patient est donnée par son indication en correspondance avec les données épidémiologiques. Les protocoles convenables pour le patient ne sont mémorisés dans la simulation qu’à travers une structure différente. Elle gère les naissances des patients et leurs déplacements dans la géographie, lors de la recherche des centres de traitement. Comme il a été mentionné au préalable, le gestionnaire des patients par groupe permet une gestion évitant la sauvegarde de toutes les caractéristiques du patient, et donne la possibilité de les faire apparaître en qu’objets individuels, uniquement lorsque cela devient nécessaire.

6.2.2.2 La spatialisation et le déplacement des patients

Après avoir décrit la structure correspondant aux centres et aux patients, nous pouvons maintenant introduire celle qui correspond à la géographie. Cette structure concerne également la spatialisation des centres et des patients dans le modèle de recrutement. On dispose d’une part de la géographie et d’autre part des liaisons que

la géographie a avec les patients et les centres. De plus, on précisera l'utilisation des structures permettant de faire l'ordonnancement des centres dans la géographie.

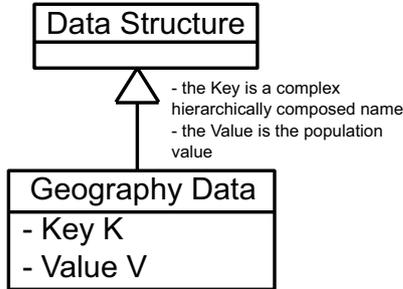


FIGURE 6.9 – Diagramme de classe de la structure de la géographie.

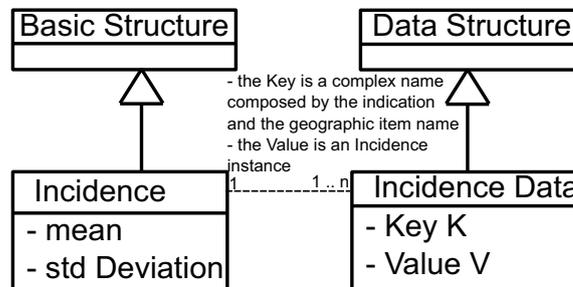


FIGURE 6.10 – Diagramme de classe de la structure d'une incidence.

La géographie. La structure de donnée de la géographie est illustrée sur la figure 6.9. Elle est basée sur l'objet générique `DataStructure`. Puisque la géographie dans cette étude est modélisée de façon hiérarchique, il en est de même pour son implémentation au niveau de sa représentation mémoire. La hiérarchie s'exprime dans la composition du nom de chaque région non décomposable de la géographie. En effet, une région non décomposable peut avoir des mères disposées plus haut qu'elle dans la hiérarchie. Dans ce cas, le nom de cette zone (Key K) est composé de la concaténation de tous les noms de ses mères, séparés par des caractères spéciaux. De cette manière, la hiérarchie de la géographie est préservée au niveau de sa structure de données.

Les incidences. Connaissant la structure de la géographie, nous pouvons présenter la structure de donnée correspondante à l'incidence d'une indication pour une zone géographique (figure 6.10). Cette structure de donnée est également basée sur une map. La clé d'entrée de la map est le nom de l'incidence, qui correspond au nom composé du nom de la zone géographique non décomposable concaténé au nom de l'indication qui est présente dans cette zone. La description d'une incidence consiste en la description de la loi de probabilité permettant de générer un nombre de patients pour la géographie présentée durant l'étude. Nous avons pris en compte les deux lois les plus utilisées pour la description (section 4.3.1).

Le groupe de priorité. Pour compléter la description du patient, il est nécessaire de construire une structure permettant la représentation de son groupe de priorité par rapport au différents protocoles pouvant être associés à son indication. Nous avons, en l'occurrence, choisi une structure contenant toutes les références nécessaires pour retrouver un groupe de priorité à partir du nom d'un protocole et d'une indication (figure 6.11, page 173). Cette structure est basée sur l'objet "Data

Structure". La clé utilisée est la composition du nom de l'indication et du nom du protocole, la valeur correspondante est la description médicale du groupe de priorité. Cette dernière consiste en le numéro du groupe de priorité et, si l'utilisateur le souhaite également le bénéfice médical, la phase clinique et le protocole référent. Un protocole est dit "référent" lorsqu'il sert de protocole standard de soin par défaut. Cela veut dire qu'avec ce protocole, seront soignés tous les patients refusant d'accepter des traitements innovants proposés au préalable, ainsi que les patients ne trouvant pas de place dans les centres participant à la simulation.

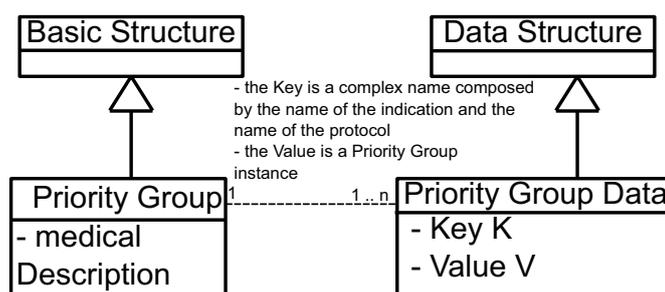


FIGURE 6.11 – Diagramme de classe de la structure d'un groupe de priorité

L'attractivité : Les couronnes. Pour compléter la description d'un patient, nous avons également besoin d'inclure l'attractivité des centres susceptibles de l'accueillir. Ceci n'est possible qu'à partir du moment où nous introduisons ce que l'on a appelé les couronnes des centres (chapitre 4, section 4.4.5.1). Ainsi, la structure de données d'une couronne est construite en héritant de l'objet de base de l'outil "Data Structure". Nous utilisons comme clé le nom du centre en le concaténant au nom de la zone géographique non décomposable. On attribue ensuite le numéro de couronne. On rappelle qu'une couronne est construite par l'union de plusieurs zones non décomposables de la géographie (voir figure 4.31, page 100). Ainsi, nous sommes en mesure de représenter la géographie par une décomposition hiérarchique qui forme des couronnes autour des centres pour exprimer l'influence de ces derniers sur les patients se trouvant à proximité (voir figure 6.13, page 174). Un rappel des couronnes est présenté sur le figure 6.12.

Nous proposons une structure d'ordonnement des centres afin de pouvoir classer les centres selon leur distance au patient et leur accessibilité en terme de transports. Les paramètres pris en compte sont ceux de la distance géographique et de l'accès aux réseaux de transport (réseaux routiers, aériens, transport en commun). La structure comporte comme les précédentes des clés et des valeurs les caractérisant. Une clé est composée par la concaténation du nom du lieu d'habitation d'un patient et du nom du centre. La valeur correspond à l'éloignement du centre par rapport au lieu d'habitation, (voir la figure 6.13).

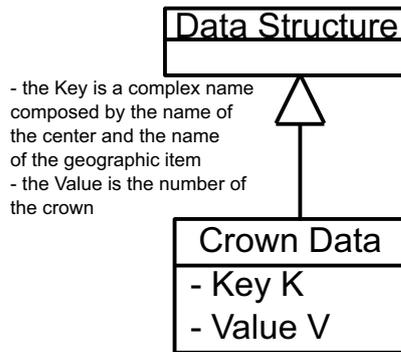


FIGURE 6.12 – Diagramme de classe de la structure des couronnes d'un centre

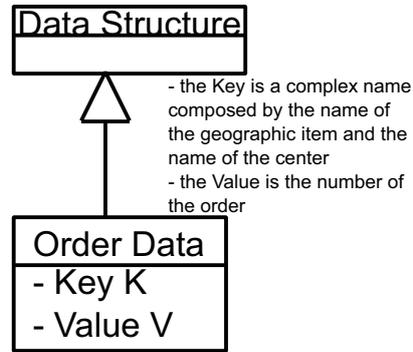


FIGURE 6.13 – Diagramme de classe pour l'ordonnement des centres par rapport aux zones géographiques.

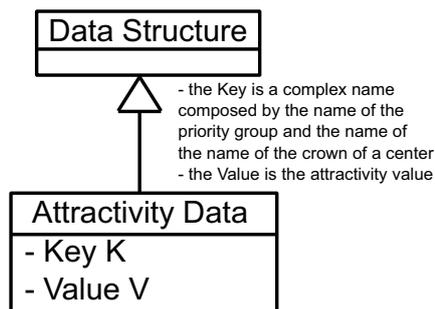


FIGURE 6.14 – Diagramme de classe de la structure de l'attractivité.

L'attractivité : Le coefficient d'attractivité. Pour décrire l'attractivité d'un centre par rapport à un patient, on introduit un coefficient d'attractivité (6.14, page 174) qui est une valeur complexe qui réunit les paramètres d'éloignement, d'accès aux soins et du bénéfice médical apporté. Ce paramètre est construit avec l'aide des experts médicaux. Il est conçu de façon à être modifié si l'on le souhaite. Ce coefficient est construit avec une structure héritant de "Data Structure". La clé comporte le numéro d'un groupe de priorité possible concaténé au numéro de la couronne d'un centre si elle existe. L'accès aux soins est ensuite rajouté par l'ordre des centres dans le processus de recherche des centres (voir le chapitre 4, section 4.4.4.5).

6.2.3 Les diagrammes de séquences

Nous présentons les diagrammes de séquences les plus importants du modèle de recrutement, à savoir le diagramme concernant le dialogue entre le patient et le centre, ainsi que la discussion entre le générateur du patient, le gestionnaire des patients et un groupe de patients quelconque.

Le premier diagramme de séquences utilisé par le prototype est celui du générateur de patients. Les patients sont générés par l'outil informatique pour chaque pas de temps, soit une semaine. Nous avons élaboré un mécanisme permettant à partir des lois des incidences des indications, de pouvoir générer à chaque pas de temps un nombre de patients malades par indication et par zone géographique non décomposable. Ainsi, le générateur de patients (figure 6.15) introduit les patients dans le système. L'agent du générateur entre en discussion avec l'agent du gestionnaire des patients. Ce dernier se charge d'organiser les patients en fonction des indications, de protocoles qui leur conviennent, et de leur lieu géographique d'origine. Ainsi, les patients organisés par groupe peuvent commencer leur recherche des traitements. Cette discussion est illustrée sur la figure 6.15. Lorsque les patients ne sont pas en mesure de trouver un traitement immédiat, le processus de recherche est répété jusqu'à ce que ces derniers aient un traitement attribué, ou qu'ils se fassent soigner en dehors du système. Les règles du processus de recherche sont celles annoncées dans le chapitre 4, section 4.4.4.5.

Pour comprendre la discussion entre un patient et un centre susceptible de le prendre pour un traitement nous proposons le diagramme de séquences 6.16. Il illustre le dialogue entre les deux agents à partir du moment où le patient a trouvé un ou plusieurs centres correspondant à ses critères. Le patient utilise alors le mécanisme de comparaison des différentes offres reçues et ensuite doit donner une réponse aux centres. En fonction de la réponse du patient, il peut être pris pour un traitement, nous pouvons voir son temps de traitement sur le schéma. Lorsque le patient est pris pour un traitement, ce dernier est effectué et puis le patient sort du système de simulation. Le patient peut également accepter une offre de liste d'attente ou bien ne pas être pris et chercher un autre traitement.

En ce qui concerne le diagramme de séquences des agents du centre, nous allons le représenter dans la section consacrée au modèle de planification. Ici nous allons

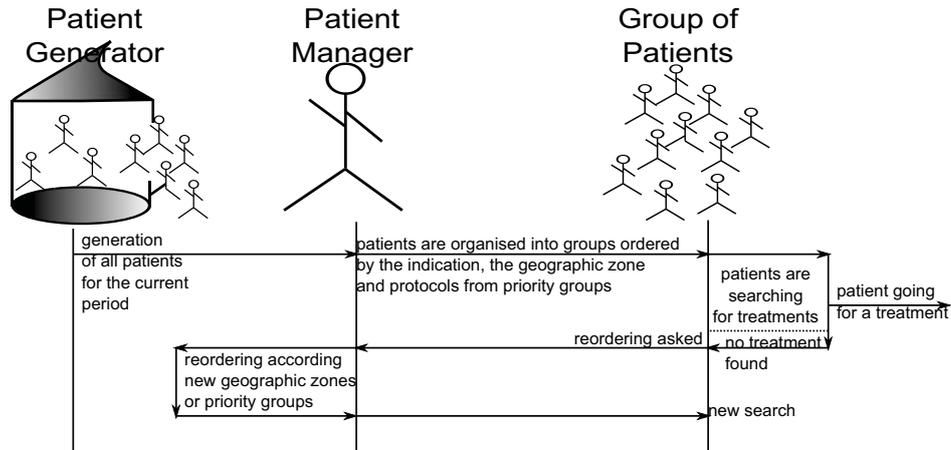


FIGURE 6.15 – Diagramme de séquences Générateur des patients, Gestionnaire par groupes des patients vs un groupe quelconque de patients.

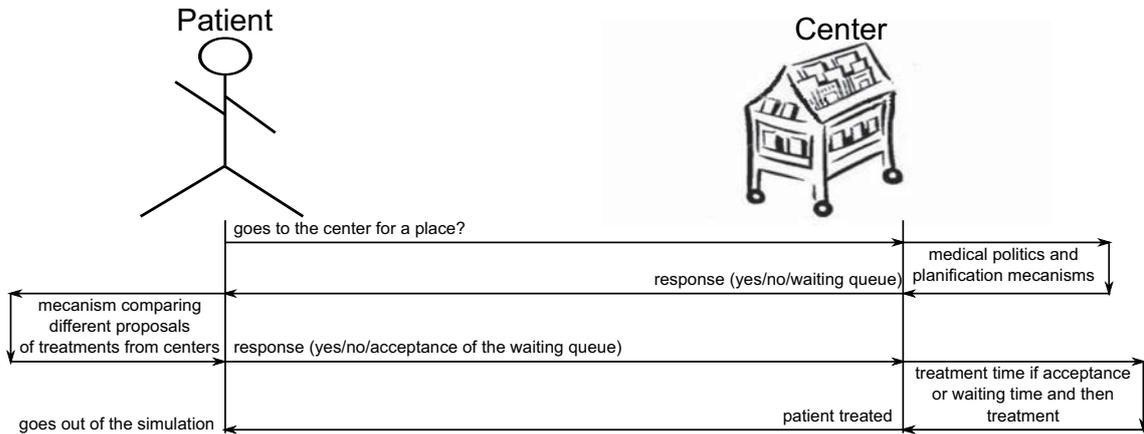


FIGURE 6.16 – Diagramme de séquences du dialogue Patient vs Centre

uniquement préciser que l’agent de la politique médicale et du modèle de planification sont en discussion avec l’agent de la liste d’attente. Cette discussion est illustrée sur la figure 6.17, (page 177). Nous représentons les agents de la politique médicale et du modèle de planification qui collaborent.

Lorsque la demande du patient arrive vers le centre, on vérifie qu’elle est conforme à la politique médicale. Si oui, le centre vérifie si une place est disponible. Par la suite la réponse (positive/négative) est retournée au patient. Lorsque la réponse est positive et que le patient accepte le traitement, ce dernier est planifié.

6.2.4 Diagramme d’états/activités du patient

Pour finir sur les états par lesquels est caractérisé le patient, on propose un diagramme de ses activités et états durant le processus de simulation (voir le schéma 6.18, page 177). Comme on l’a vu le patient est créé par un générateur, incor-

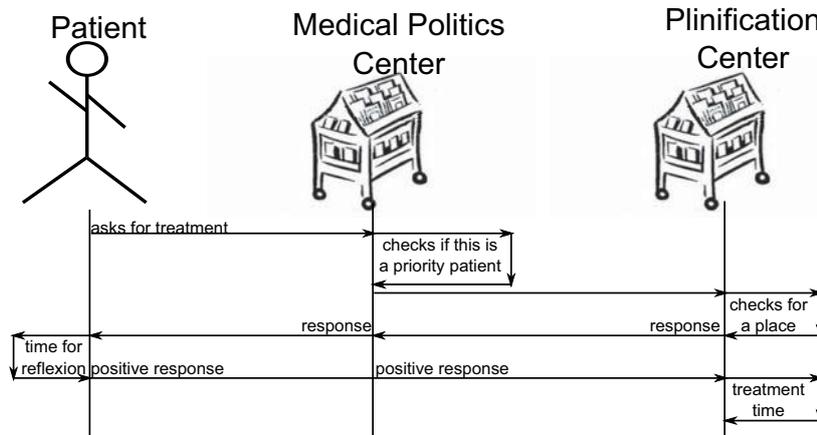


FIGURE 6.17 – Diagramme de séquences du dialogue Patient vs Centre avec la politique médicale et l’agent de planification.

poré à l’outil informatique. Après sa genèse, le patient commence la recherche des centres pouvant lui proposer un traitement. Par conséquent, il passe en état de ”demande(query)“. Le patient reste dans cet état jusqu’au moment il a trouvé un centre de traitement qui lui correspond. De plus, il arrive que le patient soit dans plusieurs états à la fois, qui caractérisent tous son mode de recherche de centres. En effet, pendant le processus de recherche des centres, le patient peut accepter une offre de liste d’attente d’un ou plusieurs centres. Cette acceptation lui permet de passer dans l’état dit "d’attente(wait)". Ce dernier état n’enlève en rien son état dit de "demande", car même lorsque le patient est en attente, il peut continuer de chercher des centres convenant à ses exigences. Lorsque le patient a trouvé son centre favori, il passe de l’état de demande (ou attente(wait)) dans l’état d’acceptation(acceptance). L’état acceptation impose une planification du traitement immédiate dans le centre de radiothérapie choisi.

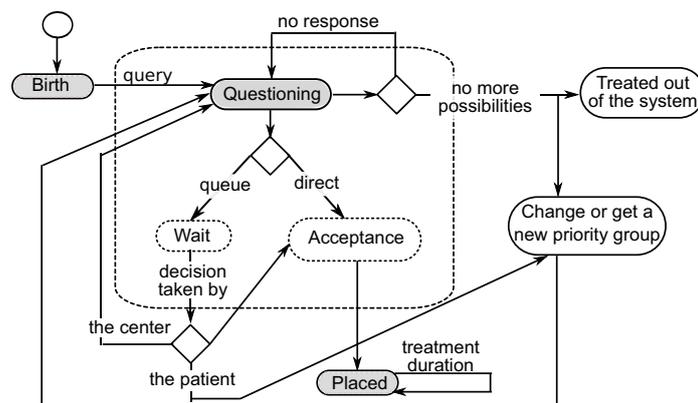


FIGURE 6.18 – Diagramme de transitions du patient.

Après le traitement, le patient est considéré comme soigné, et de ce fait, sort du

système de simulation. Lors de la recherche des centres, le patient peut effectuer un changement de son groupe de priorité qui lui permet de tenir compte d'un plus large choix de centres pouvant correspondre à ses demandes. Ce processus de changement de groupes de priorité est décrit dans le chapitre 4 à la section 4.4.4.5. Il reste un dernier état à préciser, concernant les spécificités de l'outil. Lors du processus de recherche de centre, il arrive que le patient ne soit pas en mesure de trouver un traitement. Dans ce cas précis nous avons posé l'hypothèse que ce patient est traité avec un protocole standard dans un centre de traitement non référencé par le prototype. Nous rappelons que cette hypothèse est possible car les protocoles standards, appelés encore des protocoles référents pour une indication, sont disponibles dans la plupart des centres de radiothérapie sur le territoire français. De plus, l'hypothèse a été validée par les experts médicaux. Elle est importante pour notre étude, car elle nous permet de faire le bilan sur le nombre de patients préférant les traitements usuels aux traitements innovants, donnant ainsi une meilleure vision sur la diffusion des techniques innovantes.

6.2.5 Résultats et Tests

Dans cette section sont présentés les résultats généraux de la modélisation et des tests sur le modèle de recrutement.

6.2.6 Résultats généraux de la modélisation

On présente en premier lieu la modélisation de la simulation du modèle de recrutement. Elle permet de créer un processus indépendant de l'interface graphique et des autres modèles du prototype.

Le modèle de la classe de simulation du modèle de recrutement est présenté sur la figure 6.19. C'est un diagramme de classe représentant une classe de simulation quelconque. L'objet gérant la simulation contient une référence vers les données de la simulation (DataXXX) et possède les informations sur les paramètres (params) pour constituer la méthode de simulation (setParams) et effectuer la simulation (runSim). Les modèles de recrutement, économique et médico-économique suivent la même construction pour les objets gérant leurs simulation. Le schéma 6.20 illustre le diagramme de classe du modèle des données qui est référencé dans l'objet gérant la simulation. Cet objet est sérialisable, avec des méthodes de lecture/écriture. De plus, il possède également toutes les méthodes nécessaires pour la lecture/écriture dans le format XML défini par l'ontologie construite pour le projet.

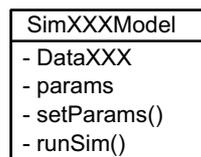


FIGURE 6.19 – Diagramme de classe de l'objet gérant la simulation pour chacun des modèles.

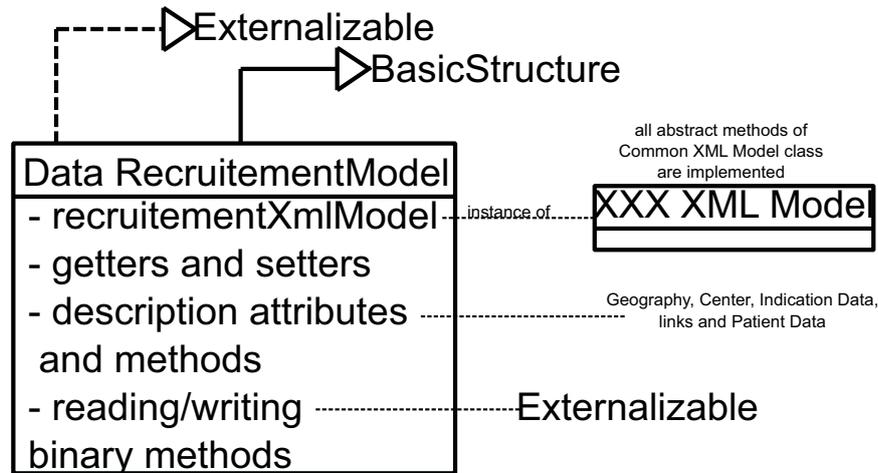


FIGURE 6.20 – Diagramme de classe de la structure gérant toutes les données d’un modèle quelconque.

Le modèle de recrutement comporte plusieurs points de vue, venant du patient et de l’hôpital, sans oublier la concurrence des établissements hospitaliers. Il s’ensuit donc que nous avons modélisé suivant les différents critères cités dans les chapitre précédents les modèles suivants :

- Les modèles médicaux des indications et des protocoles.
Les modèles des indications et des protocoles ont été élaborés suite aux discussion avec les experts médicaux. Nous tenons compte de tous les détails obligatoires pour pouvoir décrire correctement les différents états d’un patient du point de vue médical, voire psychologique. Ainsi, en implémentant un modèle concernant le protocole, nous sommes en mesure de présenter également les traitements possibles le concernant ;
- Le modèle d’un établissement hospitalier.
Le modèle d’un centre hospitalier est d’une grande importance. Il est d’autant plus difficile à modéliser qu’il se doit de rester suffisamment générique afin de s’adapter aux différents scénarios de gestion des centres hospitaliers et notamment de leur politique médicale. En effet, la politique médicale influence directement la nature et le degré de priorité des traitements dispensés par le complexe hospitalier ;
- Le modèle du patient.
Le modèle du patient repose sur la description de son indication et des traitement possibles. Nous proposons également une modélisation du comportement du patient qui est influencé par différents facteurs lors de la recherche d’un établissement susceptible de le soigner ;
- Le modèle de la concurrence.
Le modèle de la concurrence des centres de radiothérapie est mis en oeuvre conformément à leur politique médicale. De plus, nous incluons le déplacement des patients dans la géographie et leur comportement qui peut changer

en fonction de l'urgence d'un traitement. Nous utilisons la spatialisation des patients et des centres pour les situer dans une géographie décrite par l'utilisateur.

6.2.7 Tests

Nous avons testé le prototype en utilisant des données statistiques sur les incidences de certaines indications sur le territoire de la France. Nous avons pris 22 indications et 24 protocoles et le territoire français a été séparé en 23 zones géographiques non décomposables. Les indications et les protocoles utilisés dans cette étude sont listés dans les annexes. Ils sont décrits par les experts médicaux, avec le minimum de détails nécessaires pour pouvoir effectuer la simulation. Dans notre première expérience, nous comparons le recrutement des patients par trois hôpitaux. Les trois centres hospitaliers modélisent certains services en s'inspirant centres existants comme NICE, CPO de Paris et le nouvel hôpital ETOILE de Lyon. Dans le prototype, nous ne modélisons que les services concernant les nouvelles thérapies. En ce qui concerne les centres ETOILE et CPO, ils sont concurrents sur l'hadronthérapie et les techniques de traitements du cancer. Les centres de NICE, CPO et ETOILE sont concurrents sur le mélanome des yeux. L'unique service du centre de NICE soigne cette maladie. Les deux autres centres l'incluent dans leur politique médicale, mais ce n'est pas leur seule priorité. Nous proposons les résultats des simulations séparés en deux expériences. La première concerne les tableaux : 6.1 (page 181), 6.2 (page 182), 6.3 (page 183), la deuxième : les figures : 6.21 (page 184), 6.22 (page 187), 6.23 (page 186), 6.24 (page 186), 6.25 (page 187), 6.26 (page 187).

