
Université d'Artois

**GESTION HOSPITALIERE EN SITUATION
D'EXCEPTION : OPTIMISATION DES RESSOURCES
CRITIQUES**

THESE

Présentée et soutenue publiquement le 12 mai 2010

En vue de l'obtention du

Doctorat de l'Université d'Artois
(Spécialité : Génie Informatique et Automatique)

Par

Issam NOUAOURI

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	M. Pierre LADET	Professeur, INP de Grenoble
	M. Fouad RIANE	Professeur, F.U.Ca de Mons
<i>Examineurs :</i>	M. Christian TAHON	Professeur, Université de Valenciennes
	M. Gilles GONCALVES	Professeur, Université d'Artois
	M. Aziz MOUKRIM	Professeur, U.T de Compiègne
	M. Eric WIEL	Professeur, SAMU Régional de Lille, CHRU de Lille
<i>Directeur :</i>	M. Daniel JOLLY	Professeur, Université d'Artois
<i>Co-encadreur :</i>	M. J-Christophe NICOLAS	Maître de conférences, Université d'Artois

Résumé

Selon le rapport annuel de la croix rouge et du croissant rouge pour l'année 2006, le nombre de catastrophes, d'origine naturelle et humaine, a augmenté ces dernières décennies dans des proportions importantes. Ces catastrophes engendrent souvent un nombre de victimes important nécessitant des interventions urgentes. Face à une telle situation, les moyens sanitaires classiques et de routines se trouvent souvent dépassés, et par conséquent inefficaces pour absorber cet afflux massif de victimes. Ainsi, la mise en œuvre d'un système de gestion hospitalier conditionné par une optimisation des différentes ressources médicales est indispensable pour sauver le maximum de vies humaines.

Dans ce contexte, nous proposons dans cette thèse, d'étudier le problème d'optimisation des ressources humaines et matérielles critiques à savoir, les chirurgiens et les salles opératoires en situation de crise. L'objectif est de traiter le maximum de victimes, autrement dit sauver le maximum de vies humaines. Notre étude comprend deux niveaux : (1) un niveau préparatoire qui consiste à dimensionner les ressources dans le cadre des exercices de simulation du plan blanc, et (2) un niveau opérationnel permettant d'optimiser l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires. Aussi, nous étudions l'impact de la mutualisation des ressources sur le nombre de victimes traitées. L'un des défis posés à la programmation opératoire en situation d'exception est l'aptitude à faire face aux perturbations. Dans ce cadre, nous abordons le problème réactif d'optimisation de l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires. Nous considérons diverses perturbations possibles telles : une durée opératoire qui dépasse la durée estimée, l'insertion d'une nouvelle victime dans le programme opératoire, et l'évolution du degré d'urgence d'une victime.

Cette thèse est menée avec la collaboration de plusieurs structures sanitaires publiques en France et en Tunisie. Les résultats expérimentaux mettent en exergue l'apport de ces approches pour l'aide à la décision.

Mots clés

Programmation linéaire en nombres entiers, Situation d'exception, Dimensionnement, Plan Blanc, Ordonnancement prédictif, mutualisation des ressources, interventions multi-actes, Programmation opératoire réactive.

Abstract

Disaster like terrorist attack, earthquake, and hurricane, often cause a high degree of damage. Thousands of people might be affected. The 2006's annual report of the International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies proves that the number of disasters increased during these last decades. In such situations, hospitals must be able to receive injured persons for medical and surgical treatments. For these reasons medical resources optimization of different is fundamental in human life save.

In this context, we propose in this thesis, to study the optimization of human and material resources in relation with hospital management. We focus more precisely on critical resources: operating rooms and surgeons. The goal is to handle the maximum of victims and then to save the maximum of human lives. Our research consists of two phases: (1) Sizing critical resources during the preparedness phase of disaster management plan so called white plan. (2) Operational phase that provides the optimization of surgical acts scheduling in the operating rooms. Also, we study the impact of sharing resources on the number of treated victims. A disaster situation is characterized by different disruptions. In this setting, we approach a reactive problem for optimization of surgical acts scheduling in the operating rooms. We consider various possible disruptions: the overflow of assessed surgical care duration, the insertion of a new victim in the scheduling program, and the evolution of victim's emergency level.