Lors de ces premiers tests du prototype, nous avons utilisé le premier modèle de planification, implémenté en JAVA et utilisant la bibliothèque GLPK (Gnu Linear Programming Kit), conçue en C++ et interfacée en JAVA. Nous avons créé un ensemble de classes utilisant cette bibliothèque pour les besoins du projet.

Cette partie de l'étude concerne le premier modèle de planification et le modèle de recrutement. Les contraintes linéaires sont modélisées et implémentées sous le format de la bibliothèque GLPK. Elles représentent les contraintes médicales à respecter par les centres. Nous proposons un modèle générique de la planification de ces derniers, tout en conservant leurs particularités de politique médicale et de fonctionnement en ce qui concerne le temps d'ouverture, la planification des plages prioritaires, ainsi que les machines utilisées. Dans les premiers tests du prototype, nous focalisons notre attention sur le test de la politique médicale et son effet sur le recrutement. Nous exposons nos résultats dans le reste de cette section.

Dans la table 6.1 (page 181) on met en concurrence les trois centres sur les 24 indications renseignées dans la base de données. La politique médicale des centres CPO et ETOILE attribue 12 % de charge au premier groupe de priorité. Les 12% sont pris sur la charge totale de tous les traitements. L'expérience porte sur les trois centres en même temps qui se concurrencent au niveau médical et pour le recrutement. Durant les trois expériences, nous augmentons cette charge lors des

expériences suivantes en donnant la à 24% dans la deuxième expérience (table 6.2, page 182) et à 42 % pour la dernière expérience (voir la table 6.3, page 183).

TABLE 6.1 – Recrutement des patients pour une année. La politique médicale vise 12% d'utilisation du planning global des centres CPO et ETOILE. La première colonne représente les groupes de priorité disponibles pour les traitements dans les centres. Les trois colonnes restantes sont doublement indexées. Elles indiquent l'urgence du traitement du patient : traitement immédiat (0_w), traitement sous 3 semaines (3_w) et traitement sous 20 semaines 20_w . Le second indice désigne le centre C (CPO), E (ETOILE) et N (NICE).

PG	0_w			3_w			20_w		
	C	E	N	C	E	N	C	E	N
1	30	1	84	35	10	97	28	11	105
2	26	19	-	24	12	-	26	23	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	23	33	-	63	115	-	125	113	-
5	11	23	-	90	132	-	0	165	-
6	-	-	-	-	-	-	70	-	-
7	140	327	-	524	797	-	477	902	-
8	-	-	-	25	50	-	31	49	-

Dans ce premier tableau, on observe, une augmentation du recrutement des centres, si l'urgence des traitements des patients est moindre. Ceci est dû au fait qu'étant donné que les patients disposent d'un temps de réflexion plus important, ils peuvent choisir sereinement un traitement qui leur convient mieux. On fait le même constat pour tous les groupes de priorité inférieure à 5. En effet, à partir du groupe cinq, on observe une légère diminution pour le recrutement lorsque l'on passe de trois semaines d'attente possible à vingt semaines. Cette diminution s'explique avec l'apparition de patients dans les groupes de priorité inférieurs. La raison étant que, plus les patients disposent de temps pour chercher un traitement, plus ils ont tendance à essayer de trouver un traitement avec un groupe de priorité inférieur. Même si ce choix ne leur apporte pas un bénéfice médical aussi important qu'un groupe de priorité meilleur, le traitement proposé peut être obtenu avec un délai d'attente sensiblement moins grand, ce qui permet aux patient un traitement plus rapide. La loi qui est utilisée lors de cette expérience est la loi d'hésitation du patient régie par le groupe de priorité et l'urgence du traitement, en mettant en concurrence les propositions de traitements des centres de radiothérapie décrits dans l'étude. Ainsi, certains des patients du groupe 5 et 7, en passant vers les groupes de priorités 6 et 8, trouvent les traitements leur convenant.

La deuxième expérience sur la politique médicale donne des résultats confirmant la première conclusion. Lors de cette deuxième simulation, le groupe de priorité 1 prend 24% de la capacité totale de traitement des centre CPO et ETOILE. Nous ne modifions pas la politique médicale de centre NICE, car il ne peut soigner qu'une seule indication, à savoir le mélanome des yeux. En effet, les centres de radiothérapie, recrutent un maximum de patients, avec le groupe de priorité mis en valeur.

TABLE 6.2 – Recrutement des patients pour une année. La politique médicale vise 24% d'utilisation du planning global des centres CPO et ETOILE. La première colonne représente les groupes de priorité disponibles pour les traitements dans les centres. Les trois colonnes restantes sont doublement indexées. Elles indiquent l'urgence du traitement du patient : traitement immédiat (0_w), traitement sous 3 semaines (3_w) et traitement sous 20 semaines 20_w . Le second indice désigne le centre C (CPO), E (ETOILE) et N (NICE).

PG	0_w			3_w			20_w		
	C	E	N	C	E	N	C	E	N
1	42	28	92	49	26	93	59	31	120
2	21	28	-	20	21	-	24	35	-
3	18	-	-	7	-	-	24	-	-
4	20	37	-	65	111	-	140	117	-
5	19	25	-	94	135	-	77	178	-
6	-	-	-	618	-	-	70	-	-
7	130	325	-	-	955	-	472	1027	-
8	-	-	-	23	44	-	29	51	-

Ainsi, l'augmentation du recrutement des patients du premier groupe de priorité est visible. Le second groupe de priorité ne suscite pas un plus grand intérêt que dans l'expérience précédente. Nous pouvons donc conclure que son recrutement est stable par rapport à la politique médicale établie. La différence avec le premier tableau présentée vient du fait que le centre de Paris CPO recrute plus de patients en groupe 6 et aucun patient en groupe 7 pour le délai d'attente de trois semaines. Les autres résultats visibles sont comparables avec la première expérience. Le recrutement sur le groupe de priorité le plus faible, à savoir le numéro 8 reste constant. Notre conclusion est donc que le comportement des patients ne change pas, malgré l'ouverture de plus de plages prioritaires dans le premier groupe de priorité. Nous devons également marquer une légère augmentation du recrutement du centre NICE, mais qui ne perturbe pas le fonctionnement de la politique médicale des deux autres centres décrits sur le territoire français.

Lors de la troisième expérience, nous augmentons les plages prioritaires du groupe 1 à 42% de la capacité totale pour chacun des centres CPO et ETOILE. Le troisième centre, NICE, respecte toujours les mêmes contraintes que précédemment. Nous observons lors de cette étude que les résultats de recrutement des patients du groupe de priorité le plus important suivant la politique médicale se confirment. En effet, le premier groupe de priorité respecte l'augmentation du recrutement attendue. Ce recrutement reste toutefois stable lorsque le délai d'attente des patients augmente. Cela confirme la politique médicale choisie par les centres de traitements, à savoir de mettre en avant les groupes de priorité de bénéfice médical important. Nous observons également une disparition des patients ayant préféré un groupe de priorité 6, ce qui ne pose pas de problèmes au niveau du recrutement, car ces derniers sont soignés avec un groupe de priorité 5.

En faisant un résumé sur les trois expériences portant sur la politique médicale

TABLE 6.3 – Recrutement des patients pour une année. La politique médicale vise 42% d'utilisation du planning global des centres CPO et ETOILE. La première colonne représente les groupes de priorité disponibles pour les traitements dans les centres. Les trois colonnes restantes sont doublement indexées. Elles indiquent l'urgence du traitement du patient : traitement immédiat (0_w), traitement sous 3 semaines (3_w) et traitement sous 20 semaines 20_w . Le second indice exprime le centre C (CPO), E (ETOILE) et N (NICE).

PG	0_w			3_w			20_w		
	C	E	N	C	E	N	C	E	N
1	50	43	95	49	42	105	47	34	117
2	42	46	-	42	47	-	49	61	-
3	20	-	-	18	-	-	27	-	-
4	24	76	-	63	123	-	127	138	-
5	12	22	-	87	153	-	97	160	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	152	368	-	607	917	-	522	1151	-
8	-	-	-	22	41	-	27	51	-

des centres et leur concurrence, nous pouvons observer un recrutement en progrès lorsqu'on augmente la capacité totale de traitement du groupe de priorité 1. Ainsi, nous évaluons les conséquences de la politique médicale. Nous pouvons comparer nos résultats avec ceux de [Pommier 2005]. Dans cette version du prototype, nous tenons compte de plus de contraintes au niveau du fonctionnement des centres de radiothérapie et de leur gestion de la politique médicale. Ceci permet une mise en valeur des techniques innovantes en proposant une description générique, convenable non seulement pour l'hadronthérapie, mais également pour les autres techniques nouvelles et non encore évaluées.

Dans les graphiques suivants nous expérimentons la robustesse de notre premier modèle de planification. Nous voulons tester la planification des traitements, ainsi que le temps non utilisé après affectation des salles de traitements. Nous menons des expériences sur les trois centres de traitements français décrits précédemment. Notre simulation porte sur un an de fonctionnement des trois centres en parallèle mis en concurrence.

Cette politique médicale est donnée par les experts médicaux. En utilisant ces paramètres, nous allons commenter les résultats des six figures suivantes (6.21, 6.22, 6.23, 6.24, 6.25 et 6.26) pour les trois centres.

Notre première expérience compare la moyenne du temps non planifié dans les salles de traitements du centre CPO de Paris, avec un délai d'attente pour le patient avant le traitement possible de 0, 3 ou 20 semaines (voir le graphe 6.21, page 184). Ce graphique illustre une diminution du temps non planifié moyen qui diminue avec l'augmentation du temps d'attente disponible avant le traitement du patient. C'est un comportement du modèle de planification tout à fait logique, car en ayant un nombre de patients plus important à planifier, il optimise mieux le placement de leur traitements. Ainsi, nous observons une durée de 300 à 400 minutes

non utilisées par jour en moyenne pour une urgence de traitement répondant à un traitement immédiat, qui baisse jusqu'aux valeurs de 20 à 50 minutes par jour. Cette distribution du temps libre dans les salles de traitement est observée avec une planification des séances sous les contraintes suivantes :

- Tous les protocoles sont organisés de la même manière et ceci pour les trois centres.
- Un protocole est découpé en 10 séances. Le délai à respecter entre les séances est fixé entre 1 jour au minimum et 3 jours au maximum.
- Le temps global dont dispose le centre pour planifier chaque traitement d'un patient reçu est de 20 jours.

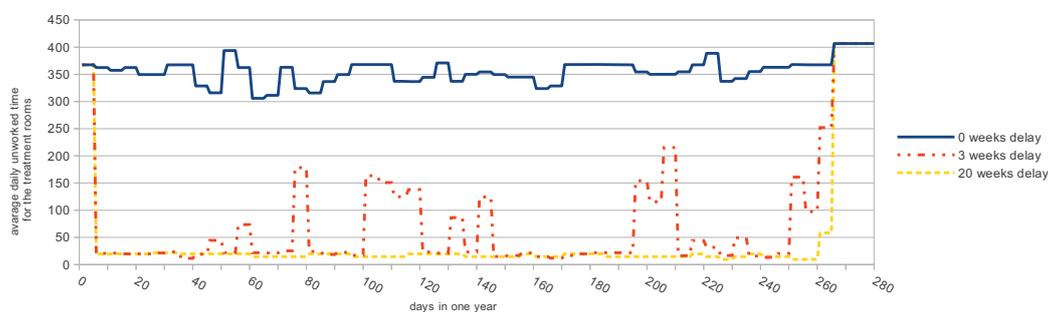


FIGURE 6.21 – Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre C (CPO), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 3 jours, pour une répartition du traitement sur 20 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l'urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.

Nous avons mené une deuxième expérience pour tester la planification de ce centre en fixant les paramètres suivants pour les protocoles (voir figure 6.22, page 185).

- Les protocoles sont organisés de la même manière pour les trois centres.
- Un protocole est découpé en 10 séances. Le délai à respecter entre les séances est fixé entre 1 jour au minimum et 7 jours au maximum.
- Le temps global dont dispose le centre pour planifier chaque traitement d'un patient reçu est de 40 jours.

Avec ces nouvelles contraintes, nous observons une planification des séances de traitements plus dense. Ceci permet une diminution du temps non utilisé au niveau des trois salles de traitement du centre CPO. Dans ces conditions nous pouvons confirmer une planification optimale des séances et donc un délai optimal d'attente des patients, qu'ils soient en liste d'attente ou reçus immédiatement. Il s'ensuit que la politique médicale est efficace pour les contraintes fixées.

Nous reprenons les mêmes données pour les expériences faites concernant le centre de traitement de Lyon, ETOILE. Les résultats obtenus sont exposés sur les

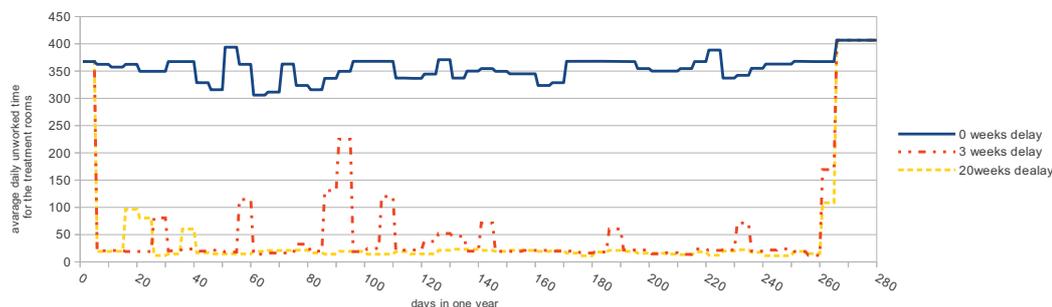


FIGURE 6.22 – Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre C (CPO), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 7 jours, pour une répartition du traitement sur 40 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l’urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.

graphes 6.23 et 6.24. Nous rappelons que les simulations permettant de construire ces graphes sont établies en testant la concurrence des trois centres simultanément. Ceci signifie que certains patients expriment des demandes en même temps vers les trois centres. À noter, que les centres CPO et ETOILE sont en concurrence directe pour une partie des traitements. Ainsi, lorsque les traitements décrits par les protocoles sont disposés sur 20 jours et avec un espacement entre les séances de 1 à 3 jours, nous observons les résultats sur le tableau 6.23. La diminution du temps non planifié apparaît clairement lorsque l’on compare pour ce centre les courbes entre les délais d’attente de 0 semaine et de 3/20 semaines. Les deux dernières courbes sont quasiment confondues. La comparaison des valeurs moyennes montre que la politique médicale du centre ETOILE est plus efficace que celle du centre CPO dans les mêmes conditions de recrutement. Ce qui ne peut que confirmer le choix d’emplacement et de construction du centre ETOILE et les décisions concernant sa politique médicale.

Sur le deuxième graphe 6.24 concernant ce centre, les résultats de temps moyen non utilisé dans les salles de traitement sont confirmés. En effet, comme la politique médicale est bien établie, la planification ne fait que répondre à la demande des patients. La fluctuation du temps non planifié pour un délai de 3 semaines est petite, ce qui prouve la stabilité au niveau de l’optimisation du placement des séances des patients. Les résultats sont comparables aux précédents compte tenu des délais d’urgence des traitements des patients.

Les deux derniers graphes concernent le recrutement du centre de NICE. Ces graphiques sont obtenus à partir des mêmes études décrites précédemment. Nous reprenons les mêmes contraintes pour le placement des séances des protocoles et de fonctionnement des centre durant un an. À noter, que le centre de NICE ne dispose que d’une seule salle de traitement, et uniquement pour le soin du méla-

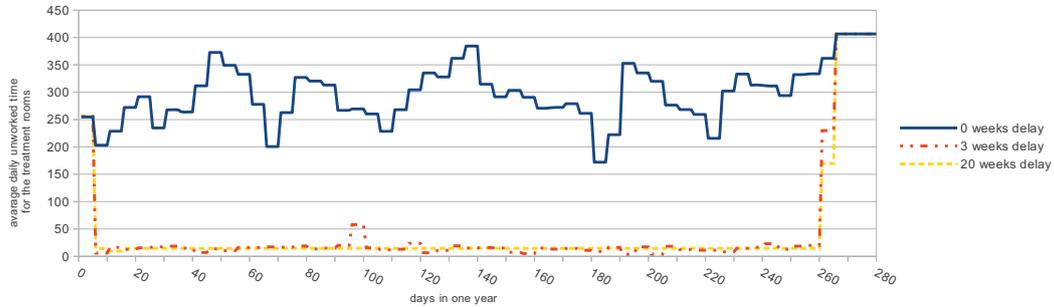


FIGURE 6.23 – Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre E (ETOILE), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 3 jours, pour une répartition du traitement sur 20 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l’urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.

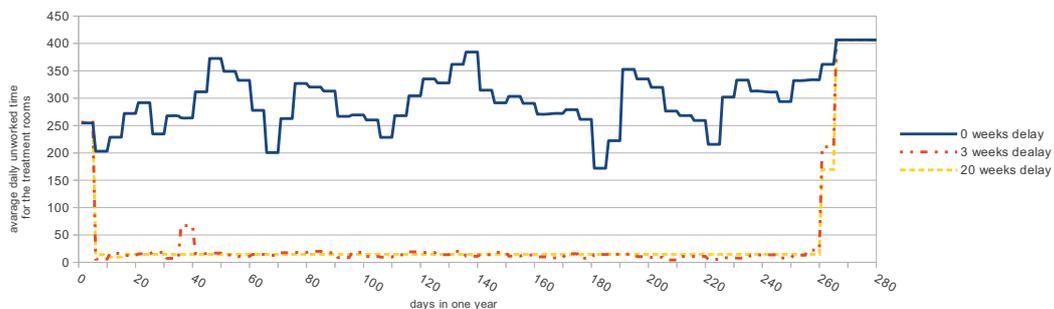


FIGURE 6.24 – Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre E (ETOILE), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 7 jours, pour une répartition du traitement sur 40 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l’urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.

nome. Ainsi, les résultats du recrutement du centre de NICE sont comparables aux résultats des autres centres. Sur les deux graphes 6.25 et 6.26, les courbes sont très proches. Ces résultats sont expliqués par les conditions fixées de fonctionnement de ce centre. Néanmoins, sa participation à la simulation est importante pour exprimer la concurrence sur le territoire français en terme de thérapeutique innovantes.

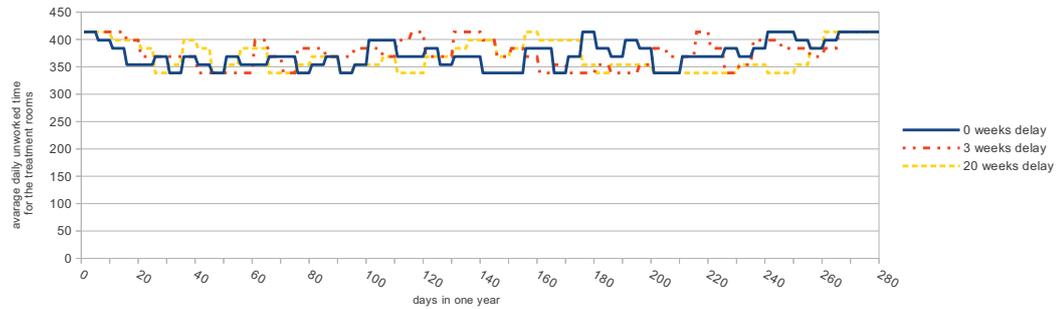


FIGURE 6.25 – Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre N (NICE), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 3 jours, pour une répartition du traitement sur 20 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l’urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.

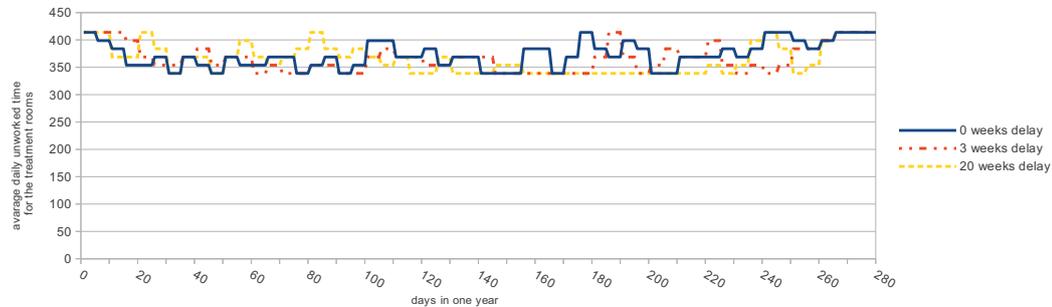


FIGURE 6.26 – Temps journalier non utilisé moyen pour les salles de traitement du centre N (NICE), par jour. La durée de la simulation est de un an. Le temps maximal entre les séances des protocoles est au minimum de 1 jour et au maximum de 7 jours, pour une répartition du traitement sur 40 jours au max. Les courbes sont ordonnées en fonction de l’urgence du traitement du patient. 0, 3 ou 20 de délai de traitement après la genèse du patient.

Avec l’étude menée sur le modèle de recrutement, nous testons les hypothèses établies sur la concurrence des centres hospitaliers. Ceci impose leur spatialisation au préalable et leur modélisation, de manière à pouvoir tenir compte des spécialités dans un contexte de compétition. Ainsi, nous pouvons tester différents scénarios de

politique médicale, permettant de confirmer le bien-fondé de la modélisation proposée. De plus, nous testons à la fois la modélisation et l'implémentation du modèle de planification. Ce dernier constitue une partie tout à fait indépendante, mais indispensable au bon fonctionnement des centres de radiothérapie. Les résultats obtenus sont encourageants.

6.3 Le Modèle de planification

Le modèle de planification est un modèle qui contribue au bon déroulement de la simulation du modèle de recrutement. En effet, comme cela a été mentionné au préalable, le modèle de planification sert à modéliser et optimiser les services nécessaires pour le fonctionnement de l'hôpital, lors de la prise en charge des traitements des patients. Les traitements des patients sont décrits par des protocoles. Lorsque la description de ces derniers est suffisamment complète, nous proposons une planification des séances de traitement en fonction des contraintes décrites et des exigences du patient. À titre informatif, le nombre de ligne de code de ce modèle est de l'ordre de 3600.

6.3.1 Implémentation

Dans cette section, nous présentons la modélisation adoptée pour les protocoles et son utilisation pour la planification des séances de traitements des patients acceptés dans un centre de radiothérapie. Les patients acceptés sont pris sous conditions d'adhérer à la politique médicale de l'établissement ou de pouvoir s'insérer dans le reste des places disponibles. De plus, lorsqu'un patient est accepté dans un hôpital, le centre doit pouvoir respecter les contraintes imposées par le patient. Il s'agit, en l'occurrence, d'une éventuelle urgence précisée par l'indication du patient.

L'implémentation du modèle de planification nécessite tout d'abord de décrire le protocole. Nous avons posé l'hypothèse, en accord avec les spécialistes médicaux, qu'un protocole est une suite de séances de traitement. Nous avons utilisé l'encodage RLE (Run Length ENcoding) [Miller 2010]. En utilisant cette implémentation, nous sommes en mesure de tenir compte de la description spécifique d'un protocole, notamment les espacements entre les séances et la disposition totale du traitement sur une plage de temps précise. Ces deux contraintes dépendent totalement du protocole. De plus, nous devons rajouter une contrainte temporelle, venant de l'indication et traduisant l'urgence du traitement, obligeant le patient à trouver un soin avant une date précise. Avec ces conditions, le protocole le traitement du patient est modélisé comme indiqué sur la figure 6.27, page 189.

Ce schéma illustre que les contraintes de traitement imposées sont lâches en respectant les périodes de temps fixées entre les séances, ainsi la date au plus tard du début de traitement.