This work is achieved with the collaboration of several public health institutions (hospitals, ministry, etc.) both in France and Tunisia. Empirical study shows that a substantial aid is proposed by using the proposed approaches.

Keywords

Integer linear programming, Disaster situation, Sizing critical resources, Disaster management plan in hospital (White Plan), Resource sharing, Surgical acts scheduling, Operation multi-acts, Distruptions.

A ma très chère mère

A mon père

A mes sœurs et mon frère

A toute ma famille

A mes professeurs et mes amis

Remerciements

Je tiens à exprimer tout d'abord mes remerciements à M. Daniel JOLLY, Professeur à l'Université d'Artois, qui a dirigé cette thèse dans un cadre convivial. Je le remercie pour ses conseils judicieux qui m'ont permis de mener à bien ces travaux, pour ses encouragements, et pour ses qualités professionnelles et humaines remarquables.

J'exprime ma profonde gratitude à M. Jean Christophe NICOLAS, Maître de conférences à l'Université d'Artois et Co-encadreur de cette thèse, pour l'énorme soutien scientifique et pour sa perspicacité qui ont contribué à la réalisation de ce travail. Je le remercie pour l'analyse minutieuse qu'il a menée sur ce mémoire et pour sa lecture attentive qu'il en a faite et qui a contribué à l'enrichissement de ce travail.

Les équipes tunisiennes de l'URAI et OASIS ont aussi grandement participé à la réalisation de cette thèse. Je pense notamment à Mme Sonia HAJRI-GABOUJ, Maître de conférences à l'Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie, et Mme Najoua DRIDI, Maître assistante à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, pour leurs précieuses contributions scientifiques.

La qualité et la continuité des données présentées ici sont le fruit d'une collaboration avec plusieurs structures hospitalières françaises et tunisiennes. Je remercie le Professeur Eric WIEL du SAMU Régionale de Lille, le Dr. Mondher GABOUJ de la Direction Générale de la Santé Militaire (Tunisie), M. Salem CHNAÏNA, Directeur du CHU Hedi Chaker Sfax, le Dr. Naoufel SOMRANI, et le Dr. Henda CHEBBI du ministère de la santé publique (Tunisie) pour leurs précieuses collaborations.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à Dr. Cédric GOZE, pour m'avoir accueilli au sein du SAMU de Valenciennes, pour l'intérêt qu'il a porté à cette thèse et pour ses explications très précieuses.

J'exprime mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse. Merci à M. Pierre LADET, Professeur à l'Institut Polytechnique de

Grenoble, et M. Fouad RIANE Professeur à la Facultés Universitaires Catholiques de Mons, pour m'avoir rapportés ma thèse. J'aimerais remercier également M. Christian TAHON, Professeur de l'Université de Valenciennes, Gilles GONCALVES Professeur de l'Université d'Artois, M. Aziz MOUKRIM Professeur de l'Université de Technologie de Compiègne, M. Eric WIEL Professeur de SAMU Régional de Lille, pour avoir acceptés d'examiner mon rapport de thèse.

Je tiens à remercier les amis thésards, ingénieurs et enseignants qui m'ont aidé au cours de cette thèse : Fabrice et Dominique pour leur soutien permanent et les weekends inoubliables à Paris ; Milka pour son sourire et son écoute ; Yamine et Khaoula pour les moments conviviaux passés ensemble chaque soir. Je n'oublie pas non plus les autres parmi lesquels je remercierai plus particulièrement : Amir, Kamel et David.