Puisqu'on a besoin de planifier avec précision les dates des traitements et des séances des patients, nous proposons également une structure référençant les dates

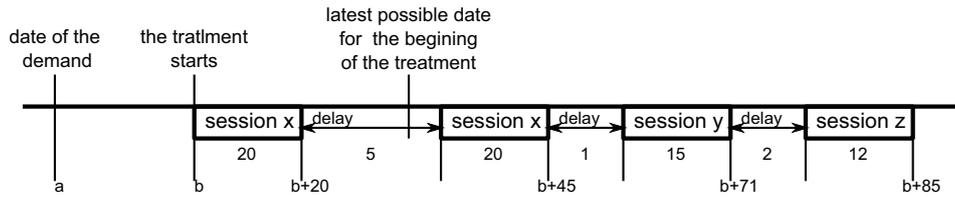


FIGURE 6.27 – Modélisation de la répartition des séances du traitement d’un patient et suivant les contraintes médicales.

de la simulation pour le fonctionnement des centres de radiothérapie. En effet, la structure d’une date est la suivante (voir figure 6.28).

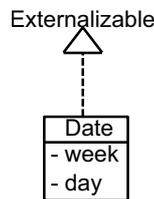


FIGURE 6.28 – Structure d’une date pour le planning des centres de traitement.

Nous utilisons les dates pour pouvoir proposer un planning pour les centres de radiothérapie, respectant les contraintes médicales de traitement, ainsi que la politique médicale.

En utilisant la méthode d’implémentation et les structures de modélisation expliquées au préalable, nous avons élaboré une structure hiérarchique pour l’implémentation d’un planning de centre de radiothérapie. Sa modélisation avec un diagramme de classe est représentée sur la figure 6.29. Cette structure contient une instance d’un solveur linéaire permettant de faire appel à une bibliothèque de programmation linéaire. La bibliothèque que nous avons utilisée est incluse dans les fichiers sources du prototype, il s’agit de GLPK. Dans les futures versions de l’outil informatique ce solveur peut être remplacé par un autre correspondant aux exigences de la planification demandée.

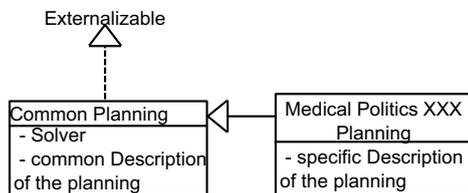


FIGURE 6.29 – Diagramme de classe pour la politique médicale et structure commune d’un planning.

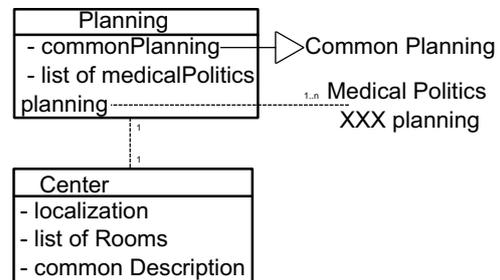


FIGURE 6.30 – Diagramme de classe de la structure d’un planning.

Sur le diagramme de classe 6.29, nous pouvons également voir que le planning

implémentant la politique médicale et ses spécificités hérite de la structure commune d'un planning. Ceci est inévitable à partir du moment où l'on doit programmer des séances dans des plages bien précises pour un centre hospitalier et respecter de plus des contraintes de traitements. Enfin, la figure 6.30 (page 189) donne le diagramme de classe d'un centre quelconque qui possède obligatoirement un planning, mais également une liste de plannings correspondant au différentes contraintes que la politique médicale peut imposer.

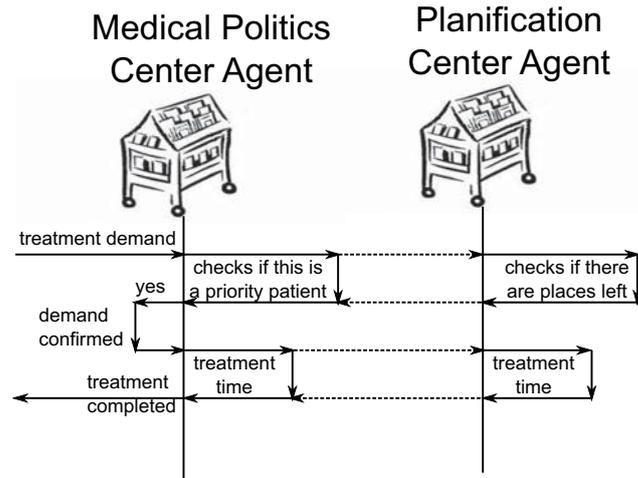


FIGURE 6.31 – Diagramme de séquences entre l'agent de la politique médicale et l'agent de planification.

Pour résumer l'implémentation du modèle de planification on présente le diagramme de séquence 6.31 décrivant la discussion entre l'agent de la politique médicale et l'agent de planification. Lorsque le patient demande un traitement à un centre hospitalier, ce dernier utilise l'agent de la politique médicale et l'agent de la planification pour répondre. La discussion entre le patient et le centre se déroule de la manière suivante :

1. La demande arrive au centre et la discussion débute ;
2. L'agent de la politique médicale vérifie si le patient fait partie des patients prioritaires. Si tel est le cas, l'agent de la politique médicale utilise le planificateur dont il dispose pour vérifier si une place est disponible. Lorsque le patient ne fait pas partie de la politique médicale, le planificateur est utilisé pour chercher une place dans le planning destiné aux patients non prioritaires (voir figure 6.31) ;
3. Lorsque la vérification a eu lieu, une réponse est retournée au patient ;
4. Le patient évalue alors toutes les réponses qu'il a reçues et prend une décision en fonction des contraintes médicales de son traitement et de son état de santé global ;
5. Enfin, en fonction de la réponse du patient, le patient est traité, si une place est disponible et que le patient a confirmé son souhait de traitement. Le

traitement du patient est planifié en fonction de ses caractéristiques, à savoir sur les plages prioritaires si le patient fait partie de la politique médicale ou sur les plages destinées aux patients non prioritaires sinon ;

6. Lorsque le traitement du patient a eu lieu, le patient sort du système de simulation.

6.3.2 Résultats

Nous avons fait des tests avec le modèle de planification en implémentant les contraintes linéaires avec le logiciel commercial, `Cplex`. Il s'agit des contraintes caractérisant le troisième modèle de planification. Les données sur lesquelles le modèle linéaire est testé sont artificiellement créées. Le but est de construire un modèle tenant compte des capacités du personnel.

Notre programme a été testé sur un centre de traitement avec six patients. Le centre est caractérisé par trois salles de traitement et une politique médicale qui classe les patients par ordre de priorité. Notre jeu de données est composé de quatre indications et quatre protocoles. Les caractéristiques suivantes précisent les contraintes de traitement des patients. Les indications sont attribuées pour les patients comme suit :

TABLE 6.4 – Indications associées aux patients

numéro indication	1	2	3	4
numéro patient(s)	1,2	3	4	5,6

Le temps maximal autorisé avant le début de chaque traitement est dépendant de l'indication. Ce paramètre pouvant être bloquant en fonction de l'urgence de traitement, nous lui donnons une valeur suffisamment grande pour pouvoir tester le placement des séances. La répartition des protocoles suivant les indications est fournie ci après :

TABLE 6.5 – Protocoles associés aux indications.

numéro indication	1	2	3	4
numéro(s) protocoles(s)	1	1,4	3	3,4

Chaque protocole est caractérisé par trois séances. Entre les séances des protocoles nous avons un délai minimum de 2 périodes de temps et un délai maximum de 6 périodes. Un protocole doit être obligatoirement disposé sur au plus 200 périodes de temps. La durée des séances de chaque protocole est donnée dans le tableau 6.6 (page 192).

Les résultats de l'optimisation sont visibles sur le tableau 6.7 (page 192), ainsi que la figure 6.32 (page 193).

TABLE 6.6 – Durée des séances des protocoles.

numéro protocole/ durée de la séance (minutes)	1	2	3
1	18	25	31
2	19	27	25
3	17	26	14
4	15	30	25

Nous observons une attribution des protocoles des patients (Tableau 6.7) qui correspond à la disponibilité des salles des centres en terme de temps de traitement. En effet, l'indication décrivant un patient donne la possibilité de choisir parmi plusieurs protocoles. Le protocole choisi est celui qui satisfait les contraintes des centres, en fonctions du temps de traitement disponible, et des machines à utiliser. Les machines à utiliser sont présentées comme des contraintes techniques dans la description des protocoles. Ainsi, nous observons que les patients 3, 5, et 6 ont été soignés par le protocole satisfaisant le mieux les contraintes de temps disponible, dans les salles de traitements. Les autres patients ne peuvent être soignés qu'avec un seul protocole, ce qui limite la possibilité d'optimisation des ressources. Les salles de traitements sont également disponibles pour tout type de traitement, ce qui permet d'effectuer les séances d'un patient dans plusieurs salles. C'est le cas pour la prise en charge des patients 3 et 5. Ainsi, nous observons une optimisation d'utilisation des salles de traitements et la prise en charge optimale des patients.

TABLE 6.7 – Résultat des tests du modèle de planification.

patient numéro	1	2	3	4	5	6
indication numéro	1	1	2	3	4	4
numéro protocole	1	1	4	3	3	4
salle(s) des séances	3	1	1 & 2	2	1 & 2	3

Le placement des séances dans le temps pour les trois salles de traitement est illustré sur la figure 6.32. Le diagramme de Gantt montre, également, que les écarts entre les séances de traitement des patients sont respectés. En effet, nous avons fixé à l'aide de paramètres ces écarts, entre les valeurs 2 et 6. Prenons l'exemple du patient 3 qui est soigné dans deux salles différentes, pour la totalité de son traitement. Il est traité avec le protocole numéro 4. Sa première séance, effectuée dans la salle 2, commence à la date 0 et se finit à la date 15. L'écart entre les deux premières séances est de 2, qui est en effet la valeur minimale. La seconde séance dure 30 unités de temps, elle se finit à la date 47. La troisième séance est effectuée dans la salle 1, elle commence à la date 50. Ces données donnent un écart de 3 entre les deux dernières séances.

Sur le diagramme de Gantt, on observe un placement optimal pour tous les patients du système. Nous pouvons voir que les salles de traitement sont utilisées

FIGURE 6.32 – Diagramme de Gantt pour le placement des séances des patients.

d'une manière optimale en nombre de patients. Ainsi, le placement des séances pour un patient n'est pas figé dans une seule salle de traitement et de plus respecte les contraintes médicales et techniques des protocoles.

6.4 Les Modèles Économiques

Les modèles économiques sont décrits dans le chapitre 5. Ils représentent une partie importante de la modélisation du prototype. En effet, c'est en les utilisant que l'utilisateur peut estimer l'efficacité d'un centre de radiothérapie. Dans cette section sont détaillées les diagrammes de classes les concernant. Nous présentons une description globale des modèles économiques. Le nombre de lignes de codes correspondant est respectivement d'environ 4700 pour le modèle économique et 1700 pour le modèle médico-économique.

6.4.1 Implémentation du Modèle Économique

L'implémentation concernant le modèle économique contient la création d'une structure spécifique pour la description des éléments de coûts. Compte tenu des calculs des coûts, il est nécessaire de représenter l'élément donnant la répartition entre la phase de préparation et la phase d'irradiation lors de la prise en charge du patient. La structure "DistributionKey" permet de renseigner la partie correspondante à la phase de préparation/irradiation (voir figure 6.33, page 194). De cette manière, lorsqu'on décrit un bien que l'hôpital utilise pour les soins des patients, il est indispensable de renseigner sa contribution à chacune des deux phases. En conséquence, les articles qui sont utilisés par les centres hospitaliers lors de la réalisation des protocoles sont des instances de cette structure. Un article quelconque est désigné dans la figure 6.33 par le nom "CostItemXXX". Ainsi, chaque item entrant dans le calcul de coût est caractérisé par sa clé de répartition obligatoire.

Sur la figure 6.34 est présentée la description du diagramme de classe d'un centre de radiothérapie avec les éléments du modèle de coût puis la structure servant de

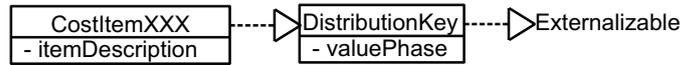


FIGURE 6.33 – Diagramme de classe de la clé de répartition et d'un item du modèle de coût.

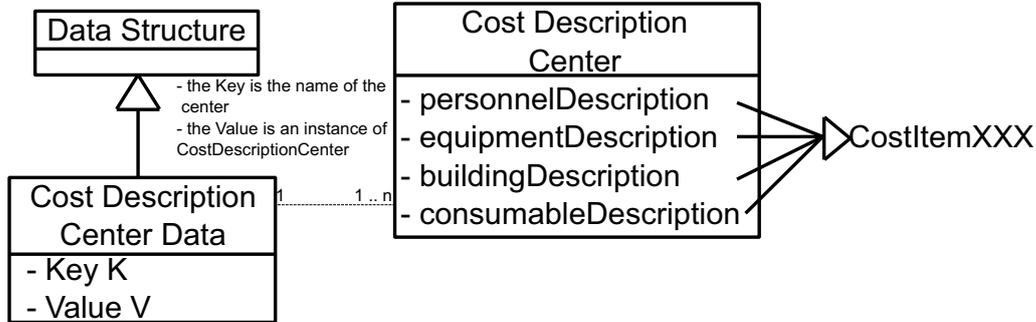


FIGURE 6.34 – Diagramme de classe pour le centre et l'objet contenant tous les centres. Modèle de coût.

dictionnaire avec la description de tous les centres. Ainsi, nous décrivons un centre de la manière suivante :

- Le personnel.

On détail le personnel médical et non médical. Chaque personnel doit faire correspondre son temps entre la phase de préparation et la phase d'irradiation lorsque cela est nécessaire. Pour le personnel qui n'intervient pas directement auprès du patient, cette caractéristique n'est pas nécessaire ;

- Les équipements.

En ce qui concerne les équipements, ils sont renseignés par leur prix et leur utilisation durant les séances de traitements. Il s'agit des machines installées dans locaux des centres et utilisées pour les techniques innovantes. On doit également renseigner la clé de répartition entre les deux phases du protocole pour chaque équipement ;

- Les bâtiments.

La description des bâtiments est celle qui correspond à leur utilisation durant les séances de traitement. Les bâtiments faisant partie de calcul du coût sont repérés en fonction des machines qui sont utilisées. Les bâtiments qui ne sont pas utilisés directement, pour les séances de traitement sont dénommés des locaux généraux. Les locaux généraux ne sont pas décrits par une clé de répartition ;

- Les consommables.

Les consommables sont décrits de la même manière que les reste des items concernant le modèle de coût. Lorsque cela est nécessaire, il faut renseigner la clé de répartition correspondante.

Les éléments du centre étant décrits, on peut présenter les structures créées pour le protocoles. En effet, lors de son fonctionnement, le centre utilise des protocoles.

Ces derniers consomment les ressources décrites dans le centre en quantité limitées et suivant les disponibilités.

De la même manière que pour le centre, nous avons créé un item générique avec lequel on peut décrire le protocole. Cet item générique est illustré avec son diagramme de classe sur la figure 6.35. Il porte le nom "CostItemProtocolXXX" et contient comme attribut une liste ordonnée avec des clés contenant des items de même type.

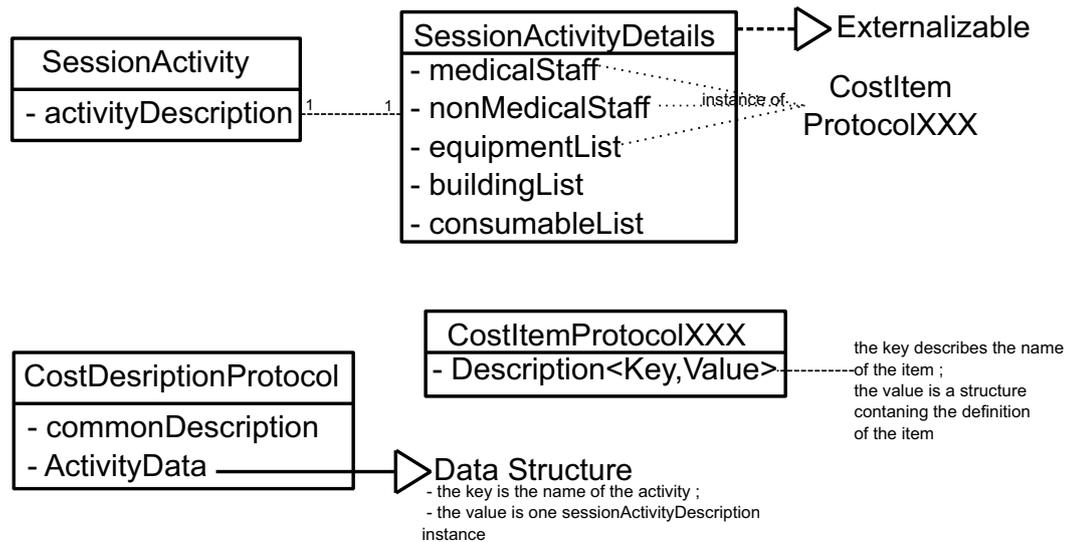


FIGURE 6.35 – Diagramme de classes pour la construction du protocole et le modèle de coût.

Lors de la description des actes effectués dans l'établissement hospitalier, nous avons décidé de représenter une séance d'un protocole comme une suite d'activités. Ainsi, une activité qui est effectuée suscite l'emploi de plusieurs items comme :

- Le personnel médical.
Le personnel médical renseigné l'est uniquement par son nom et par la durée durant laquelle il intervient. Une structure instance de "CostItemProtocolXXX" décrit la liste du personnel médical qui intervient lors d'un protocole ;
- Le personnel non médical.
Le personnel non médical est décrit de la même manière que le personnel médical dans une instance de la structure "CostItemProtocolXXX" ;
- la liste des équipements utilisés.
Les équipements utilisés sont décrits avec le même principe que le personnel.
- La liste des bâtiments occupés.
En ce qui concerne les bâtiments occupés, ils sont uniquement mémorisés sous la forme de liste. Ensuite, le calcul du coût par protocole suit la méthode annoncée dans le chapitre précédent ;
- La liste des consommables à utiliser.
Les consommables sont présents également sous la forme d'une liste qui

contient leur nom. Comme les consommables sont utilisés groupe de une ou plusieurs unités mais sont indépendants du temps de la séance du protocole, nous avons besoin uniquement de leur nom.

Enfin, le calcul du prix par protocole utilise les formules expliquées dans le chapitre précédent. Lorsqu'on doit chercher des information pour une ressource utilisée dans le protocole, nous nous servons des description de ces dernières données auprès des centres. Ce qui nous permet de déduire un prix uniquement pour le temps d'utilisation pour un protocole spécifique, lorsque cela est nécessaire.

6.4.2 Implémentation du Modèle Médico-économique

L'implémentation du modèle médico-économique repose sur les mêmes principes que précédemment. En effet, nous utilisons les structure basiques présentées précédemment pour construire les objets du modèle médico-économique. Lorsque l'on décrit la structure d'un protocole pour le modèle médico-économique, on doit mentionner pour chaque protocole s'il y a des patients qui peuvent bénéficier des soins à domicile, une thérapie effectuée obligatoirement dans un établissement hospitalier et si cette dernière a nécessité le déplacement du patient. Cette description du protocole est présentée sur la figure 6.36. Ainsi, avec cette structure une thérapie du modèle médico-économique est caractérisée par la liste des protocoles qu'elle inclut, la description commune de chaque thérapie, et la phase post-thérapeutique la concernant. La description commune regroupe les statistiques concernant cette thérapie, notamment le nombre de patients qui ont été soignés avec succès, le nombre de patients qui n'ont pas pu être soignés en utilisant cette thérapie, ainsi que le nombre de patients qui ont été suivis par la suite après un traitement avec cette thérapie. Lorsqu'on désigne la post-thérapie, on doit être capable de décrire tout le déroulement de la post-thérapie.

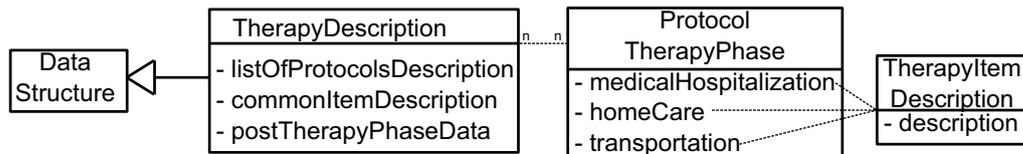


FIGURE 6.36 – Diagramme de classe d'une thérapie.

En effet, la post-thérapie représente tous les actes qui peuvent être effectués lors d'un suivi du patient ou lors d'une récurrence. Il s'agit alors de mentionner les séances du patient chez des spécialistes ou encore son suivi régulier. Lors d'une récurrence il peut également être nécessaire de représenter les appareils utilisés, les soins appliqués, ainsi que de tenir compte de leur coût. Pour ce faire, nous avons créé des structures pouvant accueillir ces données. La première des structures décrit une post-thérapie et est illustrée sur la figure 6.37. Cette structure contient tous les actes qui peuvent être effectués lors du suivi ou du soin d'un patient après une thérapie. C'est une structure ne servant qu'à décrire l'utilisation de ces derniers items. Chaque item de cet objet est lui-même un objet ordonné suivant les statistiques

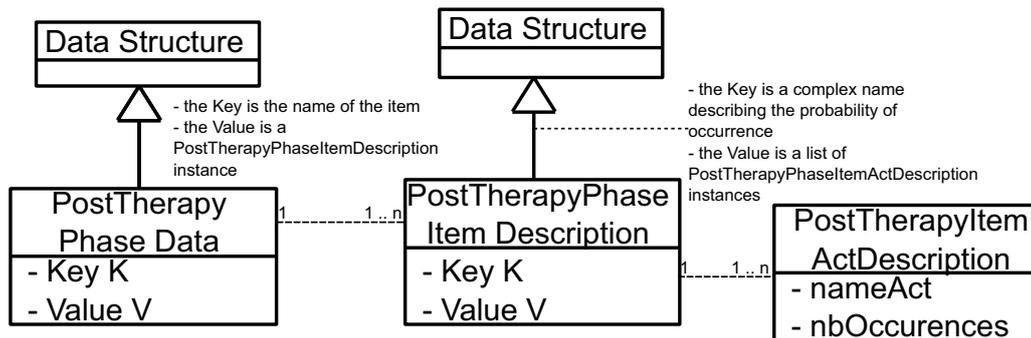


FIGURE 6.37 – Diagramme de classes de la description de la phase post-thérapeutique.

le décrivant. Il s'agit de répertorier les examens en fonctions des dates auxquelles ils peuvent survenir. On rappelle que ces actes post-thérapeutiques ont été décrits dans le chapitre précédent.

Comme nous devons également pouvoir calculer le prix de ces actes et pouvoir les comparer, nous proposons une structure les répertoriant. Cette structure permet d'ordonner les actes en fonction de leur nom et de pouvoir les caractériser par leur prix. De plus, dans cette structure nous donnons la possibilité de tenir compte des GHS (Groupes Homogène de Séjour) des actes, s'ils existent. Lorsque cela est possible et que les actes peuvent être décrits par un GHS, il reste possible de comparer ainsi le prix renseigné par le système de la sécurité sociale avec le prix calculé par l'outil informatique.

6.4.3 Résultats

Ces deux modèles économiques fournissent l'estimation du prix par protocole dans un centre de radiothérapie. Nous avons utilisé le savoir-faire médical, couplé au savoir-faire économique pour pouvoir implémenter une méthode capable d'estimer le prix des protocoles utilisés au sein d'un établissement hospitalier.

La méthode qui a été développée et implémentée calcule un prix par protocole en tenant compte des détails renseignés par les utilisateurs sur le fonctionnement du centre visé et des biens utilisés par les protocoles. En effet, on ne refuse pas de mémoriser toute l'information que l'on peut recueillir à l'aide du prototype. Ceci ne signifie pas pour autant que toute cette information sera utilisée lors de la simulation des prix. Nous avons élaboré des règles permettant de choisir, en fonction du degré de détails présent, quelle est la stratégie convenable pour estimer le prix. Ainsi, lorsque beaucoup de détails sont présents et que l'information requise est suffisante pour utiliser une méthode détaillée, nous sommes en mesure de le faire. Nous utilisons ainsi des détails tels que le nombre de minutes d'intervention des personnels pour les séances de traitement. Au contraire, lorsque nous manquons de suffisamment d'information, la méthode choisie sera celle utilisant des coûts de fonctionnement globaux. En appliquant ce mode de fonctionnement le choix

de la méthode reste transparent pour l'utilisateur. La contrainte, qui est signifiée à l'utilisateur par l'interface graphique est de fournir suffisamment d'information pour que au moins l'une des deux méthodes puisse être utilisée. Il est donc indispensable que la validation des données soit confirmée par le prototype avant que la simulation ait lieu.

Enfin, pour que le modèle de coût puisse fonctionner correctement, il est nécessaire pour le centre de thérapie en évaluation de renseigner le nombre de patients qui sont soignés durant la période choisie. Cette donnée est globale et doit être également renseignée pour chacun des protocoles concernés par l'évaluation. Pour ce faire, l'utilisateur a le choix de renseigner ces détails par lui même et avec les sources dont il dispose ou bien d'utiliser le modèle de recrutement au préalable. En effet, l'utilisation du modèle de recrutement lui permet d'estimer le nombre de patient par protocole qui peuvent être soignés avec un système de politique médicale spécifique. Il s'ensuit que, dans ce cas, le modèle de recrutement, le modèle de planification et le modèle de coût seront utilisés conjointement. Ceci oblige l'utilisateur à fournir également toutes les données pour le modèle de recrutement, sachant qu'en même temps cela lui permet de tester différents scénarios de politique médicale et de voir l'impact sur le recrutement. L'interface graphique est construite de telle manière qu'elle oblige de prendre en compte toutes les données nécessaires et demandées à l'utilisateur en fonction des modèles qui seront exécutés durant la simulation. Compte tenu des résultats attendus il est obligatoire d'utiliser le modèle de recrutement avant le modèle de coût, pour que ce dernier puisse fonctionner correctement. Néanmoins, le modèle de recrutement ne fournit que le nombre de patient par protocole et au total pour le centre, le reste des données est à la charge de l'utilisateur. Les données communes entre les deux modèles sont transmises de manière transparente pour l'utilisateur.

Le deuxième modèle économique concerne l'évaluation et la comparaison des stratégies thérapeutiques. Ces dernières sont complexes à décrire et nous proposons une méthode de découplage de l'information permettant d'appliquer les méthodes économiques connues pour leur évaluation. De la même manière que pour le modèle économique, la vérification des données est nécessaire pour s'assurer de leur complétude pour que la simulation puisse avoir lieu. La description d'une stratégie est subdivisée en fonction des différentes phases qu'elle représente. En effet, une stratégie thérapeutique est décrite par sa phase pré-thérapeutique, thérapeutique et post-thérapeutique. La première phase n'est pas présentée dans l'interface graphique mais toutefois partiellement modélisée. Les deux autres phases sont décrites en détails et permettent l'évaluation d'une stratégie en fonction des examens passés par le patient durant les soins, mais aussi lors d'un post-traitement concernant une récurrence ou une amélioration. Enfin, nous donnons la possibilité de décrire les actes effectués lors de la réalisation de la stratégie par des groupes homogènes de séjour. Ceci est intéressant car, de cette manière, un centre peut se positionner avec l'offre proposée par rapport à la sécurité sociale.

De plus, la méthode que nous proposons est capable d'évaluer le nombre d'années de vie gagné par stratégie. Pour ce faire nous utilisons les statistiques obtenues

par les spécialistes médicaux, ainsi que des méthodes précises concernant cette évaluation. Enfin, les prix des protocoles faisant partie d'une stratégie thérapeutique peuvent être renseignés par les sources propres de l'utilisateur ou en utilisant le modèle économique.

Pour finir voici la description des classes qui gèrent la simulation des deux modèles. En effet, chacun des modèles possède une classe permettant de gérer sa simulation en fonction des paramètres passés en entrées. Ces classes sont suffisamment extensibles pour permettre la gestion des propriétés nouvellement créées. La description des deux classes est présentée sur la figure 6.39. On peut ainsi voir que pour chacun des modèles, les deux classes contiennent les références vers les objets gérant l'évaluation des prix par traitement. De plus, nous avons de plus intégré les propriétés nécessaires des objets permettant la gestion des entrées et des sorties des différents formats de données ainsi que l'externalisation sous la forme de flux binaire.

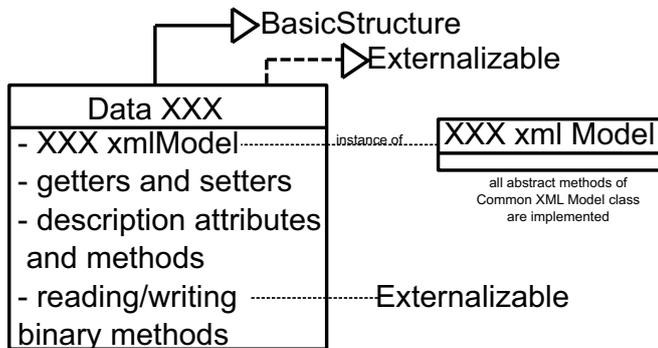


FIGURE 6.38 – Diagramme de classe de la structure gérant toutes les données d'un modèle quelconque.

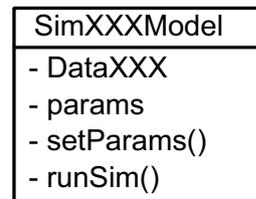


FIGURE 6.39 – Diagramme de classe de l'objet gérant la simulation pour chacun des modèles.

Sur le diagramme de classe 6.38 on fait un rappel bref de la classe décrivant un modèle de simulation quelconque. Il contient la référence vers l'objet gérant les données, les flux d'entrées et les sorties. Les méthodes nécessaires à la simulation sont présentes, ainsi que les paramètres spécifiques. Cette classe communique directement avec l'interface l'utilisateur.

6.5 L'interface Utilisateur

L'interface du prototype, comme le reste de la modélisation se veut souple et facilement modifiable. On a donc jugé pertinent d'utiliser le Modèle Vue Contrôleur. Ce modèle possède les caractéristiques suivantes :

- Les données, leur représentation dans l'interface homme-machine et leur contrôles sont gérés par des structures différentes.
- Le modèle gère la mise à jour et le traitement des données. En effet, le modèle comporte les méthodes permettant d'interagir avec les données mais, est

dépourvu de toute représentation des données. Il est possible compte tenu de l'importance des données, d'imaginer des vues partielles de ces dernières. Les différentes vues possibles sont gérées par la partie vue du Modèle-Vue-Contrôleur.

- Le Contrôleur est celui qui fait le lien entre les demandes de l'utilisateur, qui passent par l'interface graphique et le Modèle des données qui doit réagir en fonction d'une demande. Le Contrôleur ne modifie pas les données, il se contente uniquement de récupérer les demandes de modifications nécessaires et de les transmettre aux objets qui peuvent les effectuer.
- La Vue est la troisième partie de ce modèle. Elle est utilisée pour faire différents affichages possibles des données et des résultats. La Vue n'effectue aucun traitement concernant les données ou les processus à déclencher. En effet la Vue n'est faite que pour satisfaire l'interface homme-machine et les demandes des utilisateurs. Par le biais des Contrôleurs, les demandes sont transmises au Modèle et c'est ce dernier qui se charge de les accomplir.

Une vue globale et générique de cette modélisation est visible sur la figure 6.40 et permet d'identifier les interactions entre les trois entités.

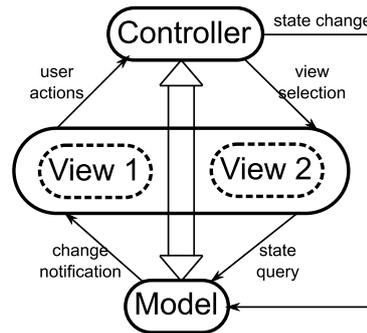


FIGURE 6.40 – Fonctionnement général d'un Modèle Vue Contrôleur

Suivant ce modèle l'interface graphique a été construite en conséquence. Nous avons développé les trois entités du modèle. Ceci nous permet de garder le modèle des données intactes et de plus modifiable sans être obligé de passer par l'interaction avec l'interface graphique. L'interface graphique qui a été construite a été décomposée en plusieurs parties indépendantes qui correspondent aux trois modèles du logiciel :

- Modèle de recrutement.

L'interface graphique du modèle de recrutement correspond aux données dont il a besoin. En effet, avec l'aide de l'interface graphique l'utilisateur peut renseigner les données, les modifier et également démarrer une simulation. Le logiciel permet de stocker de nombreux jeux de données et de choisir l'un d'entre eux pour lancer la simulation. Des captures d'écran de l'interface graphique sont visibles sur les figures 6.41 (page 201) et 6.42 (page 201).

La figure 6.41 (page 201) représente une capture de l'interface donnant accès aux données déjà présentes pour leur modification éventuelle et permettant le

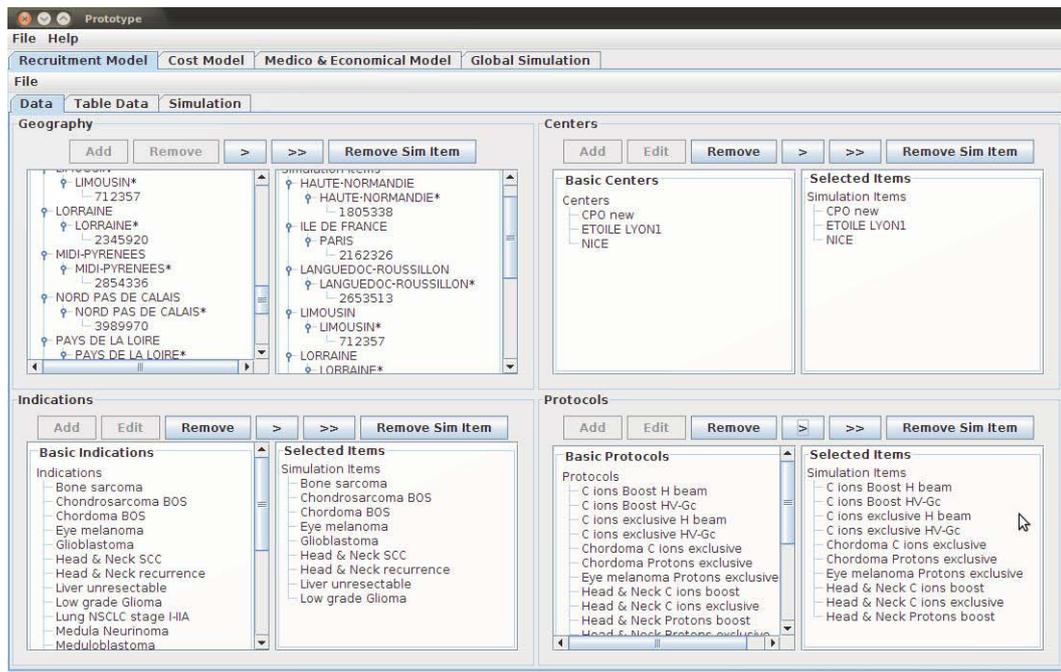


FIGURE 6.41 – Interface graphique donnant accès aux données du modèle de recrutement.

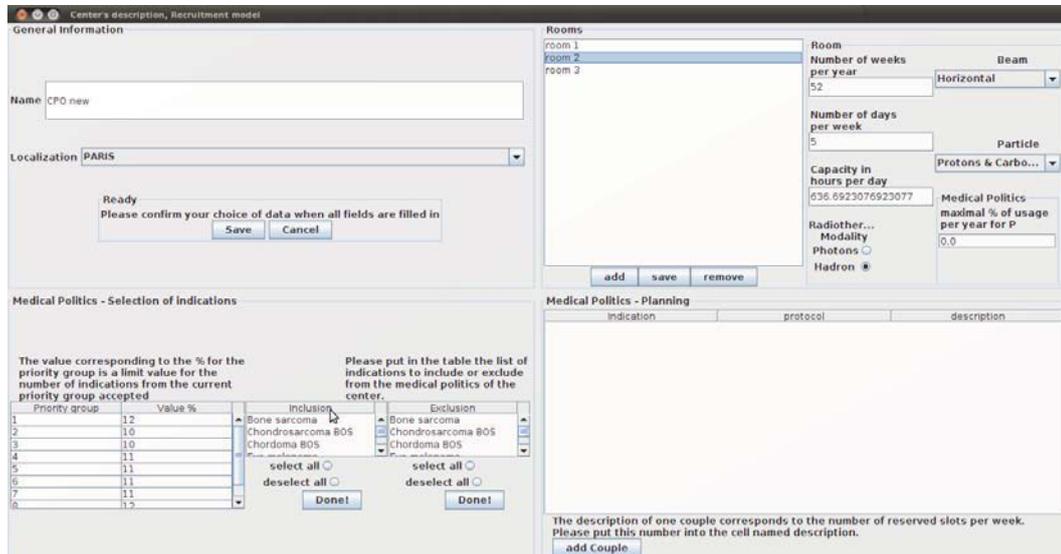


FIGURE 6.42 – Interface graphique pour la description du centre pour le modèle de recrutement.

choix des données pour une simulation. Le logiciel offre une représentation sous forme de listes arborescentes de la géographie. À noter que, dans la présentation des centres, on inclut une description du modèle de planification

et de la politique médicale de chaque centre, accessible à l'aide du bouton Edit de la figure 6.42, page 201.

- Modèle de coût.

Deux exemples de l'interface graphique du modèle de coût sont visibles en 6.43 et 6.44. Nous pouvons ainsi remarquer que le protocole et le centre sont décrits avec les activités et le personnel les concernant. Dans l'interface concernant le protocole (figure 6.43, page 202), le protocole est décrit par ses phases de préparation et d'irradiation. Les deux phases contiennent chacune la description des activités les concernant.

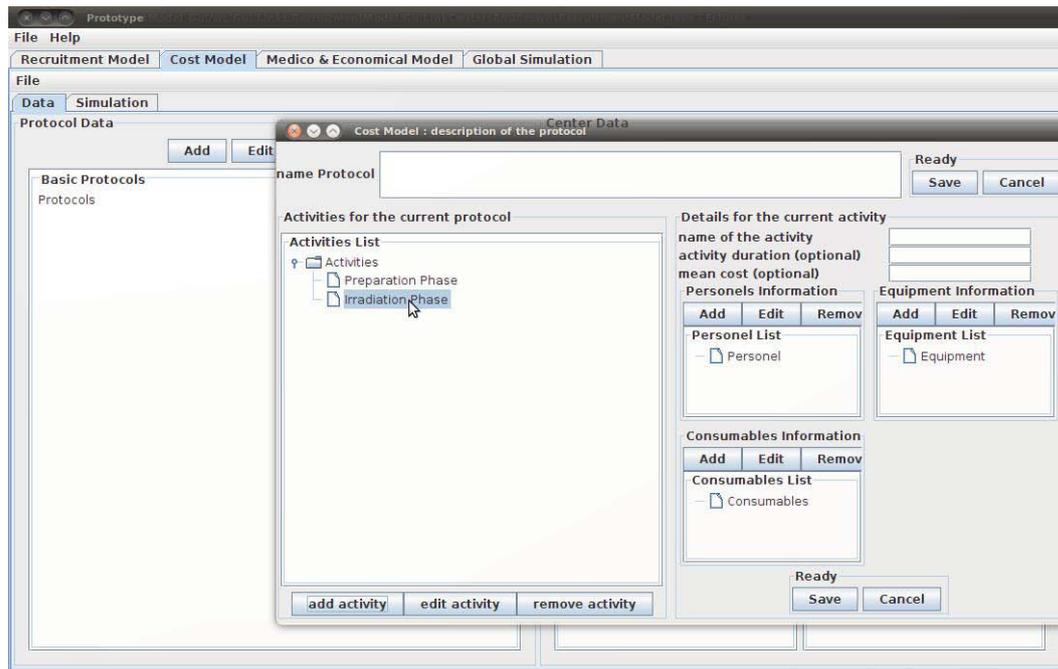


FIGURE 6.43 – Interface graphique pour la description des phases de préparation et d'irradiation du modèle de coût, partie interface graphique.

La seconde figure 6.44, page 203 concerne la description du centre. Cette description détaille le personnel, l'équipement, les bâtiments, les consommables, les frais généraux et également les protocoles que le centre voudrait évaluer.

- Modèle médico-économique.

Enfin, les trois captures d'écrans suivantes concernent le modèle médico-économique et notamment : représentent chacune :

- Les protocoles (6.45, page 203). L'interface est caractérisée par les données fournies par l'utilisateur en tenant compte des données GHS si elles existent et/ou en prenant les données du modèle de coût pour les prix.
- La description d'une stratégie. La description d'une stratégie comporte deux phases : phase thérapeutique (6.46, page 204) et phase post-thérapeutique (6.47, page 204).

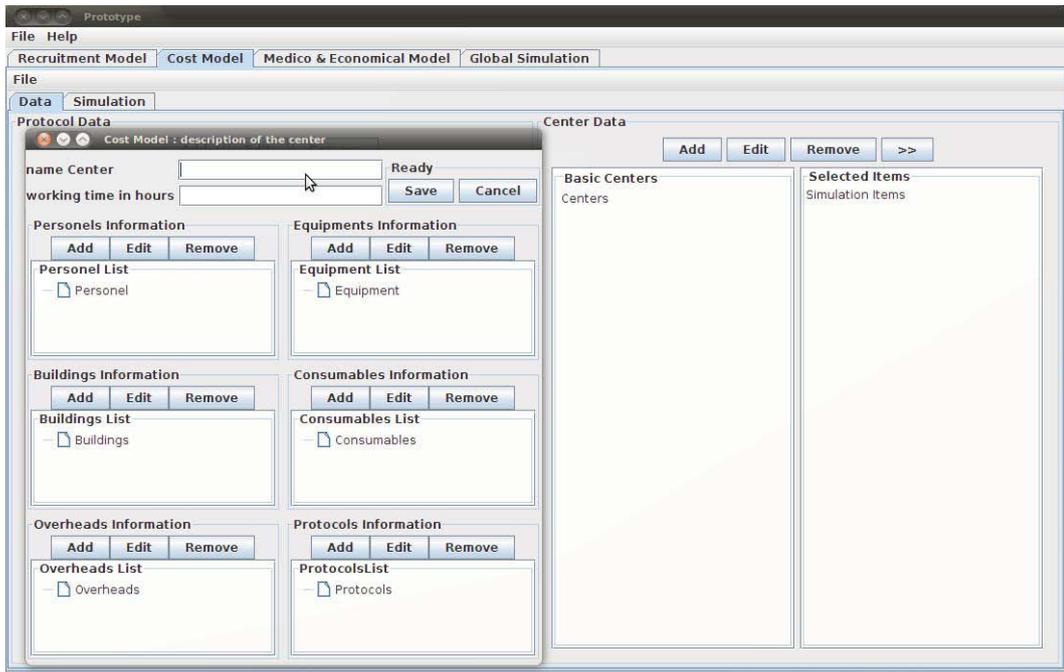


FIGURE 6.44 – Interface graphique pour la description d'un centre pour le modèle de coût.

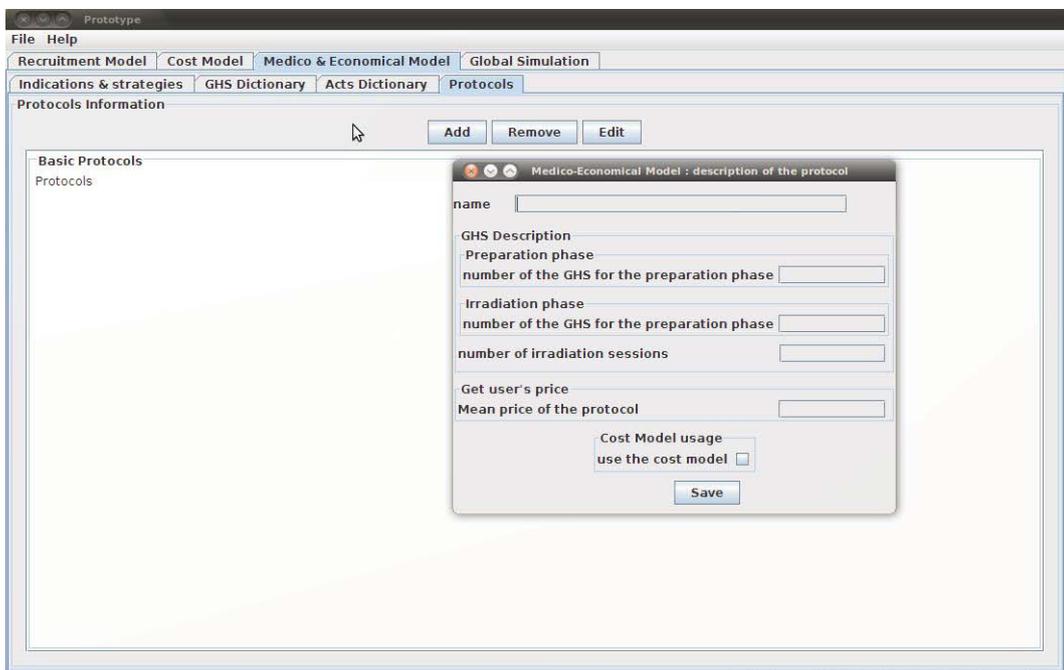


FIGURE 6.45 – Interface graphique de description des protocoles pour le modèle médico-économique.

FIGURE 6.46 – Interface graphique de description d’une stratégie pour le modèle médico-économique.

FIGURE 6.47 – Description d’une Stratégie, phase post-thérapeutique, interface graphique, modèle médico-économique.

6.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l’implémentation et des tests des différents modèles développés durant la thèse. Notre modélisation est basée sur la théorie des systèmes multi-agents. Nous utilisons les langages Java, et XML et les schémas XSD pour définir un dictionnaire de connaissances. Nous nous servons également du solveur d’optimisation Cplex.

En se servant de la modélisation multi-agents, nous modélisons le corps et les différents modules de l’outil informatique. Le cœur de la modélisation se situe dans le modèle de recrutement qui fonctionne à base d’agents communicants. Les dia-

grammes de classes de ces agents, les discussions et les liens entre eux sont présentés dans ce chapitre. Nous avons également exposé des détails de la modélisation correspondant à ce modèle dans le chapitre 4. Les centres de radiothérapie sont de plus décrit par un modèle générique. Par ailleurs notre modélisation prend en compte différentes spécialités de centres hospitaliers, qui sont équipés de différentes machines selon les maladies à traiter. Le logiciel permet d'exprimer des préférences médicales aux niveau de la gestion des centres par rapport aux patients arrivants. De la même manière, nous avons décrit le patient en tant qu'entité autonome. Le patient est un agent avec une grande importance dans la gestion du processus de simulation. En effet, il est capable de prendre des décisions en utilisant les méthodes avec lesquelles nous l'avons décrit. Le modèle de recrutement comporte également un modèle de planification qui permet d'évaluer le fonctionnement et l'efficacité des centres de radiothérapie.

Nous avons également implémenté les deux modèles économiques, les modules logiciels correspondants sont indépendant des modules de recrutement et de planification. La contrainte la plus forte est d'obtenir des données économiques nécessaires pour que la simulation puisse avoir lieu.

Enfin, une interface utilisateur est présente pour faciliter l'utilisation du prototype. Elle est différenciée en fonction de chaque module logiciel. Nous avons utilisé le Modèle-Vue-Contrôleur modèle pour son implémentation. Des captures d'écrans sont présentées dans ce chapitre. Nous proposons ainsi un prototype logiciel parfaitement fonctionnel et validé par les experts médicaux permettant la simulation multi-agents de plusieurs centres de radiothérapie en concurrence, et ainsi d'estimer pour la première fois, le coût réel du traitement d'un patient et l'impact des stratégies de traitement sur l'attractivité et l'efficacité d'un centre.

Conclusion et Perspectives

Nous avons présenté dans ce manuscrit la modélisation, la construction, l'implémentation et les premiers test d'un prototype d'évaluation médico-économique de centres de radiothérapie. Le prototype logiciel proposé est construit en utilisant les méthodes des Systèmes Multi-Agents (SMA). Elles nous ont permis de modéliser et de concevoir un système générique. Les avantages de cette modélisation sont visibles en utilisant le prototype ou en observant sa construction. Une caractéristique intéressante du prototype logicielle multi-agents est qu'il comporte quatre modules, pouvant fonctionner chacun indépendamment ou alors de façon conjointe. Les modèles communiquent entre eux et sont en mesure de récupérer l'information nécessaire pour le bon déroulement de la simulation. D'un point de vue logiciel le prototype informatique a été implémenté en langage `JAVA` ce qui permet de l'utiliser sur la plupart des matériels et systèmes d'exploitation actuels. De plus un dictionnaire sous le format `XML` est élaboré pour les besoins du logiciel. Ce dictionnaire regroupe tous les termes spécifiques des différents domaines collaborant pour la modélisation du prototype. Les bibliothèques utilisées avec cet outil sont disponibles sous une licence libre d'utilisation. Elle sont fournies avec le paquet de mise en exécution du prototype. Le prototype que nous présentons dans ce manuscrit est élaboré pour donner la réponse d'une évaluation médico-économique des centres hospitaliers voulant employer des nouvelles techniques de radiothérapies. Nous avons constitué un prototype composés de quatre modèles décrits dans ce manuscrit.