Enfin, j'adresse un grand merci à toute ma famille qui a été toujours présente lorsque j'en ai besoin, en particulier à ma mère, à mon père, à mes sœurs et à mon frère.

Table de matières

Introduction générale.	1
Chapitre 1. Le contexte	3
1- Situation d'exception	3
1.1. Définition	3
1.2. Classification	4
1.3. Caractéristiques	4
2- Organisation des soins	5
2.1. Données primordiales	5
2.2. Déclenchement	6
2.3. Mise en place d'une cellule de crise	6
2.3.1 Cellule d'action	6
2.3.2 Cellule logistique	7
2.3.3 Cellule de renseignement	7
2.3.4 Cellule de communication	7
2.4. Poste de secours ou Poste Médical Avancé	7
2.4.1 Triage	8
2.4.2 Conditionnement primaire	8
2.4.3 Evacuation sanitaire	9
2.5. Hôpital d'accueil	9
2.5.1 Organisation des ressources humaines et matérielles	9
2.5.2 Organisation des services pour l'accueil des victimes	10
2.5.3 Accueil et triage secondaire des victimes	10
2.5.4 Circulation dans l'hôpital et à l'entrée de l'établissement	10
2.5.5 Conditionnement secondaire	11
2.5.6 Traitement définitif	11
2.6. Flux de victimes	12
3- Typologies des plans de secours	13
4- Conclusion	14
Chapitre 2. La revue de la littérature	15
1- Niveau stratégique : dimensionnement	15
2- Niveau tactique et opérationnel : planification et ordonnancement	17
2.1. La programmation opératoire en situation normale	18
2.1.1 La programmation opératoire sans tenir compte des urgences	18
2.1.2 La programmation opératoire avec prise en compte des urgences	21
2.2. Modélisation et simulation	23
2.3. Mutualisation des ressources humaines et matérielles	24
3- Conclusion	25
Chapitre 3. Le dimensionnement des ressources critiques	26
1- La présentation du problème	26
1.1. Le plan blanc	26
1.2. Le problème étudié	27
2- L'approche proposée	28
2.1. Le dimensionnement du nombre des salles opératoires	30
2.2. L'optimisation des dates d'arrivées au plus tard des équipes chirurgicales	31
3- Expérimentation et analyse des résultats	33
3.1. Problèmes tests	33
3.2. Expérimentation	35

4- Conclusion	39
Chapitre 4. L'optimisation de l'ordonnement des interventions dans les salles opératoires	41
1- Le périmètre d'étude et les hypothèses	41
2- L'ordonnement et l'affectation prédictifs des interventions aux salles opératoires	42
2.1. La présentation du problème	43
2.2. La description du problème	43
2.3. Le modèle mathématique	45
3- Ordonnement et affectation prédictifs des interventions avec nomadisme des chirurgiens et mono-acte chirurgical	47
3.1. La présentation du problème	48
3.2. La description du problème	48
3.3. Le modèle mathématique	49
4- Ordonnement et affectation prédictifs des interventions avec nomadisme des chirurgiens et multi-actes chirurgicaux	53
4.1. La présentation du problème	53
4.2. La description du problème	54
4.3. Le modèle mathématique	55
5- Expérimentation et analyse des résultats	59
5.1. Problèmes tests	59
5.2. Les résultats de l'ordonnement et l'affectation prédictifs des interventions aux salles opératoires	62
5.3. Les résultats de la mutualisation des ressources critiques : cas d'interventions mono-acte chirurgical	66
5.4. Les résultats de la mutualisation des ressources critiques : cas d'intervention multi-actes chirurgicaux	69
6- Conclusion	72
Chapitre 5. L'ordonnement des interventions dans les salles opératoires avec prise en compte des perturbations	74
1- La présentation du problème	74
1.1. Les perturbations	74
1.1.1 Les incertitudes	75
1.1.2 Les aléas	75
1.2. Le problème étudié	76
2- L'approche proposée	77
2.1. L'arrivée d'une nouvelle victime à l'hôpital d'accueil	77
2.1.1. L'algorithme de résolution	78
2.1.2. La modélisation	83
2.2. Evolution de degrés d'urgences	91
2.3. Sous-estimation ou sur-estimation des durées opératoires	92
2.3.1. L'algorithme de résolution	92
2.3.2. La modélisation	94
3- Expérimentation et analyse des résultats	99
3.1. Les scénarios	99
3.2. Les résultats	103
3.2.1. Insertion d'une nouvelle victime	103
3.2.2. Evolution d'un degré d'urgence	106
3.2.3. Sous estimation d'une durée opératoire	107
4- Conclusion	110
Conclusion générale	111
<i>Annexe 1</i>	113