Les méthodes standards sur l'évaluation des nouvelles techniques en radiothérapies traitent souvent des thèmes concernant le prix des traitements et l'efficience des centres les utilisant. Nous avons voulu synthétiser ces méthodes en une seule et de plus faire la relation entre ces évaluations et la propagation de ces nouvelles thérapies auprès de la population. En effet l'hôpital peut mesurer la propagation des nouvelles techniques qu'il propose en dénombrant le nombre de patients soignés par ces techniques. C'est pour cette raison que nous proposons un outil informatique comportant quatre modèles séparés. Un modèle concernant le recrutement potentiel des centre de radiothérapie voulant ou utilisant de nouvelles techniques ; un modèle de planification des patients au sein des centres ; un modèle d'évaluation des coûts des traitements de prise en charge des patients par ces nouvelles techniques ; et en dernier un modèle médico-économique qui compare les stratégies entre elles et avec un système de remboursement médical. Dans ce travail, nous nous appuyons sur le fonctionnement du système français d'assurance maladie.

Nous modélisons le comportement du patient, qui dépend à la fois de sa maladie,

de l'urgence des soins associées, des traitements existants et de l'implantation des centres de radiothérapie innovants. Dans le modèle de recrutement, nous modélisons finement une politique médicale des choix médicaux de l'établissement hospitalier, en permettant la description de plusieurs situations possibles. En dernier lieu, nous proposons un modèle de planification des soins des patients. Il permet une meilleure prise en charge pour les malades et une évaluation de la situation courante du centre durant la simulation. Le modèle de planification permet le développement future du centre en améliorant la gestion de ses ressources.

Le premier modèle, dit modèle de recrutement, est le modèle contenant le cœur de l'étude. Nous nous basons sur lui car il évalue le nombre potentiel de patients susceptibles de se faire soigner dans un centre de radiothérapie. Ce modèle est basé sur des hypothèses d'analyse géographique des positions des centres de radiothérapie et des patients. Cette analyse géographique nous permet de pouvoir simuler la concurrence entre les établissements hospitaliers, qui dépend de l'offre de nouvelles technologies exploitées proposées par chacun. Cette méthode est très utilisée en économie de la santé. La spatialisation géographique des entités nous permet de présenter les relations de distance et d'attractivité qui les lient entre elles. On peut ainsi mesurer l'attractivité d'un centre hospitalier en tenant compte à la fois de la distance, du réseaux de transport et de l'offre de soins.

Nous avons utilisé des facteurs, reflétant la distance et le réseau de transport, fournis par l'utilisateur. Nous pouvons également supposer que ces facteurs sont extraits d'un système d'information géographique. En effet, la vision que l'on propose est proche des systèmes d'informations géographiques. Ceci nous donne la possibilité de supposer une éventuelle relation avec des experts du domaine et d'envisager une connexion possible avec la géographie. Les systèmes d'informations géographiques permettent une vision plus exacte des réseaux de transport et des connections existantes entre les villes et vers des points d'intérêts spécifiques (les centres hospitaliers). Ces points d'intérêt peuvent bénéficier d'une étude du nombre de patients qui sont intéressés et des moyens de transport, de la distance et de l'accessibilité en général des individus. Nous pouvons utiliser le flux de personnes allant vers le point d'intérêt. Des études concernant les registres nationaux existent. Elles concernent les dossiers médicaux des personnes entrant dans un hôpital et renseignent sur la provenance des patients. Ces études pourraient être utilisées dans le présent projet. Nous pouvons à partir des données des registres extraire des coefficient d'attractivité des établissement hospitaliers en se basant sur les flux des patients arrivant et leur provenance. Ce qui est plus difficile à être évalué concerne l'attractivité des nouveaux traitements car ils sont pour le moment très peu connus et de telles statistiques n'existent pas. De plus, si l'on suppose la création d'un nouvel établissement, la problématique devient plus difficile à traiter. Néanmoins nous pouvons nous baser sur les statistiques des établissements déjà existants et des maladies pour lesquelles ces statistiques sont connues. Une méthode de modélisation de cette problématique peut être le positionnement du nouvel établissement dans une zone voisine et assez proche des autres établissement connus. Ensuite, en ce qui concerne les nouvelles techniques, nous pouvons utiliser les flux des patients déjà existants et connus en

les pondérant par un système de concurrence entre les établissements hospitaliers. Le système de concurrence a déjà été modélisé dans notre étude. Nous considérons la politique médicale et le fonctionnement interne du centre tout en tenant compte de sa capacité d'accueil.

Une solution possible pour le positionnement géographique du nouveau centre existant a été donnée, nous pouvons essayer de proposer une méthode pour la modélisation de l'avis du patient concernant les nouvelles méthodes proposées. Étant donné que le comportement du patient comporte une part d'aléatoire, nous pouvons envisager des rapprochements vers les sciences humaines et sociales. Ceci pourrait nous permettre d'exprimer une relation entre tous les facteurs. De plus, il est nécessaire de connaître le comportement individuel des patients par rapport aux nouvelles techniques, résultats qui doivent être en cours d'évaluation à ce jour pour les patients soignés.

Le mécanisme gérant la politique médicale est d'une grande importance. Il permet la gestion de différents scénarios exprimant l'organisation médicale de l'établissement hospitalier. De plus, la politique médicale est directement impactée par la concurrence des autres environnements. Ainsi, l'outil mis en place permet d'évaluer le besoin exprimé par les patients pour les traitements innovants et la pertinence de développer (ou pas) ces traitements dans un centre hospitalier.

En ce qui concerne le modèle de recrutement nous devons mentionner l'utilisation du modèle de planification. Le modèle de planification est une partie indispensable au bon fonctionnement du modèle de recrutement et du prototype entier. En effet, sans la représentation de l'organisation interne d'un hôpital prenant en charge des patients, nous ne sommes pas en mesure de pouvoir représenter la capacité de ce dernier à recevoir des patients pour des soins. De plus, avec l'emploi d'un tel modèle nous pouvons tenir compte de l'urgence du traitement imposé au patient et en même temps de la gravité de sa maladie. Ce modèle peut être prévu en mettant l'importance sur un meilleur délai de la prise en charge des patients, mais également sur la représentation du personnel et des ressources de l'établissement hospitalier. Cette démarche est essentielle pour la justesse de la proposition faite par l'outil informatique. En effet, nous ne pouvons pas estimer tout à fait correctement les délais nécessaires pour les soins des patients, si nous ne tenons pas compte des ressources de l'hôpital. De la même manière nous devons tenir compte du personnel présent, car c'est avec ce point que nous pouvons donner une estimation des ressources humaines employées, qui n'est pas un point négligeable sur le fonctionnement de l'hôpital ainsi que sur une meilleure prise en charge des soins des patients. Ainsi, notre objectif pour les futures versions de ce modèle est de pouvoir déployer la gestion du personnel et des ressources du centre. Une méthode de développement est de concevoir un noyau à l'aide de la programmation linéaire par contraintes qui gère les contraintes de ressources de l'hôpital et ensuite de proposer une heuristique d'initialisation pour ce problème. Nous avons déjà proposé une base de ce modèle en utilisant la programmation linéaire par contraintes. Nous avons également proposé un modèle linéaire écrit sous **Cplex**.

Le modèle de recrutement est étroitement lié au modèle de planification, lequel

est très important pour le modèle économique. En effet, estimer correctement le nombre de patients intéressés par une thérapie innovante s'avère indispensable pour évaluer le coût du traitement correspondant. Une perspective possible est d'utiliser l'évaluation du coût du traitement innovant pour remonter au coût du personnel nécessaire. Enfin, l'utilisation de la méthode ABC n'est pas prévue pour être changée, car actuellement c'est la plus utilisée dans ce genre de méthode de prix pour un bien. Elle est également bien connue dans l'économie de la santé. Ce point de vue est très important pour mesurer l'efficacité d'un nouvel établissement hospitalier ou d'un nouveau noyau d'un établissement déjà existant voulant employer des nouvelles techniques.

La mesure de l'efficacité économique demande également une mesure et une comparaison des stratégies thérapeutiques utilisées pour un traitement, qu'elles soient proposées par un même établissement ou par des établissements concurrents. L'utilisateur a la possibilité de saisir le coût du traitement dans les rares cas où il le connaît, le reste du temps c'est le logiciel qui évalue le coût. Notre méthode tient compte de des Groupes Homogènes de Séjour de la sécurité sociale en France. Nous pouvons donc conclure sur le remboursement de ces nouvelles techniques sur le territoire français. Une nouvelle perspective serait d'étudier les différentes sécurités sociales en Europe pour pouvoir comparer le taux de remboursement des différentes maladies entre les pays pouvant les soigner. Cela peut donner une indication sur l'implication et la volonté des pays voisins, pour promouvoir l'utilisation des nouvelles thérapies contre le cancer.

Bibliographie

- [Aamodt 1994] Agnar Aamodt et Enric Plaza. *Case-based reasoning; Foundational issues, methodological variations, and system approaches*. AI COMMUNICATIONS, vol. 7, no. 1, pages 39–59, 1994. (Cité en page 68.)
- [Amblard 2006] Frédéric Amblard et Denis Phan. Modélisation et simulation multi-agents : applications pour les Sciences de l’Homme et de la Société. Hermès Science Publications, <http://www.editions-hermes.fr/>, septembre 2006. (Cité en pages 18, 37 et 79.)
- [Andler 1992] Daniel Andler. Introduction aux sciences cognitives. Folio Essais, 1992. (Cité en page 37.)
- [Aquino 2002] Patrick Aquino. *Accompagner une maîtrise ascendante des territoire - Prémices d’une géographie de l’action territoriale*. PhD thesis, Université de Provence, Aix-Marseille I, 2002. (Cité en pages 114 et 115.)
- [Arrow 1988] Kenneth Arrow et Philip W. Anderson. *The Economy As An Evolving Complex System*. In Proceedings Volume in the Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity. David Pines, 1988. (Cité en page 11.)
- [Bachimont 2002] Bruno Bachimont, Antoine Isaac et Raphaël Troncy. *Semantic Commitment for Designing Ontologies : A Proposal*. In Proceedings of the 13th International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management. Ontologies and the Semantic Web, EKAW ’02, pages 114–121, London, UK, 2002. Springer-Verlag. (Cité en page 66.)
- [Barros 1995] Fernando J Barros. *Dynamic structure discrete event system specification : a new formalism for dynamic structure modeling and simulation*. In Proceedings of the 27th conference on Winter simulation, WSC ’95, pages 781–785, Washington, DC, USA, 1995. IEEE Computer Society. (Cité en page 79.)
- [Bartels 2009] J.-H. Bartels et J. Zimmermann. *Scheduling tests in automotive R&D projects*. European Journal of Operational Research, vol. 193, no. 3, pages 805–819, 2009. (Cité en page 130.)
- [Bianco 1998] L. Bianco, P. Dell Olmo et M. Grazia Speranza. *Heuristics for multimode scheduling problems with dedicated resources*. European Journal Of Operational Research, vol. 107, no. 2, pages 260–271, 1998. (Cité en page 130.)
- [Blum 1997] Avrim L. Blum et Merrick L. Furst. *Fast planning through planning graph analysis*. Artif. Intell., vol. 90, pages 281–300, February 1997. (Cité en page 126.)
- [Bomsdorf 2008] Felix Bomsdorf et Ulrich Derigs. *A model, heuristic procedure and decision support system for solving the movie shoot scheduling problem*. OR Spectrum, vol. 30, pages 751–772, 2008. 10.1007/s00291-007-0103-6. (Cité en page 130.)

- [Böttcher 1999] Jan Böttcher, Andreas Drexl, Rainer Kolisch et Frank Salewski. *Project Scheduling Under Partially Renewable Resource Constraints*. *Manage. Sci.*, vol. 45, pages 543–559, April 1999. (Cité en page 130.)
- [Braitenberg 1986] Valentino Braitenberg. *Vehicles experiments in synthetic psychology*. MIT Press, 1986. (Cité en page 27.)
- [Breton 2000] L. Breton, J.D. Zucker et E. Clément. *GranuLab : un laboratoire virtuel d'experimentations pour la decouverte scientifique en physique granulaire*. In *RFIA'2000*, volume I, pages 599–606, Paris, France, 2000. A Multi-agent approach for the resolution of equations in granular physics. (Cité en pages 68, 114 et 115.)
- [Breton 2002] L. Breton. *GranuLab : un système d'aide à la découverte scientifique appliqué à la physique des milieux granulaires*. PhD thesis, UNIVERSITÉ PARIS 6, 2002. (Cité en pages 114 et 115.)
- [Briot 1989] Jean-Pierre Briot. *Actalk : A Testbed for Classifying and Designing Actor Languages in the Smalltalk80 Environment*. In *European Conference on Object-Oriented Programming*, pages 109–129, 1989. (Cité en page 29.)
- [Brucker 1999] P. Brucker. *Resource-constrained project scheduling : Notation, classification, models, and methods*. *European Journal Of Operational Research*, vol. 112, no. 1, pages 3–41, 1999. (Cité en pages 126, 128 et 129.)
- [Brucker 2002] Peter Brucker. *Project Scheduling under Limited Resources : Models, Methods and Applications*. Sönke Hartmann, Springer, Berlin. ISBN 3-540-66392-4. *Journal of Scheduling*, vol. 5, no. 1, pages 101–102, 2002. (Cité en page 130.)
- [Cambier 1994] C. Cambier. *SIMDELTA : un système multi-agent pour simuler la pêche sur le Delta Central du Niger*. PhD thesis, Université Paris 6, 1994. (Cité en page 25.)
- [Caplat 2008] Guy Caplat. *Modèles et métamodèles*. Lausanne (Suisse) : Presses polytechniques et universitaires romandes, cop. 2008, 2008. (Cité en page 9.)
- [Carle 1992] P. Carle. *Un langage d'acteur pour intelligence artificielle distribuée intégrant objets et agents par réflexivité combinatoire*. PhD thesis, Université de Paris 6, 1992. (Cité en page 28.)
- [Cavalcante 1998] C.C.B. Cavalcante, C. Carvalho De Souza, M. W. P. Savelsbergh, Y. Wang et L.A. Wolsey. *Scheduling Projects with Labor Constraints*. *Discrete Applied Mathematics*, vol. 112, 1998. (Cité en page 127.)
- [Chapman 1985] David Chapman. *Planning for Conjunctive Goals*. Rapport technique, Cambridge, MA, USA, 1985. (Cité en page 126.)
- [Charlet 2000] Jean Charlet, M. Zacklad, G. Kassel et D. Bourigault. *Ingénierie des connaissances, évolutions récentes et nouveaux défis*. Eyrolles, Paris, France, 2000. (Cité en page 66.)
- [Cherian 1993] Sunil Cherian et Wade O Troxell. *A neural network based behavior hierarchy for locomotion control*. In *Proceedings of the second international*

- conference on From animals to animats 2 : simulation of adaptive behavior : simulation of adaptive behavior, pages 61–70, Cambridge, MA, USA, 1993. MIT Press. (Cité en page 27.)
- [Chevrier 1993] V. Chevrier. *Étude et mise en oeuvre du paradigme multi-agent : de l'atome à Gtmas*. PhD thesis, Université Nancy 1, 1993. (Cité en page 25.)
- [Cohen 1987] Philip R. Cohen et Hector J. Levesque. *Persistence, Intention, and Commitment*. Rapport technique 415, AI Center, SRI International, 333 Ravenswood Ave., Menlo Park, CA 94025, Feb 1987. (Cité en page 37.)
- [Cohen 1990] Philip R. Cohen et Hector J. Levesque. *Intention is choice with commitment*. *Artif. Intell.*, vol. 42, pages 213–261, March 1990. (Cité en page 37.)
- [Coutinho 2005] L. R. Coutinho, J. S. Sichman et O. Boissier. *Modeling Organization in MAS : A Comparison of Models*. First Workshop on Software Engineering for Agent Oriented Systems, 2005. (Cité en page 29.)
- [David 2005] René David et Hassane Alla. *Discrete, continuous, and hybrid petri nets*. Springer-Verlag, Berlin, 2005. (Cité en page 31.)
- [Delaye 1993] C Delaye. *Structure et adaptation des systèmes multi-agents autonomes et adaptatifs*. PhD thesis, Université Paris 6, 1993. (Cité en page 23.)
- [Dhombres 2010] Ferdinand Dhombres, Jean-Marie Jouannic, Marie-Christine Juallent et Jean Charlet. *Choix méthodologique pour la construction d'une ontologie de domaine de médecine périnatale*, pages 171–182. 2010. (Cité en page 66.)
- [Do 2001] Minh Binh Do et Subbarao Kambhampati. *Planning as constraint satisfaction : solving the planning graph by compiling it into CSP*. *Artif. Intell.*, vol. 132, pages 151–182, November 2001. (Cité en page 126.)
- [Draa 2001] Chaib B. Draa, I. Jarras et B. Moulin. *Systèmes multi-agents : principes généraux et application*. In Jean P. Briot et Yves Demazeau, éditeurs, *Principes et architecture des systèmes multi-agents*, chapitre 1. Hermès-Lavoisier, 2001. (Cité en page 125.)
- [Drexl 2000] Andreas Drexl, Rüdiger Nissen, James H. Patterson et Frank Salewski. *ProGen – An instance generator for resource-constrained project scheduling problems with partially renewable resources and further extensions*. *European Journal of Operational Research*, vol. 125, no. 1, pages 59–72, 2000. (Cité en page 130.)
- [Drogoul 1993] A. Drogoul et Jacques Ferber. *From Tom Thumb to the Dockers : some experiments with foraging robots*. In Proceedings of the second international conference on From animals to animats 2 : simulation of adaptive behavior : simulation of adaptive behavior, pages 451–459, Cambridge, MA, USA, 1993. MIT Press. (Cité en page 26.)
- [Drogoul 1993] A. Drogoul. *De La Simulation Multi-Agent À La Résolution Collective de Problèmes. Une Étude De l'Émergence De Structures D'Organisation Dans Les Systèmes Multi-Agents*. PhD thesis, UNIVERSITÉ PARIS 6, 1993. (Cité en pages 114, 115 et 116.)

- [Durfee 1989] E. H. Durfee, V. R. Lesser et D. D. Corkill. *Cooperative Distributed Problem Solving*. The Handbook of Artificial Intelligence, vol. IV, pages 83–147, 1989. (Cité en pages 8 et 20.)
- [Durfee 1995] E. H. Durfee, Victor R. Lesser et Daniel D. Corkill. *Trends in Cooperative Distributed Problem Solving*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 1, pages 63–83, 1995. (Cité en page 8.)
- [Engelmore 1997] R. Engelmore et T. Morgan. Blackboard systems. Addison Wesley, 1997. (Cité en page 25.)
- [Erman 1988] L D Erman, F Hayes-Roth, V R Lesser et D R Reddy. *The HEARSAY-II Speech Understanding System : Integrating Knowledge to Resolve Uncertainty*. Blackboard Systems, pages 31–86, 1988. (Cité en page 24.)
- [Ferber 1990] Jacques Ferber. Conception et programmation par objet. Hermès, 1990. (Cité en page 20.)
- [Ferber 1991] Jacques Ferber et P. Carle. *Actors and agents as reflective concurrent objects a mering IV perspective*. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, vol. 21, pages 1420–1436, 1991. (Cité en page 28.)
- [Ferber 1995] Jacques Ferber. Les systèmes multi-agents vers une intelligence artificielle. InterEditions, 1995. (Cité en pages 7, 10, 13, 14, 15, 17, 29, 31, 37, 43, 45 et 53.)
- [Ferber 2003a] Jacques Ferber, Olivier Gutknecht et Fabien Michel. *From Agents to Organizations : An Organizational View of Multi-agent Systems*. In In : LNCS n. 2935 : Procs. of AOSE’03, pages 214–230. Springer Verlag, 2003. (Cité en page 116.)
- [Ferber 2003b] Jacques Ferber, Fabien Michel et Olivier Gutknecht. *Agent/Group/Roles : Simulating with organizations*. In Jean-Pierre M ller, editeur, Agent-Based Simulation 4, 28-30 April 2003. (Cité en page 116.)
- [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 page 126.)
- [Fodor 1983] J. Fodor. The modularity of mind. MIT/Bradford Press, Cambridge, MA, 1983. (Cité en page 21.)
- [Gasser 1989] L. Gasser et RW. Hill. *Coordinated Problem Solvers*. Annual Review of Computer Science, vol. 4, pages 203–253, 1989. (Cité en page 42.)
- [Genesereth 1987] Michael R. Genesereth et Nils J. Nilsson. Logical foundations of artificial intelligence. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1987. (Cité en page 66.)
- [Giroux 1993] S. Giroux. *Agent et systèmes, une nécessaire unit *. PhD thesis, Université de Monr al, 1993. (Cité en page 29.)
- [Glad 1996] Ernest Glad, H. Becker, M. Partridge et L. Perren. Activity-based costing and management. Finance (John Wiley & Sons). J. Wiley, 1996. (Cité en page 70.)

- [Godelier 1966] Maurice Godelier. *Étude internationale sur les tendances principales de la recherche dans les sciences de l'homme, Les méthodes de simulation en économie*. 1966. (Cité en page 12.)
- [Goldberg 1989] David Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley, 1989. (Cité en page 26.)
- [Gomez-Pérez 2004] A. Gomez-Pérez, M. Fernandez-Lopez, et O. Corcho. Ontology development methods and methodologies, pages 113–153. Springer Verlag, Madrid Spain, 2004. (Cité en page 66.)
- [Gruber 1993] Thomas R. Gruber. *Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing*. In In Formal Ontology in Conceptual Analysis and Knowledge Representation. Kluwer Academic Publishers, 1993. (Cité en page 66.)
- [Guarino 2009] Nicola Guarino, Daniel Oberle et Steffen Staab. *What Is an Ontology? Handbook on Ontologies*. In Steffen Staab et Rudi Studer, éditeurs, Handbook on Ontologies, International Handbooks on Information Systems, chapitre 0, pages 1–17. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. (Cité en page 66.)
- [Hanks 1991] S. Hanks et D.S. Weld. Systematic adaptation for case-based planning : algorithm description, formal properties, and empirical results. Dep. of Computer Science and Engineering, Univ. of Washington, 1991. (Cité en page 125.)
- [Hartmann 1996] Stephan Hartmann. *The World as a Process : Simulations in the Natural and Social Sciences*. Theory and Decision, vol. PrePrint, pages 77–100, 1996. (Cité en page 11.)
- [Hartmann 2010] Sönke Hartmann et Dirk Briskorn. *A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem*. European Journal Of Operational Research, vol. 207, no. 1, pages 1–14, 2010. (Cité en pages 126, 128 et 129.)
- [Hayes-Roth 1985] Barbara Hayes-Roth. *A blackboard architecture for control*. Artif. Intell., vol. 26, pages 251–321, August 1985. (Cité en page 24.)
- [Hayes-Roth 1989] F. Hayes-Roth, L. D. Erman, S. Fouse, J. S. Lark et J. Davidson. *AI tools and techniques*. chapitre ABE : a cooperative operating system and development environment, pages 323–355. Ablex Publishing Corp., Norwood, NJ, USA, 1989. (Cité en page 25.)
- [Hemelrijk 2000] C. Hemelrijk. *Towards the integration of social dominance and spatial structure*. Animal Behaviour, vol. 59, no. 5, pages 1035–1048, Mai 2000. (Cité en pages 114 et 115.)
- [Hemelrijk 2002] C. Hemelrijk. *Despotic societies, sexual attraction and the emergence of male “tolerance” : an agent-based model*. Behaviour, vol. 139, no. 6, pages 729–747, 2002. (Cité en pages 114 et 115.)

- [Hemelrijk 2003] C. Hemelrijk, J. Wantia et M. Dätwyler. *Female Co-Dominance in a Virtual World : Ecological, Cognitive, Social and Sexual Causes*. Behaviour, vol. 140, no. 10, pages 1247–1273, 2003. (Cité en pages 114 et 115.)
- [Henri 2003] C Henri et Dekker. *Value chain analysis in interfirm relationships : a field study*. Management Accounting Research, vol. 14, no. 1, pages 1–23, 2003. (Cité en page 143.)
- [Hewitt 1973] Carl Hewitt, Peter Bishop et Richard Steiger. *A universal modular ACTOR formalism for artificial intelligence*. In Proceedings of the 3rd international joint conference on Artificial intelligence, pages 235–245, San Francisco, CA, USA, 1973. Morgan Kaufmann Publishers Inc. (Cité en page 28.)
- [Hewitt 1977] Carl Hewitt. *Viewing control structures as patterns of passing messages*. Artificial Intelligence, vol. 8, no. 3, pages 323–364, Juin 1977. (Cité en page 28.)
- [Hewitt 1985] Carl Hewitt. *The challenge of open systems : current logic programming methods may be insufficient for developing the intelligent systems of the future*. BYTE, vol. 10, pages 223–242, April 1985. (Cité en page 28.)
- [Hewitt 1991] Carl Hewitt. *Open information systems semantics for distributed artificial intelligence*. Artif. Intell., vol. 47, pages 79–106, February 1991. (Cité en pages 28 et 36.)
- [Hill 1993] David Hill. *Analyse orientée objets & modélisation par simulation*. Addison-Wesley, 1993. (Cité en page 11.)
- [Hill 2010] David Hill. *Simulation informatique au services des sciences de la vie*. Presses Universitaires Blaise-Pascal, 2010. (Cité en page 11.)
- [Hoc 1987] J.M. Hoc. *Psychologie cognitive de la planification*. Sciences et technologies de la connaissance. Presses universitaires de Grenoble, 1987. (Cité en page 124.)
- [Holland 1971] John Holland. *Processing and processors for schemata*. In E. L. Jacks, editeur, Associative Information Techniques, pages 127–146, New York, 1971. American Elsevier. (Cité en page 26.)
- [Holland 1977] John Holland et Judith Reitman. *Cognitive systems based on adaptive algorithms*. SIGART Bull., pages 49–49, June 1977. (Cité en page 26.)
- [Holland 1986] John Holland, Keith Holyoak et Richard Nisbett. *Induction : processes of inference, learning, and discovery*. MIT Press, 1986. (Cité en page 26.)
- [Horé 1983] Tomi Horé et Tanet C. Rey. *Dictionnaire historique de la langue française*. Paris, 1983. (Cité en page 8.)
- [Hübner 2006] Jomi Fred Hübner, Jaime Simão Sichman et Olivier Boissier. *S-moise+ : A middleware for developing organised multi-agent systems*. In COIN I, volume 3913 of LNAI, pages 64–78. Springer, 2006. (Cité en page 29.)

- [Hübner 2009] J. F. Hübner, E. Matson, O. Boissier et V. Dignum. Coordination, organizations, institutions and norms in agent systems iv : Coin 2008 international workshops coin@aamas 2008, estoril, portugal, may 12, 2008 coin@aaai 2008, chicago, usa, july 14, 2008, revised selected papers. Lecture notes in artificial intelligence. Springer, 2009. (Cité en page 29.)
- [Humphreys 1990] Paul Humphreys. *Computer Simulations*. In PSA : Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, volume 2, pages 497–506. The University of Chicago Press, 1990. (Cité en page 11.)
- [I.Durand-Zaleski 2005] I.Durand-Zaleski. *Economic evaluation of radiotherapy : methods and results*. Cancer/Radiotherapy, pages 449–451, 2005. (Cité en page 70.)
- [Jagannathan 1997] V. Jagannathan, R. Dodhiawala et L. S. Baum. Blackboard architectures and applications. Addison Wesley, 1997. (Cité en page 25.)
- [Jones 1998] D. Jones, T. Bench-Capon et P. Visser. *Methodologies for Ontology Development*. In Proc. IT&KNOWS Conference of the 15th IFIP World Computer Congress, 1998. (Cité en page 66.)
- [Kambhampati 1992] Subbarao Kambhampati et James A. Hendler. *A validation-structure-based theory of plan modification and reuse*. Artif. Intell., vol. 55, pages 193–258, June 1992. (Cité en page 125.)
- [Kambhampati 1994] Subbarao Kambhampati. *EXPLOITING CAUSAL STRUCTURE TO CONTROL RETRIEVAL AND REFITTING DURING PLAN REUSE*. Computational Intelligence, vol. 10, no. 2, pages 212–244, 1994. (Cité en page 125.)
- [Kaplan 1998] R.S. Kaplan et R. Cooper. Cost & effect : using integrated cost systems to drive profitability and performance. Harvard Business School Press, 1998. (Cité en page 142.)
- [Kautz 1999] Henry Kautz et Bart Selman. *Unifying SAT-based and Graph-based Planning*. pages 318–325. Morgan Kaufmann, 1999. (Cité en page 126.)
- [Kis 2006] Tamás Kis. *RCPS with Variable Intensity Activities and Feeding Precedence Constraints*. In Joanna Józefowska et Jan Weglarz, éditeurs, Perspectives in Modern Project Scheduling, volume 92 of *International Series in Operations Research & Management Science*, pages 105–129. Springer US, 2006. 10.1007/978-0-387-33768-5_5. (Cité en page 129.)
- [Klein 2000a] Robert Klein. *Project scheduling with time-varying resource constraints*. International Journal of Production Research, vol. 38, no. 16, pages 3937–3952, 2000. (Cité en pages 128 et 130.)
- [Klein 2000b] Robert Klein et Armin Scholl. *PROGRESS : Optimally solving the generalized resource-constrained project scheduling problem*. Mathematical Methods of Operations Research, vol. 52, pages 467–488, 2000. 10.1007/s001860000093. (Cité en pages 128 et 129.)

- [Kolodner 1992] Janet L. Kolodner. *An introduction to case-based reasoning*. Artificial Intelligence Review, vol. 6, no. 1, pages 3–34, Mars 1992. (Cité en page 68.)
- [Kreft 2001] J. U. Kreft, C. Picioreanu, J. W. Wimpenny et M. C. Van Loosdrecht. *Individual-based modelling of biofilms*. Microbiology, vol. 147, no. Pt 11, pages 2897–912, 2001. (Cité en page 115.)
- [L asri 1989] H. L asri et B. Maître. *Coopération dans un univers multi-agents basé sur le modèle de blackboard :  tudes et relations*. PhD thesis, Université Nancy 1, 1989. (Cité en page 24.)
- [Laborie 1995] Philippe Laborie. *IXTET : Une approche intégrée pour la gestion des ressources et la synthèse des plans*. PhD thesis,  cole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, 1995. (Cité en page 125.)
- [Lakatos 1976] Imre Lakatos. *Proofs and Refutations : The Logic of Mathematical Discovery*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, Janvier 1976. (Cité en page 36.)
- [Lardon 2001] L. Lardon. *Modélisation des biofilms de digestion anaérobie par système multi-agents*. Rapport technique, CIRAD, Montpellier, October 2001. (Cité en page 115.)
- [Lesser 1983] Victor R. Lesser et Daniel D. Corkill. *The Distributed Vehicle Monitoring Testbed : A Tool For Investigating Distributed Problem Solving Networks*. AI Magazine, pages 15–33, 1983. (Cité en pages 24 et 25.)
- [Lin 1992] Long-Ji Lin. *Self-Improving Reactive Agents Based on Reinforcement Learning, Planning and Teaching*. Mach. Learn., vol. 8, pages 293–321, May 1992. (Cité en page 27.)
- [Lotka 1925] Alfred Lotka. *Elements of physical biology*. Williams & Wilkins Company, 1925. (Cité en page 8.)
- [Maes 1997] Pattie Maes, Stewart W. Wilson et Maja J. Mataric, editeurs. *From animals to animats 4 : Proceedings of the fourth international conference on simulation of adaptive behavior*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1997. (Cité en page 28.)
- [Mika 2008] Marek Mika, Grzegorz Walig ra et Jan W glarz. *Tabu search for multi-mode resource-constrained project scheduling with schedule-dependent setup times*. European Journal of Operational Research, vol. 187, no. 3, pages 1238–1250, 2008. (Cité en page 127.)
- [Miller 1996] J.A. Miller. *Implementing activity-based management in daily operations*. NAM/Wiley series in manufacturing. John Wiley & Sons, 1996. (Cité en page 142.)
- [Miller 2010] Frederic P. Miller, Agnes F Vandome et John McBrewhster. *Compression de données : Run-length encoding, codage entropique, codage de huffman, codage arithm tique, lz78, lz77, lempel-ziv-welch*. Alphascript Publishing, 2010. (Cité en pages 111 et 188.)

- [Minsky 1965] Marvin Minsky. *Matter, Mind and Models*. In Proceedings of IFIP Congress 65, pages 45–49, Janvier 1965. (Cité en pages 8, 28 et 37.)
- [Morin 1997] Edgar Morin. *La nature de la nature*. seuil. Points, 1997. (Cité en page 17.)
- [Neumann 2003] Klaus Neumann et Christoph Schwindt. *Project scheduling with inventory constraints*. Mathematical Methods of Operations Research, vol. 56, pages 513–533, 2003. 10.1007/s001860200251. (Cité en page 130.)
- [Neumann 2005] Klaus Neumann, Christoph Schwindt et Norbert Trautmann. *Scheduling of continuous and discontinuous material flows with intermediate storage restrictions*. European Journal Of Operational Research, vol. 165, no. 2, pages 495–509, 2005. (Cité en page 130.)
- [Newell 1957] A. Newell, J. C. Shaw et H. A. Simon. *Empirical explorations of the logic theory machine : a case study in heuristic*. In Papers presented at the February 26–28, 1957, western joint computer conference : Techniques for reliability, IRE-AIEE-ACM '57 (Western), pages 218–230, New York, NY, USA, 1957. ACM. (Cité en pages 13 et 18.)
- [Newell 1993] Allen Newell. *The knowledge level*, pages 136–176. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1993. (Cité en page 66.)
- [Parunak 1990] H. V. D. Parunak. *Distributed AI and Manufacturing Control : Some Issues and Insights*. In Y. Demazeau et J.-P. M ller, editeurs, Decentralized A.I. : Proc. of the First European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, Cambridge, England, pages 81–101. North-Holland, Amsterdam, 1990. (Cité en page 48.)
- [Picioreanu 2004] C. Picioreanu, J. U. Kreft et M. C. M. van Loosdrecht. *Particle-based multidimensional multispecies Biofilm model*. Applied and Environmental Microbiology, vol. 70, no. 5, pages 3024–3040, 2004. (Cité en page 115.)
- [Pommier 2005] Pascal Pommier. *Modélisation Spatiale et médico-économique des thérapeutiques innovantes :   propos du projet français ETOILE d'handron-thérapie par ions carbone*. PhD thesis, Université Claude Bernard, 2005. (Cité en pages 144, 150 et 183.)
- [Popper 1969] Karl Raimund Popper. *Conjectures and refutations : the growth of scientific knowledge*, by karl r. popper. Routledge & K. Paul, London,, 3rd ed. (revised).  dition, 1969. (Cité en page 9.)
- [Praehofer 2000] Herbert Praehofer, Tag Gon Kim et Bernard Zeigler. *Theory of modeling and simulation. Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic System*, 2000. (Cité en pages 10 et 79.)
- [Rector 1998] A. L. Rector. *Thesauri and formal classifications : terminologies for people and machines*. Methods of information in medicine, vol. 37, no. 4-5, pages 501–509, Novembre 1998. (Cité en page 66.)
- [Régnier 2004] P. Régnier. *Algorithmique de la planification en ia*. C padu s- d., 2004. (Cité en pages 124, 125 et 126.)

- [Rezaeian 2007] Mohsen Rezaeian, Graham Dunn, Selwyn St Leger et Louis Appleby. *Geographical epidemiology, spatial analysis and geographical information systems : a multidisciplinary glossary*. Journal of Epidemiology and Community Health, vol. 61, pages 98–102, 2007. (Cité en page 75.)
- [Roman 1981] Roman et Slowinski. *Multiobjective network scheduling with efficient use of renewable and nonrenewable resources*. European Journal of Operational Research, vol. 7, no. 3, pages 265–273, 1981. (Cité en page 130.)
- [Ross] Stéphane Ross, Sébastien Paquet et Brahim Chaib-draa. *DAMAS-Rescue 2006*. (Cité en page 115.)
- [Roztock 2008] Narzys Roztock. *Evaluating Investment For Services A Value Chain Analysis Framework*. Journal of Service Science - Fourth Quarter, vol. 1, no. 2, 2008. (Cité en page 143.)
- [Sacerdoti 1975] Earl D. Sacerdoti. *The nonlinear nature of plans*. In Proceedings of the 4th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 1, pages 206–214, San Francisco, CA, USA, 1975. Morgan Kaufmann Publishers Inc. (Cité en pages 125 et 126.)
- [SAiD 2003] Lamjed BEN SAiD. *Simulation multiagents des consommateurs*. PhD thesis, Université Paris 6, 2003. (Cité en page 116.)
- [Schirmer 2000] Andreas Schirmer et Andreas Drexl. *Allocation of Partially Renewable Resources – Concept, Capabilities, and Applications*, 2000. (Cité en page 130.)
- [Schwindt 2000] Christoph Schwindt et Norbert Trautmann. *Batch scheduling in process industries : an application of resource-constrained project scheduling*. OR Spectrum, vol. 22, pages 501–524, 2000. 10.1007/s002910000042. (Cité en page 130.)
- [Servat 1998] D. Servat, E. Perrier, J. P. Treuil et A Drogoul. *When Agents Emerge from Agents - Introducing Multi-scale Viewpoints in Multi-agent Simulations*. In MABS '98, Heidelberg, 1998. Springer-Verlag Berlin. (Cité en pages 114 et 115.)
- [Servat 2000] D. Servat. *Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion*. PhD thesis, Université Paris 6, 2000. (Cité en pages 114 et 115.)
- [Shank 1992] John K. Shank et Vijay Govindarajan. *Strategic Cost Management : The Value Chain Perspective*. Journal of Management Accounting Research, vol. 4, no. 4, pages 179–197, 1992. (Cité en page 143.)
- [Sim 2012] *SimPop*. <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr/home>, February 2012. (Cité en pages 114, 115 et 116.)
- [Słowiński 1994] Roman Słowiński, Bolesław Soniewicki et Jan Węglarz. *DSS for multiobjective project scheduling*. European Journal of Operational Research, vol. 79, no. 2, pages 220–229, 1994. (Cité en page 128.)

- [Smith 1980] Smith. *The Contract Net Protocol : High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver*. IEEE Transactions on Computers, vol. C-29, pages 1104–1113, 1980. (Cité en page 47.)
- [Steeb 1988] R. Steeb, S. Cammarata, Hayes F. A. Roth, P. W. Thorndyke et Wesson. *Distributed intelligence for air fleet control : Architectures for distributed air traffic control*. Readings in Distributed Artificial Intelligence, vol. 101, no. 3, pages 90–101, 1988. (Cité en pages 8 et 20.)
- [Steels 1993] Luc Steels. *The artificial life roots of artificial intelligence*. Artif. Life, vol. 1, pages 75–110, January 1993. (Cité en page 28.)
- [Strugeon 1995] E. Le Strugeon. *Une méthodologie d’auto-adaptation d’un système multi-agents cognitifs*. PhD thesis, Université de Valenciennes, 1995. (Cité en page 23.)
- [Tate 1994] Austin Tate, Brian Drabble et Richard Kirby. *O-Plan2 : an Open Architecture for Command, Planning and Control*. In Intelligent Scheduling, pages 213–239. Morgan Kaufmann, 1994. (Cité en page 125.)
- [Treuil 2008] J-P. Treuil, A. Drogoul et J-D. Zucker. Modélisation et simulation à base d’agents : Approches particulières, modèles à base d’agents, de la mise en pratique aux questions théoriques. Dunod, 2008. (Cité en pages 10, 114, 115 et 116.)
- [Uhrmacher 2009] Adelinde M. Uhrmacher et Danny Weyns. Multi-agent systems : Simulation and applications. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, 1st édition, 2009. (Cité en pages 18 et 51.)
- [Uschold 1996] Mike Uschold, Michael Gruninger, Mike Uschold et Michael Gruninger. *Ontologies : Principles, methods and applications*. Knowledge Engineering Review, vol. 11, pages 93–136, 1996. (Cité en page 67.)
- [van der Vlist 2002] Eric van der Vlist. Xml schema - the w3c’s object-oriented descriptions for xml. O’Reilly, 2002. (Cité en page 71.)
- [van Heijst 1997] G. van Heijst, A. Th Schreiber et B. J. Wielinga. *Using explicit ontologies in KBS development*. Int. J. Hum.-Comput. Stud., vol. 46, pages 183–292, March 1997. (Cité en page 66.)
- [Vanhoucke 2008] Mario Vanhoucke et Dieter Debels. *The impact of various activity assumptions on the lead time and resource utilization of resource-constrained projects*. Comput. Ind. Eng., vol. 54, no. 1, pages 140–154, feb 2008. (Cité en page 127.)
- [Varela 1993] Francisco Varela, Evan Thompson et Eleanor Rosch. L’inscription corporelle de l’esprit. Seuil, 1993. (Cité en page 37.)
- [Veloso 1993] Manuela M. Veloso et Jaime G. Carbonell. *Derivational Analogy in prodigy : Automating Case Acquisition*. In Storage, and Utilization. Machine Learning, 1993. (Cité en page 125.)
- [Volterra 1926] V. Volterra. *Variation and fluctuations of the number of individuals of animal species living together*. In Animal Ecology. McGraw-Hill, 1926. (Cité en page 8.)

- [Wainer 2001] Gabriel A. Wainer et Norbert Giambiasi. *Application of the Cell-DEVS Paradigm for Cell Spaces Modelling and Simulation*. Simulation, vol. 76, no. 1, pages 22–39, 2001. (Cité en page 79.)
- [Weglarz 1977] Jan Weglarz, Jacek Blazewicz, Wojciech Cellary et Roman Slowinski. *Algorithm 520 : An Automatic Revised Simplex Method for Constrained Resource Network Scheduling [H]*. ACM Trans. Math. Softw., vol. 3, pages 295–300, September 1977. (Cité en page 130.)
- [Werner 1992] Eric Werner et Yves Demazeau. *Decentralized a.i.* Elsevier, 1992. (Cité en page 27.)
- [Werner 1994] Gregory M. Werner. *Using second order neural connections for motivation of behavioral choices*. In Proceedings of the third international conference on Simulation of adaptive behavior : from animals to animats 3 : from animals to animats 3, pages 154–161, Cambridge, MA, USA, 1994. MIT Press. (Cité en page 27.)
- [Wilkins 1995] David E. Wilkins, Karen L. Myers, John D. Lowrance et Leonard P. Wesley. *Planning and Reacting in Uncertain and Dynamic Environments*. Journal of Experimental and Theoretical AI, vol. 7, no. 1, pages 197–227, 1995. (Cité en page 125.)
- [Wilkins 2001] David E. Wilkins et Mari Desjardins. *A Call for Knowledge-Based Planning*. The AI Magazine, vol. 22, no. 1, pages 99–115, 2001. (Cité en page 125.)
- [Xavier 2005] Joao B. Xavier, Cristian Picioreanu et Mark C. M. van Loosdrecht. *A framework for multidimensional modelling of activity and structure of multispecies biofilms*. Envir. Microbiol., vol. 7, 2005. (Cité en page 115.)
- [Yonezawa 1990] Akinori Yonezawa. *Abcl : an object-oriented concurrent system*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1990. (Cité en page 28.)
- [Zeghal 1993] K. Zeghal et Ferber Jacques. *Craash : A coordinated collision avoidance system*. European Simulation Multiconference, 1993. (Cité en page 51.)
- [Zlotkin 1993] Gilad Zlotkin et Jeffrey S Rosenschein. *A domain theory for task oriented negotiation*. In Proceedings of the 13th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 1, pages 416–422, San Francisco, CA, USA, 1993. Morgan Kaufmann Publishers Inc. (Cité en page 48.)

Index

- ABC, 69, 75, 142–145, 149
- Acteur, terme des multi-agents, 27, 28
- Action, 31, 37, 79, 91, 106, 116, 123, 165
- Agent, 12, 15, 23, 29, 32, 38, 41, 51, 53, 91, 98, 113, 116, 123, 165, 168, 175, 188, 203
- Agent communicant, 15, 32
- Agent de la liste d’attente, 106, 175
- Agent de la politique médicale, 101, 106, 113, 175
- Agent de planification, 106, 110, 131, 175
- Agent du centre, 91, 98, 100, 106, 110
- Agent du modèle de recrutement, 81, 120
- Agent du patient, 83, 85, 86, 88, 91
- Architecture multi-agents, 23, 28
- Attractivité, 59, 68, 74, 81, 83, 98, 120
- Bénéfice Médical, 59, 61, 71, 73, 83, 138, 171, 180
- Clé de répartition, 143, 193
- Collaboration, 34, 41, 50, 51, 106, 165, 167
- Couronne, 99, 116, 171
- Coût, 10, 57, 142, 145, 149, 154, 156, 193, 196, 197, 199
- Coût
- Coût direct, 143
- Coût indirect, 143
- Coût moyen, 144
- DDT, 88, 116, 120
- Environnement, 7, 12, 15, 16, 23, 29, 32, 34, 38, 50, 51, 53, 90, 91, 101, 106, 113, 116, 120, 167, 168, 203
- Générateur de patients, 81, 90, 116, 120, 175, 176
- Géographie, 59, 61, 71, 81, 83, 91, 98, 116, 178, 180, 199
- Gestionnaire des patients par groupes, 83, 175
- Groupe de priorité, 74, 83, 87, 88, 90, 91, 116, 131, 176, 180
- IA, 12, 16, 123, 131
- Incidence, 66, 71, 72, 81, 171, 180
- Indication, 59, 68, 71, 73, 76, 81, 83, 85–88, 91, 101, 106, 110, 131, 134, 136, 138, 154, 168, 171, 175, 176, 178, 188, 191
- Liste d’attente, 91, 101, 106, 175, 176
- Méta-Modèle, 79, 113, 114, 120
- Modèle, 7, 8, 10, 12, 16, 29, 38, 41, 61, 65, 123, 165
- Modèle de Planification, 61, 81, 110, 113, 123, 131, 175, 180, 188, 191, 203
- Modèle de Recrutement, 61, 65, 131, 161, 167, 168, 171, 178, 188, 197, 199
- Modèle Économique, 10, 61, 142, 197
- Modèle Médico-économique, 61, 68, 154, 196
- Multi-agents, 7, 12, 16, 23, 61, 85, 113, 165
- Ordre géographique des centres, 75
- Organisation des agents, 16
- Planification, 51, 53, 61, 81, 101, 106, 110, 113, 123, 175, 176, 180, 188, 191, 203
- Politique médicale, 57, 61, 101, 106, 110, 113, 116, 120, 131, 161, 162, 168, 175, 178

Processus, 7, 11, 65, 165

Protocole, 65, 73, 123, 165

Règle politique médicale, 101

Simulation par agents, 16

Système multi-agents, 14

Temps réservé, 102

Annexe 1 : Schémas de définition des documents XML

8.1 Exemples de schémas de définition des données médicales pour le modèle de recrutement

8.1.1 Exemple de fichier XSD Géographie

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  xmlns:geography="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/GeographyGrammar"
  targetNamespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/GeographyGrammar"
  elementFormDefault="qualified"
  attributeFormDefault="unqualified">

  <xs:annotation>
    <xs:documentation xml:lang="en">
      Geography's description
    </xs:documentation>
  </xs:annotation>

  <xs:element name="Geography" type="geography:GeographyType"/>

  <xs:complexType name="GeographyType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="Parameters" type="geography:ParametersType" minOccurs="1"
        maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="ExternalModel" type="geography:ExternalModelType"
        maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="ParametersType">
    </xs:complexType>

  <xs:complexType name="ExternalModelType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="Item" type="geography:ItemType" minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="ItemType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="name" type="xs:string"/>
      <xs:choice>
        <xs:element name="population" type="xs:positiveInteger" minOccurs="1"
          maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="Item" type="geography:ItemType" minOccurs="1"
          maxOccurs="unbounded"/>
      </xs:choice>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

</xs:schema>
```

8.1.2 Exemple de fichier XSD Indication

```
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  targetNamespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/IndicationsGrammar"
  xmlns:indications="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/IndicationsGrammar"
  xmlns:indication="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/IndicationsGrammar"
  elementFormDefault="qualified">
```

226 Chapitre 8. Annexe 1 : Schémas de définition des documents XML

```
        attributeFormDefault="unqualified">

    <xs:annotation>
    <xs:documentation xml:lang="en">
        Indications' description
    </xs:documentation>
</xs:annotation>

    <xs:element name="Indications" type="indications:IndicationsType"/>

<xs:complexType name="IndicationsType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="Indication" type="indication:IndicationType" minOccurs="1"
            maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="IndicationType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="name" type="xs:string"/>
        <xs:element name="Parameters" type="indication:ParametersType" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="ExternalModel" type="indication:ExternalModel" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="ParametersType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="maxWaitingTime" type="xs:integer" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="ExternalModel">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="Description" type="indication:DescriptionType" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="TechnicalConstraints" type="xs:string" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="DescriptionType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="Localization" type="xs:string" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="TherapeuticElements" type="xs:string" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="Histology" type="xs:string" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="TumourousStage" type="xs:string" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

</xs:schema>
```

8.1.3 Exemple de fichier XSD Données Épidémiologiques

```
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
    targetNamespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/IncidencesGrammar"
    xmlns:incidences="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/IncidencesGrammar"
    xmlns:incidence="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/IncidencesGrammar"
    elementFormDefault="qualified"
    attributeFormDefault="unqualified">

    <xs:annotation>
    <xs:documentation xml:lang="en">
        Incidences' description
    </xs:documentation>
</xs:annotation>