<i>Annexe 2</i>	117
<i>Annexe 3</i>	119
<i>Annexe 4</i>	128
<i>Références Bibliographiques</i>	137

Liste des figures

Figure 1.1. Flux de victimes en situation d'exception	12
Figure 3.1. Etapes de résolution	28
Figure 3.2. Les marges des chirurgiens pour le cas $P50.R_1$	39
Figure 4.1 : Flux d'informations entre le PMA et l'hôpital d'accueil	45
Figure 4.2 : Occupation d'une salle opératoire pendant une intervention	48
Figure 4.3 : Prise en charge optimisée de deux interventions consécutives dans deux salles opératoires par un même chirurgien	49
Figure 4.4 : Décomposition temporelle d'une intervention de la victime i	50
Figure 4.5. Occupation d'une salle opératoire par une victime i dans le cas d'un seul acte chirurgical	54
Figure 4.6. Prise en charge des deux actes chirurgicaux de la même victime i par deux chirurgiens	55
Figure 4.7. Représentation graphique du programme détaillé des salles opératoires	64
Figure 4.8. Evolution Taux d'occupation des salles opératoires / Pourcentage de traitement de victimes	66
Figure 4.9 : Représentation graphique du programme détaillé des salles opératoires	68
Figure 4.10 : Evolution du Taux d'occupation des salles opératoires / Pourcentage de traitement de victimes	69
Figure 4.11. Représentation graphique du programme détaillé des salles opératoires	71
Figure 4.12 : Evolution Taux d'occupation des salles opératoires / Pourcentage de traitement de victimes	72
Figure 5.1. Ordonnancement prédictif des interventions	78
Figure 5.2. Algorithme de résolution réactif dans le cas d'insertion d'une nouvelle victime	80
Figure 5.3. Programme opératoire prédictif P_0	81
Figure 5.4. Programme opératoire obtenu suite à la résolution du programme P_1	81
Figure 5.5. Programme opératoire obtenu suite à la résolution de l'algorithme <i>shift right</i> (P_2)	82
Figure 5.6. Programme opératoire obtenu suite à la résolution du programme P_3	82
Figure 5.7. Programme opératoire obtenu suite à la résolution du programme P_4	83
Figure 5.8. Algorithme de résolution réactif dans le cas d'une durée opératoire sous-estimée	93
Figure 5.9. Pourcentage des cas traités par programme de résolution	104
Figure 5.10. Pourcentage des cas traités par instance	105
Figure 5.11. Pourcentage des cas traités par programme de résolution	106
Figure 5.12. Pourcentage des cas traités par instance	107
Figure 5.13. Pourcentage des cas traités par programme de résolution.	109
Figure 5.14. Pourcentage des cas traités par instance	109

Liste des tableaux

Tableau 3.1. Dates limites et dates d'arrivées des victimes	34
Tableau 3.2. Dates d'arrivées au plus tôt des chirurgiens à l'hôpital d'accueil (tableau de garde).	35
Tableau 3.3. Résultats du modèle 1.	36
Tableau 3.4. Résultats du modèle 2.	37
Tableau 4.1. Dates d'arrivées des chirurgiens à l'hôpital d'accueil.	60
Tableau 4.2. Dates limites d'interventions et d'arrivées des victimes à l'hôpital d'accueil.	61
Tableau 4.3. Victimes à multi-actes chirurgicaux	62
Tableau 4.4. Taille des instances en nombre de victimes	62
Tableau 4.5. Résultats numériques	63
Tableau 4.6. Programme détaillé des salles opératoires.	64
Tableau 4.7. Victimes non prises en charge par l'hôpital	65
Tableau 4.8. Résultats numériques	67
Tableau 4.9. Programme des salles et des chirurgiens.	68
Tableau 4.10. Victimes non prises en charge par l'hôpital d'accueil.	69
Tableau 4.11. Résultats numériques	70
Tableau 5.1. Typologie des principales perturbations rencontrées en cas de catastrophe	76
Tableau 5.2. Les instances retenues	100
Tableau 5.3. Paramètres modifiés par type de perturbation	100
Tableau 5.4. Exemple de 50 scénarios appliqués à l'instance $P25.4.R_I$	102
Tableau 5.5. Résultats numériques pour le cas d'insertion d'une nouvelle victime	104
Tableau 5.6. Résultats numériques pour le cas d'évolution d'un degré d'urgence.	106
Tableau 5.7. Résultats numériques pour le cas : sous estimation d'une durée opératoire.	108

Introduction générale

Les catastrophes naturelles (inondations, séismes, etc.) ou provoquées (accidents sur la voie publique, explosion industrielle, etc.) peuvent engendrer un nombre important de victimes de gravité variable. Face à de telles situations, les moyens sanitaires classiques et de routine se trouvent souvent dépassés. En conséquence, ils sont le plus souvent inefficaces pour absorber un afflux important de victimes. Dans ce contexte, plusieurs pays imposent à leurs établissements sanitaires d'avoir un plan d'organisation de secours qui leur permette, en cas de catastrophe, d'assurer la disponibilité de leurs ressources, de façon à faire face aux situations d'urgences. En France et en Tunisie, ce plan d'organisation est nommé le plan blanc.

La particularité du système hospitalier en situation d'exception est qu'il repose d'une part sur le caractère soudain nécessitant de prendre des décisions et d'exécuter des actions rapides, et d'autre part, sur le grand nombre de victimes à traiter en peu de temps avec des degrés d'urgence variés. Face à une telle situation l'optimisation des ressources humaines et matérielles s'avère nécessaire afin de pouvoir traiter le maximum de victimes et d'en sauver ainsi le plus possible.

Il existe de nombreux travaux qui traitent des problèmes d'organisation et d'optimisation des systèmes hospitaliers en situation normale. Ils reposent généralement sur des méthodes et des outils issus du domaine manufacturier (Chaabane et *al.*, 2003). La plupart de ces travaux s'intéressent à l'optimisation du bloc opératoire qui représente une ressource goulot dans le système hospitalier.

Notre étude porte sur l'optimisation des salles opératoires en cas de catastrophe. Dans ce cadre, nous avons collaboré avec plusieurs structures sanitaires publiques en France et en Tunisie, à savoir l'hôpital de Valenciennes (Région Nord-Pas-de-Calais), l'hôpital Charles Nicole (Tunis, Tunisie) et la Direction Générale de la Santé Militaire (Tunisie). Egalement, notre participation au projet ARC-IR « filière d'urgence » nous a permis de travailler en collaboration avec des médecins urgentistes du Centre Hospitalier Régional de Lille et du SAMU 59.

Nous abordons notre étude par une présentation du contexte dans lequel se situent nos travaux de thèse. Le chapitre 1 introduit dans un premier temps les situations d'exception (catastrophes). Ensuite, nous détaillons le mode d'organisation de soins à partir du lieu sinistré jusqu'à l'hôpital d'accueil. Nous portons un intérêt particulier à l'hôpital d'accueil dans lequel les victimes sont acheminées pour subir un traitement médical. Enfin, nous présentons les différentes typologies de plans de secours.