    <xs:element name="Incidences" type="incidences:IncidencesType"/>

<xs:complexType name="IncidencesType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="Incidence" type="incidence:IncidenceType" minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="IncidenceType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="nameIndication" type="xs:string"/>
        <xs:element name="Parameters" type="incidence:ParametersType" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="ExternalModel" type="incidence:ExternalModel" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="ParametersType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="Item" type="incidence:ItemType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>
```

```

    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="ItemType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="nameItem" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="mean" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="stdDeviation" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="ExternalModel">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="Age" type="incidence:AgeType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="AgeType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="age" type="xs:int" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="Item" type="incidence:ItemType"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:schema>

```

8.1.4 Exemple de fichier XSD Données d'Attractivité

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  targetNamespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/Attractivity"
  xmlns:attractivities="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/Attractivity"
  xmlns:attractivity="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/Attractivity"
  elementFormDefault="qualified"
  attributeFormDefault="unqualified">

  <xs:annotation>
    <xs:documentation xml:lang="en">
      Describe attractivity value of each priority group according to each crown
    </xs:documentation>
  </xs:annotation>

  <xs:element name="Attractivities" type="attractivities:AttractivitiesType"/>

  <xs:complexType name="AttractivitiesType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="Attractivity" type="attractivity:AttractivityType" minOccurs="1"
        maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="AttractivityType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="priorityLevelValue" type="xs:positiveInteger" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="Crowns" type="attractivity:CrownsType" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="CrownsType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="Crown" type="attractivity:CrownType" minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="CrownType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="zoneName" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="attractivityValue" type="xs:nonNegativeInteger" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:schema>

```

8.2 Exemples de schémas de définition de données économiques

8.2.1 Exemple de fichier XSD Protocol

228 Chapitre 8. Annexe 1 : Schémas de définition des documents XML

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  targetNamespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/ProtocolCostGrammar"
  xmlns:protocolsCost="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/ProtocolCostGrammar"
  xmlns:protocolCost="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/ProtocolCostGrammar"
  elementFormDefault="qualified"
  attributeFormDefault="unqualified">

  <xs:annotation>
    <xs:documentation xml:lang="en">
      Protocols' cost description
    </xs:documentation>
  </xs:annotation>

  <xs:element name="Protocols" type="protocolsCost:ProtocolsType"/>

  <xs:complexType name="ProtocolsType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="Protocol" type="protocolCost:ProtocolType" minOccurs="1"
        maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="ProtocolType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="name" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="duration" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="Session" type="protocolCost:SessionType" minOccurs="1"
        maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="SessionType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="numberOfSessions" type="xs:integer" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="Activity" type="protocolCost:ActivityType" minOccurs="1"
        maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="ActivityType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="name" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="nbOcurrences" type="xs:integer" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:choice>
        <xs:element name="ShortDescription" type="protocolCost:shortDescriptionType"/>
        <xs:element name="FullDescription" type="protocolCost:fullDescriptionType"/>
      </xs:choice>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="shortDescriptionType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="duration" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="meanCost" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="fullDescriptionType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="Personnels" type="protocolCost:PersonnelsType" minOccurs="1"
        maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="Equipments" type="protocolCost:EquipmentsType" minOccurs="1"
        maxOccurs="1"/>
      <xs:element name="Consumables" type="protocolCost:ConsumablesType" minOccurs="1"
        maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="PersonnelsType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="Personnel" type="protocolCost:PersonnelType" minOccurs="1"
        maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

  <xs:complexType name="PersonnelType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="name" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <!-- choice between medical personnel, non medical personnel -->
      <xs:element name="isMedicalStaff" type="xs:boolean" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <!--when this a medical staff-->
      <xs:element name="medicalActivity" type="xs:boolean" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

```

```

        <!--when this is a direct medical activity-->
        <xs:element name="timeDuration" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="nbPersonnel" type="xs:integer" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="EquipmentsType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="Equipment" type="protocolCost:EquipmentType" minOccurs="1"
            maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="EquipmentType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="name" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="type" type="protocolCost:EquipmentTypeType" minOccurs="1"
            maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="timeDuration" type="xs:double" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
        <!-- equipment could be null if it is a mean value per examination mean value
            for the whole center -->
        <xs:element name="outsideEquipmentValuePerHour" type="xs:double" minOccurs="0"
            maxOccurs="1"/> <!-- the mean cost for an equipment outside the center -->
        <!--if the equipment is outside the center, then I have to know if it is a part
            from the preparation phase-->
        <xs:element name="preparationPhase" type="xs:boolean" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:simpleType name="EquipmentTypeType">
    <xs:restriction base="xs:string">
        <xs:enumeration value="Technical"/> <!-- preparation phase -->
        <xs:enumeration value="Medical"/> <!-- irradiation phase -->
        <xs:enumeration value="Other"/> <!-- other description -->
    </xs:restriction>
</xs:simpleType>

<xs:complexType name="ConsumablesType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="Consumable" type="protocolCost:ConsumableType" minOccurs="1"
            maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="ConsumableType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="name" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
        <!-- the cost is computed by the prototype -->
    </xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:schema>

```

8.2.2 Exemple de fichier XSD Centre

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
    targetNamespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/CentersCostGrammar"
    xmlns:centersCost="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/CentersCostGrammar"
    xmlns:centerCost="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/CentersCostGrammar"
    xmlns:equipments="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/EquipmentsGrammar"
    xmlns:consumables="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/ConsumablesGrammar"
    xmlns:buildings="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/BuildingsGrammar"
    xmlns:financials="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/FinancialsGrammar"
    xmlns:personnels="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/PersonnelsGrammar"
    elementFormDefault="qualified"
    attributeFormDefault="unqualified">

    <xs:annotation>
        <xs:documentation xml:lang="en">
            Centers' cost description
        </xs:documentation>
    </xs:annotation>

    <xs:import namespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/EquipmentsGrammar"
        schemaLocation="EquipmentsGrammar.xsd"/>

    <xs:import namespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/ConsumablesGrammar"
        schemaLocation="ConsumablesGrammar.xsd"/>

    <xs:import namespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/BuildingsGrammar"
        schemaLocation="BuildingsGrammar.xsd"/>

```

230 Chapitre 8. Annexe 1 : Schémas de définition des documents XML

```
<xs:import namespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/FinancialsGrammar"
  schemaLocation="FinancialsGrammar.xsd"/>
<xs:import namespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/CostModel/PersonnelsGrammar"
  schemaLocation="PersonnelsGrammar.xsd"/>
<xs:element name="Centers" type="centerCost:CentersType"/>
<xs:complexType name="CentersType">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="Center" type="centerCost:CenterType" minOccurs="1"
      maxOccurs="unbounded"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>
<xs:complexType name="CenterType">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="name" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="nbDays" type="xs:Integer" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="nbHoursPerDay" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element ref="personnels:Personnels" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element ref="equipments:Equipments" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element ref="consumables:Consumables" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element ref="buildings:Buildings" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="ListOfProtocols" type="centerCost:ListOfProtocolsType"
      minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <!-- financial are optional, they don't exist in all therapy centers -->
    <xs:element ref="financials:Financials" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>
<xs:complexType name="ListOfProtocolsType">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="ProtocolDescription" type="centerCost:ProtocolDescriptionType"
      minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>
<xs:complexType name="ProtocolDescriptionType">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="protocolName" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="nbOccurrences" type="xs:integer" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:schema>
```

8.3 Exemples de schémas de définitions des données médico-économiques

8.3.1 Exemple de fichier XSD Protocol

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  targetNamespace="mySpace/XML/XMLDefinitions/MEMModel/ProtocolsEcoCostGrammar"
  xmlns:protocols="mySpace/XML/XMLDefinitions/MEMModel/ProtocolsEcoCostGrammar"
  xmlns:protocol="mySpace/XML/XMLDefinitions/MEMModel/ProtocolsEcoCostGrammar"
  elementFormDefault="qualified"
  attributeFormDefault="unqualified">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation xml:lang="en">
      GHS' cost description
    </xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:element name="Protocols" type="protocols:ProtocolsType"/>
  <xs:complexType name="ProtocolsType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="Protocol" type="protocol:ProtocolType" minOccurs="1"
        maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
  <xs:complexType name="ProtocolType">
    <xs:sequence>
      <xs:element name="name" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
      <xs:choice>
```

```

        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="LongDescription" type="protocol:LongDescriptionType"
        minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    </xs:choice>
</xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="ShortDescriptionType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="meanPrice" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="LongDescriptionType">
    <xs:sequence>
        <xs:element name="numberGhsPreparationPhase" type="xs:long" minOccurs="1"
        maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="numberGhsIrradiationPhase" type="xs:long" minOccurs="1"
        maxOccurs="1"/>
        <xs:element name="numberOfIrradiationPhases" type="xs:integer" minOccurs="1"
        maxOccurs="1"/>
    </xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:schema>

```

8.3.2 Exemple de fichier XSD Therapie

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
    targetNamespace="mySpace/src/XML/XMLDefinitions/MEModel/TherapiesGrammar"
    xmlns:therapies="mySpace/XML/XMLDefinitions/MEModel/TherapiesGrammar"
    xmlns:therapy="mySpace/XML/XMLDefinitions/MEModel/TherapiesGrammar"
    elementFormDefault="qualified"
    attributeFormDefault="unqualified">

    <xs:annotation>
        <xs:documentation xml:lang="en">
            Therapies' cost description
        </xs:documentation>
    </xs:annotation>

    <xs:element name="Therapies" type="therapies:TherapiesType"/>

    <xs:complexType name="TherapiesType">
        <xs:sequence>
            <xs:element name="Therapy" type="therapy:TherapyType" minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"/>
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>

    <xs:complexType name="TherapyType">
        <xs:sequence>
            <xs:element name="nameIndication" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
            <xs:element name="nameTherapy" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
            <xs:element name="percAvoidedTumorProgression" type="xs:double" minOccurs="1"
                maxOccurs="1"/>
            <xs:element name="nbPatientsNoTherapy" type="xs:integer" minOccurs="1"
                maxOccurs="1"/>
            <xs:element name="nbPatientsFailure" type="xs:integer" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
            <xs:element name="nbPatientsTumorControl" type="xs:integer" minOccurs="1"
                maxOccurs="1"/>
            <!-- the list of protocols associated to this indication -->
            <!-- contains also the name of each protocol and the therapy description
                of each of them -->
            <xs:element name="ProtocolsList" type="therapy:ProtocolsListType" minOccurs="1"
                maxOccurs="1"/>
            <!-- the post therapy phase could be : follow up, complication, recurrence,
                demise ordered by the date-->
            <xs:element name="PostTherapyPhase" type="therapy:PostTherapyPhaseType"
                minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>

    <xs:complexType name="PostTherapyPhaseType">
        <xs:sequence>
            <xs:element name="PostTherapyDescriptionElement"
                type="therapy:PostTherapyDescriptionElementType" minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"/>
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>

    <xs:complexType name="PostTherapyDescriptionElementType">
        <xs:sequence>

```

232 Chapitre 8. Annexe 1 : Schémas de définition des documents XML

```
<xs:element name="date" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
<xs:element name="DescriptionByDate" type="therapy:DescriptionByDateType"
  minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"/>
</xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:simpleType name="PostTherapyItemNameType">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:enumeration value="Follow up"/>
    <xs:enumeration value="Toxicity (acute & light)"/>
    <xs:enumeration value="Recurrence"/>
    <xs:enumeration value="Death"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

<xs:complexType name="DescriptionByDateType">
  <xs:sequence>
    <!-- the name could be only one of follow up, complications, recurrences, demise -->
    <xs:element name="name" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="PostTherapyItem" type="therapy:PostTherapyItemType" minOccurs="1"
      maxOccurs="1"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="PostTherapyItemType">
  <xs:sequence>
    <!-- the name of the post therapy item :
    follow up -> follow up ; complications -> name of the complication ;
    recurrences -> the name of the recurrence ; demise -> demise -->
    <xs:element name="name" type="therapy:PostTherapyItemNameType" minOccurs="1"
      maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="probability" type="xs:double" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="ActsList" type="therapy:ActsListType" minOccurs="1"
      maxOccurs="1"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="ActsListType">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="Act" type="therapy:ActType" minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="ActType">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="nameAct" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="nbOccurrences" type="xs:integer" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="ProtocolsListType">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="ProtocolDescription" type="therapy:ProtocolDescriptionType"
      minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="ProtocolDescriptionType">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="nameProtocol" type="xs:string" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="TherapyDescription" type="therapy:TherapyDescriptionType"
      minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="GHSDescriptionType">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="preparationPhaseGHS" type="xs:long" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="numberOfIrradiationSessions" type="xs:integer" minOccurs="1"
      maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="irradiationSessionGHS" type="xs:long" minOccurs="1"
      maxOccurs="1"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:complexType name="CostModelDescriptionType">
  <xs:sequence>
    <xs:element name="preparationPhaseCost" type="xs:double" minOccurs="1"
      maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="numberOfIrradiationSessions" type="xs:integer" minOccurs="1"
      maxOccurs="1"/>
    <xs:element name="irradiationSessionCost" type="xs:double" minOccurs="1"
      maxOccurs="1"/>
  </xs:sequence>
</xs:complexType>
```

```
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>

    <xs:complexType name="UserModelDescription">
        <xs:sequence>
            <xs:element name="priceProtocol" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>

    <xs:complexType name="TherapyDescriptionType">
        <xs:sequence>
            <xs:element name="MedicalHospitalization" type="therapy:ItemType" minOccurs="0"
                maxOccurs="1"/>
            <xs:element name="HomeCare" type="therapy:ItemType" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
            <xs:element name="Transportation" type="therapy:ItemType" minOccurs="0"
                maxOccurs="1"/>
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>

    <xs:complexType name="ItemType">
        <xs:sequence>
            <xs:element name="unitCost" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
            <xs:element name="percentagePatients" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
            <xs:element name="meanOccurencies" type="xs:double" minOccurs="1" maxOccurs="1"/>
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>
</xs:schema>
```


Annexe 2 Exemple de fichier xml

9.1 Fichier XML pour le modèle de recrutement

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
<data:Data
  xmlns:activities="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/Attractivity"
  xmlns:attractivity="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/Attractivity"
  xmlns:cHadrontherapy="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/CenterHadrontherapy"
  xmlns:center="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/CentersGrammar"
  xmlns:centerCrowns="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/CentersCrownsGrammar"
  xmlns:centers="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/CentersGrammar"
  xmlns:centersCrowns="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/CentersCrownsGrammar"
  xmlns:clpg="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/ClinicalR_PriorityG"
  xmlns:clpgs="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/ClinicalR_PriorityG"
  xmlns:data="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/CompleteSchema"
  xmlns:geography="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/GeographyGrammar"
  xmlns:incidence="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/IncidencesGrammar"
  xmlns:incidences="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/IncidencesGrammar"
  xmlns:indication="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/IndicationsGrammar"
  xmlns:indications="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/IndicationsGrammar"
  xmlns:order="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/OrdersGeoItemsCenters"
  xmlns:orders="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/OrdersGeoItemsCenters"
  xmlns:pExtendedModel="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/ProtocolExtendedModel"
  xmlns:pHadrontherapy="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/ProtocolHadrontherapy"
  xmlns:pParameters="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/ProtocolsParameters"
  xmlns:pcDefinitions="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/ProtocolDefinitionsCommon"
  xmlns:protocol="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/ProtocolsGrammar"
  xmlns:protocols="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/ProtocolsGrammar"
  xmlns:room="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/RoomGrammar"
  xmlns:rooms="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/RoomGrammar"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/CompleteSchema
file:///mySpace/XML/XMLDefinitions/RecruitmentModel/CompleteSchema.xsd">
<data:Id>2010-10-31</data:Id>
<data:Model>Hadrontherapy</data:Model>
<data:SimpleData>
<geography:Geography>
<geography:Parameters/>
<geography:ExternalModel>
<geography:Item>
<geography:name>CHAMPAGNE ARDENNE</geography:name>
<geography:Item>
<geography:name>CHAMPAGNE ARDENNE*</geography:name>
<geography:population>1325374</geography:population>
</geography:Item>
</geography:Item>
<geography:Item>
<geography:name>BOURGOGNE</geography:name>
<geography:Item>
<geography:name>BOURGOGNE*</geography:name>
<geography:population>1625279</geography:population>
</geography:Item>
</geography:Item>
<geography:Item>
<geography:name>CORSE</geography:name>
<geography:Item>
<geography:name>CORSE*</geography:name>
<geography:population>281464</geography:population>
</geography:Item>
</geography:Item>
<geography:Item>
<geography:name>BASSE NORMANDIE</geography:name>
<geography:Item>
<geography:name>BASSE NORMANDIE*</geography:name>
```

```

<geography:population>785326</geography:population>
</geography:Item>
<geography:Item>
<geography:name>CAEN</geography:name>
<geography:population>120461</geography:population>
</geography:Item>
<geography:Item>
<geography:name>CALVADOS</geography:name>
<geography:population>564293</geography:population>
</geography:Item>
...
</geography:ExternalModel>
</geography:Geography>
<indications:Indications>
<indication:Indication>
<indication:name>Bone sarcoma</indication:name>
<indication:Parameters>
<indication:maxWaitingTime>-1</indication:maxWaitingTime>
</indication:Parameters>
<indication:ExternalModel>
<indication:Description>
<indication:Localization/>
<indication:TherapeuticElements> </indication:TherapeuticElements>
<indication:Histology> </indication:Histology>
<indication:TumourousStage> </indication:TumourousStage>
</indication:Description>
<indication:TechnicalConstraints> </indication:TechnicalConstraints>
</indication:ExternalModel>
</indication:Indication>
<indication:Indication>
<indication:name>Chondrosarcoma BOS</indication:name>
<indication:Parameters>
<indication:maxWaitingTime>-1</indication:maxWaitingTime>
</indication:Parameters>
<indication:ExternalModel>
<indication:Description>
<indication:Localization/>
<indication:TherapeuticElements> </indication:TherapeuticElements>
<indication:Histology> </indication:Histology>
<indication:TumourousStage> </indication:TumourousStage>
</indication:Description>
<indication:TechnicalConstraints> </indication:TechnicalConstraints>
</indication:ExternalModel>
...
</indications:Indications>
<protocols:Protocols>
<protocol:Protocol>
<protocol:name>C ions Boost H beam</protocol:name>
<protocol:HadrontherapyCommon>
<pHadrontherapy:particle>C</pHadrontherapy:particle>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>H</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>0.0</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>V</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>0.000</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>HV</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>0.0</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>G</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>0.0</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
</protocol:HadrontherapyCommon>
<protocol:Parameters>
<pParameters:PreparationPhase>
<pParameters:Localization/>
<pParameters:Description/>
</pParameters:PreparationPhase>
<pParameters:IrradiationPhase>
<pParameters:HadrontherapyBeam/>
<pParameters:GeneralAnaesthesia/>
<pParameters:ImmobilizationTime>
<pcDefinitions:DescriptionTimePerSession>
<pcDefinitions:nbSessions>10</pcDefinitions:nbSessions>
<pcDefinitions:meanDuration>28.3</pcDefinitions:meanDuration>
<pcDefinitions:minGap>1</pcDefinitions:minGap>
<pcDefinitions:maxGap>3</pcDefinitions:maxGap>
</pcDefinitions:DescriptionTimePerSession>
<pcDefinitions:maxGapForTreatment>20</pcDefinitions:maxGapForTreatment>
</pParameters:ImmobilizationTime>

```

```

<pParameters:Equipment>
<pcDefinitions:name>PET</pcDefinitions:name>
<pcDefinitions:utility>Not Useful</pcDefinitions:utility>
</pParameters:Equipment>
<pParameters:Equipment>
<pcDefinitions:name>Scanner</pcDefinitions:name>
<pcDefinitions:utility>Not Useful</pcDefinitions:utility>
</pParameters:Equipment>
</pParameters:IrradiationPhase>
</protocol:Parameters>
</protocol:Protocol>
<protocol:Protocol>
<protocol:name>C ions Boost HV-Gc</protocol:name>
<protocol:HadrontherapyCommon>
<pHadrontherapy:particle>C</pHadrontherapy:particle>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>H</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>100.0</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>V</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>00.000</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>HV</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>30.0</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>G</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>0.0</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
</protocol:HadrontherapyCommon>
<protocol:Parameters>
<pParameters:PreparationPhase>
<pParameters:Localization/>
<pParameters:Description/>
</pParameters:PreparationPhase>
<pParameters:IrradiationPhase>
<pParameters:HadrontherapyBeam/>
<pParameters:GeneralAnaesthesia/>
<pParameters:ImmobilizationTime>
<pcDefinitions:DescriptionTimePerSession>
<pcDefinitions:nbSessions>10</pcDefinitions:nbSessions>
<pcDefinitions:meanDuration>36.3</pcDefinitions:meanDuration>
<pcDefinitions:minGap>1</pcDefinitions:minGap>
<pcDefinitions:maxGap>3</pcDefinitions:maxGap>
</pcDefinitions:DescriptionTimePerSession>
<pcDefinitions:maxGapForTreatment>20</pcDefinitions:maxGapForTreatment>
</pParameters:ImmobilizationTime>
<pParameters:Equipment>
<pcDefinitions:name>PET</pcDefinitions:name>
<pcDefinitions:utility>Not Useful</pcDefinitions:utility>
</pParameters:Equipment>
<pParameters:Equipment>
<pcDefinitions:name>Scanner</pcDefinitions:name>
<pcDefinitions:utility>Not Useful</pcDefinitions:utility>
</pParameters:Equipment>
</pParameters:IrradiationPhase>
</protocol:Parameters>
</protocol:Protocol>
<protocol:Protocol>
<protocol:name>C ions exclusive H beam</protocol:name>
<protocol:HadrontherapyCommon>
<pHadrontherapy:particle>C</pHadrontherapy:particle>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>H</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>0.0</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>V</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>00.000</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>HV</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>0.0</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:BeamLoss>
<pHadrontherapy:beam>G</pHadrontherapy:beam>
<pHadrontherapy:lossValue>0.0</pHadrontherapy:lossValue>
</pHadrontherapy:BeamLoss>
</protocol:HadrontherapyCommon>
<protocol:Parameters>
<pParameters:PreparationPhase>
<pParameters:Localization/>

```

```

<pParameters:Description/>
</pParameters:PreparationPhase>
<pParameters:IrradiationPhase>
<pParameters:HadrontherapyBeam/>
<pParameters:GeneralAnaesthesia/>
<pParameters:ImmobilizationTime>
<pcDefinitions:DescriptionTimePerSession>
<pcDefinitions:nbSessions>10</pcDefinitions:nbSessions>
<pcDefinitions:meanDuration>60.5</pcDefinitions:meanDuration>
<pcDefinitions:minGap>1</pcDefinitions:minGap>
<pcDefinitions:maxGap>3</pcDefinitions:maxGap>
</pcDefinitions:DescriptionTimePerSession>
<pcDefinitions:maxGapForTreatment>20</pcDefinitions:maxGapForTreatment>
</pParameters:ImmobilizationTime>
<pParameters:Equipment>
<pcDefinitions:name>PET</pcDefinitions:name>
<pcDefinitions:utility>Not Useful</pcDefinitions:utility>
</pParameters:Equipment>
<pParameters:Equipment>
<pcDefinitions:name>Scanner</pcDefinitions:name>
<pcDefinitions:utility>Not Useful</pcDefinitions:utility>
</pParameters:Equipment>
</pParameters:IrradiationPhase>
</protocol:Parameters>
</protocol:Protocol>
...
</protocols:Protocols>
<centers:Centers>
<center:Center>
<center:name>CPO_new</center:name>
<center:localization>PARIS</center:localization>
<center:Speciality>
<center:HadrontherapyCommonCenter>
<cHadrontherapy:Particle>
<cHadrontherapy:particle>P</cHadrontherapy:particle>
</cHadrontherapy:Particle>
<cHadrontherapy:Energy>
<cHadrontherapy:energy>High Energy</cHadrontherapy:energy>
</cHadrontherapy:Energy>
</center:HadrontherapyCommonCenter>
<center:Equipment>
<center:name>Cyclotron</center:name>
</center:Equipment>
</center:Speciality>
<center:ReservedTime>
<center:PriorityRT>
<center:priority>1</center:priority>
<center:maxUse>12</center:maxUse><!-- 12 -->
</center:PriorityRT>
<center:PriorityRT>
<center:priority>2</center:priority>
<center:maxUse>10</center:maxUse>
</center:PriorityRT>
<center:PriorityRT>
<center:priority>3</center:priority>
<center:maxUse>10</center:maxUse>
</center:PriorityRT>
<center:PriorityRT>
<center:priority>4</center:priority>
<center:maxUse>11</center:maxUse>
</center:PriorityRT>
<center:PriorityRT>
<center:priority>5</center:priority>
<center:maxUse>11</center:maxUse>
</center:PriorityRT>
<center:PriorityRT>
<center:priority>6</center:priority>
<center:maxUse>11</center:maxUse>
</center:PriorityRT>
<center:PriorityRT>
<center:priority>7</center:priority>
<center:maxUse>11</center:maxUse>
</center:PriorityRT>
<center:PriorityRT>
<center:priority>8</center:priority>
<center:maxUse>12</center:maxUse>
</center:PriorityRT>
<center:PriorityRT>
<center:priority>9</center:priority>
<center:maxUse>0</center:maxUse>
</center:PriorityRT>
</center:ReservedTime>
<center:Exclusion/>
<center:Inclusion/>

```

```

<center:Functioning>
<rooms:Rooms>
<room:Room>
<room:nameRoom>room_0</room:nameRoom>
<room:capacity>165540</room:capacity>
<room:MedicalEquipment>
<room:PreparationPhase/>
<room:IrradiationPhase>
<room:HadrontherapyCommonRoom>
<cHadrontherapy:Particle>
<cHadrontherapy:particle>Pe</cHadrontherapy:particle>
<cHadrontherapy:particle>P</cHadrontherapy:particle>
</cHadrontherapy:Particle>
<cHadrontherapy:Beam>
<cHadrontherapy:name>H</cHadrontherapy:name>
</cHadrontherapy:Beam>
</room:HadrontherapyCommonRoom>
</room:IrradiationPhase>
</room:MedicalEquipment>
</room:Room>
<room:Room>
<room:nameRoom>room_1</room:nameRoom>
<room:capacity>165540</room:capacity>
<room:MedicalEquipment>
<room:PreparationPhase/>
<room:IrradiationPhase>
<room:HadrontherapyCommonRoom>
<cHadrontherapy:Particle>
<cHadrontherapy:particle>Pe</cHadrontherapy:particle>
<cHadrontherapy:particle>P</cHadrontherapy:particle>
</cHadrontherapy:Particle>
<cHadrontherapy:Beam>
<cHadrontherapy:name>H</cHadrontherapy:name>
</cHadrontherapy:Beam>
</room:HadrontherapyCommonRoom>
</room:IrradiationPhase>
</room:MedicalEquipment>
</room:Room>
<room:Room>
<room:nameRoom>room_2</room:nameRoom>
<room:capacity>156840</room:capacity>
<room:MedicalEquipment>
<room:PreparationPhase/>
<room:IrradiationPhase>
<room:HadrontherapyCommonRoom>
<cHadrontherapy:Particle>
<cHadrontherapy:particle>P</cHadrontherapy:particle>
</cHadrontherapy:Particle>
<cHadrontherapy:Beam>
<cHadrontherapy:name>Gantry</cHadrontherapy:name>
</cHadrontherapy:Beam>
</room:HadrontherapyCommonRoom>
</room:IrradiationPhase>
</room:MedicalEquipment>
</room:Room>
</rooms:Rooms>
</center:Functioning>
</center:Center>
...
</centers:Centers>
</data:SimpleData>
<data:TableData>
<incidences:Incidences>
<incidence:Incidence>
<incidence:nameIndication>Bone_sarcoma</incidence:nameIndication>
<incidence:Parameters>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>CHAMPAGNE_ARDENE*</incidence:nameItem>
<incidence:mean>5.3</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>1.0</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>BOURGOGNE*</incidence:nameItem>
<incidence:mean>6.4</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>1.2</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>CORSE*</incidence:nameItem>
<incidence:mean>1.1</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>0.2</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>BASSE_NORMANDIE*</incidence:nameItem>
<incidence:mean>3.1</incidence:mean>

```

```

<incidence:stdDeviation>0.6</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>CAEN</incidence:nameItem>
<incidence:mean>0.5</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>0.1</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>CALVADOS</incidence:nameItem>
<incidence:mean>2.2</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>0.4</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>DOM TOM* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>7.6</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>1.4</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>LYON</incidence:nameItem>
<incidence:mean>1.9</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>0.4</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>RHONE ALPES* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>17.9</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>3.3</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>RHONE* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>4.9</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>0.9</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>NORD PAS DE CALAIS* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>15.8</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>2.9</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>BRETAGNE* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>12.5</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>2.3</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>CENTRE* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>10.1</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>1.8</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>HAUTE NORMANDIE* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>7.2</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>1.3</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>LORRAINE* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>9.3</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>1.7</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>ALPES MARITIMES* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>2.9</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>0.5</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>NICE</incidence:nameItem>
<incidence:mean>1.5</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>0.3</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>PACA* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>15.6</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>2.8</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>ALSACE* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>7.3</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>1.3</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>AUVERGNE* </incidence:nameItem>
<incidence:mean>5.3</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>1.0</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>PAYS DE LA LOIRE* </incidence:nameItem>

```

```

<incidence:mean>14.0</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>2.5</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>POITOU CHARENTES*</incidence:nameItem>
<incidence:mean>6.9</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>1.3</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>MIDI PYRENNEES*</incidence:nameItem>
<incidence:mean>11.3</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>2.1</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>FRANCHE COMTE*</incidence:nameItem>
<incidence:mean>4.6</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>0.8</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>LANGUEDOS ROUSSILLON*</incidence:nameItem>
<incidence:mean>10.5</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>1.9</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
<incidence:Item>
<incidence:nameItem>PICARDIE*</incidence:nameItem>
<incidence:mean>7.5</incidence:mean>
<incidence:stdDeviation>1.4</incidence:stdDeviation>
</incidence:Item>
..
</incidence:Incidence>
</incidences:Incidences>
<clpgs:ClinicalResearchAndPriorityGroups>
<clpg:ClinicalResearchAndPriorityGroup>
<clpg:nameIndication>Bone sarcoma</clpg:nameIndication>
<clpg:Protocol>
<clpg:nameProtocol>Sarcoma C ions exclusive</clpg:nameProtocol>
<clpg:ClinicalResearchPhase>
<clpg:phase>2</clpg:phase>
</clpg:ClinicalResearchPhase>
<clpg:PriorityGroup>
<clpg:priorityGroup>2</clpg:priorityGroup>
<clpg:level>B1</clpg:level>
<clpg:gain>1</clpg:gain>
</clpg:PriorityGroup>
</clpg:Protocol>
<clpg:Protocol>
<clpg:nameProtocol>Sarcoma Protons exclusive</clpg:nameProtocol>
<clpg:ClinicalResearchPhase>
<clpg:phase>2</clpg:phase>
</clpg:ClinicalResearchPhase>
<clpg:PriorityGroup>
<clpg:priorityGroup>5</clpg:priorityGroup>
<clpg:level>C</clpg:level>
<clpg:gain>2</clpg:gain>
</clpg:PriorityGroup>
</clpg:Protocol>
<clpg:Protocol>
<clpg:nameProtocol>X-rays</clpg:nameProtocol>
<clpg:ClinicalResearchPhase>
<clpg:phase>-1</clpg:phase>
</clpg:ClinicalResearchPhase>
<clpg:PriorityGroup>
<clpg:priorityGroup>-1</clpg:priorityGroup>
</clpg:PriorityGroup>
<clpg:referentProtocol>true</clpg:referentProtocol>
</clpg:Protocol>
</clpg:ClinicalResearchAndPriorityGroup>
<clpg:ClinicalResearchAndPriorityGroup>
<clpg:nameIndication>Chondrosarcoma BOS</clpg:nameIndication>
<clpg:Protocol>
<clpg:nameProtocol>Chordoma C ions exclusive</clpg:nameProtocol>
<clpg:ClinicalResearchPhase>
<clpg:phase>4</clpg:phase>
</clpg:ClinicalResearchPhase>
<clpg:PriorityGroup>
<clpg:priorityGroup>3</clpg:priorityGroup>
<clpg:level>C</clpg:level>
<clpg:gain>1</clpg:gain>
</clpg:PriorityGroup>
</clpg:Protocol>
<clpg:Protocol>
<clpg:nameProtocol>Chordoma Protons exclusive</clpg:nameProtocol>
<clpg:ClinicalResearchPhase>
<clpg:phase>4</clpg:phase>

```

```

</clpg: ClinicalResearchPhase>
<clpg: PriorityGroup>
<clpg: priorityGroup>1</clpg: priorityGroup>
<clpg: level>A</clpg: level>
<clpg: gain>1</clpg: gain>
</clpg: PriorityGroup>
</clpg: Protocol>
<clpg: Protocol>
<clpg: nameProtocol>X-rays</clpg: nameProtocol>
<clpg: ClinicalResearchPhase>
<clpg: phase>-1</clpg: phase>
</clpg: ClinicalResearchPhase>
<clpg: PriorityGroup>
<clpg: priorityGroup>-1</clpg: priorityGroup>
</clpg: PriorityGroup>
<clpg: referentProtocol>>true</clpg: referentProtocol>
</clpg: Protocol>
</clpg: ClinicalResearchAndPriorityGroup>
...
</clpgs: ClinicalResearchAndPriorityGroups>
<orders: Orders>
<order: Order>
<order: nameItem>CHAMPAGNE ARDENE*</order: nameItem>
<order: Centers>
<order: Center>
<order: centerName>CPO new</order: centerName>
<order: order>1</order: order>
</order: Center>
<order: Center>
<order: centerName>ETOILE LYON1</order: centerName>
<order: order>2</order: order>
</order: Center>
<order: Center>
<order: centerName>NICE</order: centerName>
<order: order>3</order: order>
</order: Center>
</order: Centers>
</order: Order>
<order: Order>
<order: nameItem>BOURGOGNE*</order: nameItem>
<order: Centers>
<order: Center>
<order: centerName>ETOILE LYON1</order: centerName>
<order: order>1</order: order>
</order: Center>
<order: Center>
<order: centerName>CPO new</order: centerName>
<order: order>1</order: order>
</order: Center>
<order: Center>
<order: centerName>NICE</order: centerName>
<order: order>2</order: order>
</order: Center>
</order: Centers>
</order: Order>
...
</orders: Orders>
<activities: Activities>
<activity: Activity>
<activity: priorityLevelValue>1</activity: priorityLevelValue>
<activity: Crowns>
<activity: Crown>
<activity: zoneName>1</activity: zoneName>
<activity: activityValue>5</activity: activityValue>
</activity: Crown>
<activity: Crown>
<activity: zoneName>2</activity: zoneName>
<activity: activityValue>10</activity: activityValue>
</activity: Crown>
<activity: Crown>
<activity: zoneName>3</activity: zoneName>
<activity: activityValue>15</activity: activityValue>
</activity: Crown>
<activity: Crown>
<activity: zoneName>4</activity: zoneName>
<activity: activityValue>20</activity: activityValue>
</activity: Crown>
</activity: Crowns>
</activity: Activity>
<activity: Activity>
...
</activities: Activities>
<centersCrowns: CentersCrowns>

```

```
<centerCrowns:centerCrowns>
<centerCrowns:centerName>CPO new</centerCrowns:centerName>
<centerCrowns:centerCrown>
<centerCrowns:numberCrown>4</centerCrowns:numberCrown>
<centerCrowns:Crown>
<centerCrowns:itemName>CHAMPAGNE ARDENE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>BOURGOGNE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>CORSE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>BASSE NORMANDIE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>CAEN</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>CALVADOS</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>DOM TOM*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>LYON</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>RHONE ALPES*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>RHONE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>NORD PAS DE CALAIS*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>BRETAGNE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>CENTRE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>HAUTE NORMANDIE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>LORRAINE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>ALPES MARITIMES*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>NICE</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>PACA*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>ALSACE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>AUVERGNE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>PAYS DE LA LOIRE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>POITOU CHARENTES*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>MIDI PYRENNEES*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>FRANCHE COMTE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>LANGUEDOS ROUSSILLON*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>PICARDIE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>AQUITAINE*</centerCrowns:itemName>
<centerCrowns:itemName>LIMOUSIN*</centerCrowns:itemName>
</centerCrowns:Crown>
</centerCrowns:centerCrown>
...
</centerCrowns:centerCrowns>
</data:TableData>
</data:Data>
```


**Annexe 3 : Algorithmes de
planification**

Algorithme .1 : Mise à jour de la capacité restante pour les groupe de priorité correspondant à un jour pour une salle dans l'année de simulation

Entrées :

- le jour correspondant au traitement courant *nbDay*, la semaine *nbWeek* correspondante,
- l'indice de priorité correspondant *indexPriority* (N.B. : pour le tableau des priorités, ce n'est pas forcément le numéro du groupe de priorité), l'indice de la salle *indexRoom* (N.B. : ce n'est pas forcément le numéro de la salle donné comme nom dans la structure décrivant la salle),
- le temps de traitement *treatmentTime*,
- le nombre de groupes de priorité *nbPrGr*,
- le tableau avec les heures attribuées à chaque groupe de priorité en fonction de la salle, de la semaine et du jour *priorityRoomsPoolCurrentCapacity*,
- le tableau de groupes de priorité *availableLimitPriority* par salle, par semaine et par jour pour le temps limite donné à chaque groupe de priorité à ne pas dépasser si l'on ne dispose que du % attribué à ce groupe de priorité.

début

```

pour indexprGr = indexPriority ... nbPrGr faire
  si priorityRoomsPoolCurrentCapacity[indexprGr] n'est pas vide
  alors
    - actualCapacity ← priorityRoomsPoolCurrentCapacity[indexprGr]
      [indexRoom][nbWeek][nbDay]
    - actualCapacity ← actualCapacity - treatmentTime
    - priorityRoomsPoolCurrentCapacity[indexprGr]
      [indexRoom][nbWeek][nbDay, actualCapacity]

  si indexPriority >= 0 alors
    - Mise à jour du temps limite jour du groupe de groupe de priorité courant :
      availableLimitPriority =
      priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[indexPriority]
      [indexRoom][nbWeek][nbDay]
    - Mise à jour du temps limite pour les groupes de priorités en dessous du groupe
      courant
      a ← treatmentTime
      si availableLimitPriority > 0 alors
        si a > availableLimitPriority alors
          - a ← a - availableLimitPriority
          - priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[indexPriority]
            [indexRoom][nbWeek][nbDay, 0.0]
        sinon
          - difference ← (availableLimitPriority - a)
          - priorityRoomsDayLimitCapacity[indexPriority]
            [indexRoom][nbWeek][nbDay, difference]
          - a ← 0.0
    - index ← indexPriority - 1
  appel du tant que : Algorithme 2

```

fin

Algorithme .2 : Appel Tant Que à inclure dans l'Algorithme 1

Entrées : Les mêmes que pour l'algorithme précédent.

début

```

tant que  $a! = 0.0$  faire
  -  $limitPriorityDiff$ 
  si  $priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[index]$  n'est pas vide alors
    -  $actualCapacity \leftarrow$ 
       $priorityRoomsPoolCurrentCapacity[index][indexRoom][nbWeek][nbDay]$ 
    -  $availableLimitPriority \leftarrow$ 
       $priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[index][indexRoom][nbWeek][nbDay]$ 
    si  $availableLimitPriority > 0$  alors
      si  $a > availableLimitPriority$  alors
        -  $a \leftarrow a - availableLimitPriority$ 
        -  $priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[index]$ 
           $[indexRoom][nbWeek][nbDay, 0.0]$ 
        -  $priorityRoomsPoolCurrentCapacity[index]$ 
           $[indexRoom][nbWeek][nbDay, actualCapacity - availableLimitPriority]$ 
        si  $(actualCapacity - availableLimitPriority) < 0$  alors
          -  $limitPriorityDiff \leftarrow availableLimitPriority$ 
      sinon
        -  $difference \leftarrow availableLimitPriority - a$ 
        -  $limitPriorityDiff \leftarrow a$ 
        -  $priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[index]$ 
           $[indexRoom][nbWeek][nbDay, difference]$ 
        -  $priorityRoomsPoolCurrentCapacity[index]$ 
           $[indexRoom][nbWeek][nbDay, actualCapacity - a]$ 
        -  $a \leftarrow 0.0$ 
    -  $index \leftarrow index - 1$  si  $limitPriorityDiff! = null$  alors
      pour  $j = index + 1, \dots, indexPriority$  faire
        si  $priorityRoomsPoolCurrentCapacity.get(j)$  n'est pas vide
          alors
            -  $actualCapacity \leftarrow priorityRoomsPoolCurrentCapacity[j]$ 
               $[indexRoom][nbWeek][nbDay]$ 
            -  $priorityRoomsPoolCurrentCapacity[j]$ 
               $[indexRoom][nbWeek][nbDay, actualCapacity - limitPriorityDiff]$ 
      -  $index \leftarrow index - 1$ 

```

fin

Algorithme .3 : Mise à jour de la capacité restante pour les groupe de priorité correspondant à un jour pour une salle dans l'année de simulation

Entrées :

- le jour correspondant au traitement courant *nbDay*, la semaine *nbWeek* correspondante,
- l'indice de priorité correspondant *indexPriority*, (N.B. : pour le tableau des priorités, ce n'est pas forcément le numéro du groupe de priorité), l'indice de la salle *indexRoom* (N.B. : ce n'est pas forcément le numéro de la salle donné comme nom dans la structure décrivant la salle),
- le temps de traitement *treatmentTime*,
- le nombre de groupes de priorité *nbPrGr*,
- le tableau avec les heures attribuées à chaque groupe de priorité en fonction de la salle, de la semaine et du jour *priorityRoomsPoolCurrentCapacity*,
- le tableau de groupes de priorité *availableLimitPriority* par salle, par semaine et par jour pour le temps limite donné à chaque groupe de priorité à ne pas dépasser si l'on ne dispose que du % attribué à ce groupe de priorité.

début

```

pour indexprGr = indexPriority ... nbPrGr faire
  si priorityRoomsPoolCurrentCapacity[indexprGr] n'est pas vide
  alors
    - actualCapacity ← priorityRoomsPoolCurrentCapacity[indexprGr]
      [indexRoom][nbWeek][nbDay]
    - actualCapacity ← actualCapacity - treatmentTime
    - priorityRoomsPoolCurrentCapacity[indexprGr]
      [indexRoom][nbWeek][nbDay, actualCapacity]

  si indexPriority >= 0 alors
    - Mise à jour du temps limite jour du groupe de groupe de priorité courant :
      availableLimitPriority =
      priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[indexPriority]
      [indexRoom][nbWeek][nbDay]
    - Mise à jour du temps limite pour les groupes de priorités en dessous du groupe
      courant
      a ← treatmentTime
    si availableLimitPriority > 0 alors
      si a > availableLimitPriority alors
        - a ← a - availableLimitPriority
        - priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[indexPriority]
          [indexRoom][nbWeek][nbDay, 0.0]
      sinon
        - difference ← (availableLimitPriority - a)
        - priorityRoomsDayLimitCapacity[indexPriority][indexRoom]
          [nbWeek][nbDay, difference]
        - a ← 0.0
    - index ← indexPriority - 1
    - appel du tant que : Algorithme 4

```

fin

Algorithme .4 : Appel Tant Que à inclure dans l'Algorithme 3**Entrées** : Les mêmes que pour l'algorithme précédent.**début**

```

tant que  $a! = 0.0$  faire
  -  $limitPriorityDiff$ 
  si  $priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[index]$  n'est pas vide alors
    -  $actualCapacity \leftarrow priorityRoomsPoolCurrentCapacity[index]$ 
       $[indexRoom][nbWeek][nbDay]$ 
    -  $availableLimitPriority \leftarrow priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[index]$ 
       $[indexRoom][nbWeek][nbDay]$ 
    si  $availableLimitPriority > 0$  alors
      si  $a > availableLimitPriority$  alors
        -  $a \leftarrow a - availableLimitPriority$ 
        -  $priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[index]$ 
           $[indexRoom][nbWeek][nbDay, 0.0]$ 
        -  $priorityRoomsPoolCurrentCapacity[index]$ 
           $[indexRoom][nbWeek][nbDay, actualCapacity - availableLimitPriority]$ 
      si  $(actualCapacity - availableLimitPriority) < 0$  alors
        -  $limitPriorityDiff \leftarrow availableLimitPriority$ 
      sinon
        -  $difference \leftarrow availableLimitPriority - a$ 
        -  $limitPriorityDiff \leftarrow a$ 
        -  $priorityRoomsPoolDayLimitCapacity[index]$ 
           $[indexRoom][nbWeek][nbDay, difference]$ 
        -  $priorityRoomsPoolCurrentCapacity$ 
           $[index][indexRoom][nbWeek][nbDay, actualCapacity - a]$ 
        -  $a \leftarrow 0.0$ 
    -  $index \leftarrow index - 1$  si  $limitPriorityDiff! = null$  alors
      pour  $j = index + 1, \dots, indexPriority$  faire
        si  $priorityRoomsPoolCurrentCapacity.get(j)$  n'est pas vide
          alors
            -  $actualCapacity \leftarrow priorityRoomsPoolCurrentCapacity[j]$ 
               $[indexRoom][nbWeek][nbDay]$ 
            -  $priorityRoomsPoolCurrentCapacity[j]$ 
               $[indexRoom][nbWeek][nbDay, actualCapacity - limitPriorityDiff]$ 
      -  $index \leftarrow index - 1$ 

```

fin**Algorithme .5** : Contrainte d'espacement des séances**Entrées** :- les variables binaires et les valeurs min , max .**début**

```

pour  $i = 1 \dots n$  faire
  - Rajouter une nouvelle ligne,
  - Créer le tableau des indices pour cette ligne,
  - Créer le tableau des valeurs pour cette ligne. pour  $j = 1 \dots m$  faire
    - tableau des indices emplacement  $j \leftarrow x_{i,j}$ ,
    - tableau des valeurs emplacement  $j \leftarrow (-1 * j)$ ,
    - tableau des indices emplacement  $j + m \leftarrow x_{i+1,j}$ ,
    - tableau des valeurs emplacement  $j + m \leftarrow j$ .

```

fin

Algorithme .6 : Contrainte des jours fériés

Entrées :

- les variables binaires de placement des séances des patients, le nombre de jours fériés dans une semaine, le nombre de jours travaillés dans une semaine.

début

 Pour un traitement donné

- Calculer le nombre de jours fériés en fonction de la durée du traitement $sizeJPrim$,
- Calculer le nombre de semaines sur lesquelles le traitement entier est disposé $nbWeek$.

pour $i = 1 \dots n$ **faire**

- Pour chaque semaine faisant partie du traitement, récupérer les jours correspondants se situant entre $startJ$ et $endJ$,
- Créer la contrainte pour ces jours.

fin

Algorithme .7 : Contrainte des jours fériés, forme GLPK**Entrées :**

- les variables binaires de placement des séances des patients, le nombre de jours fériés dans une semaine $nbOffDays$, le nombre de jours travaillés dans une semaine $nbWorkDays$, le nombre de semaines dans l'année $nbWeeksYear$, le premier jour possible du traitement $firstDate$, le dernier jour possible du traitement $lastDate$.

début

Pour un traitement donné faire

$sizeJPrim = 0$

$nbWeek = 1$

$tooFar \leftarrow faux$

tant que $nbWeek \leq nbWeeksYear$ et $\neg tooFar$ **faire**

 - $firstOffDay = nbWeek \times nbWorkDays + (nbWeek - 1) \times nbOffDays$

$lastOffDay = nbWeek \times nbWorkDays + nbWeek \times nbOffDays$

 - **si** $firstOffDay \geq firstDate$ et $lastOffDay \leq lastDate$ **alors**

 - $sizeJPrim \leftarrow sizeJPrim + (lastOffDay - firstOffDay)$

sinon

si $lastOffDay > lastDate$ **alors**

 - $tooFar \leftarrow true$

 - $nbWeek \leftarrow nbWeek + 1$

$diff \leftarrow 0$ est la différence à ajouter pour avoir les jours fériés lorsque le traitement ne commence pas un lundi.

si $firstDate / nbWorkDays \geq 1$ **alors**

 - $diff \leftarrow 5$

pour $i = 1 \dots n$ **faire**

 - le tableau des indices est de taille $sizeJPrim + 1$

 - le tableau des valeurs est de taille $sizeJPrim + 1$

 - $nbWeek \leftarrow 1$

$tooFar \leftarrow false$

$nbTotW \leftarrow sizeJPrim / nbOffDays$

$intjPrim \leftarrow 1$ **tant que** $nbWeek \leq nbTotW$ **faire**

$startJ \leftarrow$

$nbWeek \times nbWorkDays + (nbWeek - 1) \times nbOffDays + 1 - diff$

$endJ \leftarrow nbWeek \times nbWorkDays + nbWeek \times nbOffDays - diff$

pour $j = startJ \dots endJ$ **faire**

 - tableau des indices emplacement $jPrim \leftarrow x_{i,j}$

 - tableau des valeurs emplacement $jPrim \leftarrow (1.0)$

 - $jPrim \leftarrow jPrim + 1$

 - $nbWeek \leftarrow nbWeek + 1$

fin