Nous présentons dans le chapitre 2 un état de l'art sur les travaux réalisés dans le cadre de l'optimisation du flux de patients. Nous distinguons deux niveaux d'optimisation : (1) le niveau stratégique dans lequel nous citons les travaux traitant des problèmes de dimensionnement des ressources humaines et matérielles. (2) le niveau tactique et opérationnel dans lequel nous détaillons la planification et l'ordonnancement des interventions dans le bloc opératoire avec ou sans tenir compte des urgences quotidiennes. Aussi, un intérêt particulier est porté à la mutualisation des ressources humaines et matérielles.

Le chapitre 3 présente le niveau préparatif d'une situation de catastrophe, qui consiste à dimensionner des ressources critiques (salles opératoires et chirurgiens) dans le cadre des exercices de simulations du plan blanc.

Le chapitre 4 constitue l'optimisation de l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires. Nous étudions dans ce chapitre l'impact de la mutualisation des ressources sur le nombre de victimes traitées.

L'un des défis posés à la programmation opératoire en situation d'exception est l'aptitude à faire face aux perturbations. Le chapitre 5 s'intéresse à l'optimisation de l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires en mode réactif. Nous considérons dans ce chapitre diverses perturbations possibles telles : une durée opératoire qui dépasse la durée estimée, l'insertion d'une nouvelle victime dans le programme opératoire, et l'évolution du degré d'urgence d'une victime.

Nous trouvons ensuite une conclusion générale dans laquelle nous rappelons les remarques les plus importantes que nous avons pu tirer de nos résultats. Enfin nous terminons ce manuscrit par des perspectives de recherche qui nous semblent du plus grand intérêt dans ce cadre d'études encore relativement peu exploré.

Chapitre 1. Le contexte

Le nombre de catastrophes, d'origine naturelle et humaine, a augmenté ces dernières décennies dans des proportions importantes. Le rapport annuel de la croix rouge et du croissant rouge pour l'année 2006 montre que les sociétés nationales ont dû faire face à 420 catastrophes ou crises différentes, soit une augmentation respective de 22% et 47% par comparaison en 2005 et 2003 (Fédération internationale des sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge, 2006).

Dans ce contexte, un grand intérêt est porté à la médecine de catastrophe et plus particulièrement à l'organisation des soins en situation d'exception qui s'étend du lieu sinistré jusqu'aux infrastructures hospitalières qui assureront la prise en charge médicale définitive. Cette filière d'urgence ressent aujourd'hui de plus en plus le besoin d'un développement d'outils d'aide à la décision dans le but d'anticiper, et par voie de conséquence de s'organiser au mieux afin de sauver le maximum de vies humaines avec les moyens sanitaires disponibles.

Dans un premier temps, nous présentons ce qu'est une situation d'exception. Ensuite, nous décrivons la chaîne d'organisation des soins pour la prise en charge des victimes. Enfin, nous exposons les différentes typologies des plans de secours.

1- Situation d'exception

1.4. Définition

Une situation d'exception ou une catastrophe est définie comme étant une grave perturbation d'une société, causant des pertes en vies humaines et en biens au point que la société sinistrée ne peut y faire face en recourant à ses seules ressources disponibles. La commission d'étude pour le plan catastrophe majeure réunie à Brignole en 1983 a défini une catastrophe comme étant un « Événement destructeur constituant une atteinte grave pour la population et l'environnement et entraînant une disproportion entre les besoins et les moyens ».

1.5. Classification

La fondation internationale de traumatologie classifie les catastrophes selon sept facteurs :

- Le facteur d'intensité : catastrophe simple (infrastructure intacte) ou catastrophe complexes (infrastructure disloquée).
- Le facteur déclenchant : catastrophes naturelles (cyclones, séismes, glissement de terrain, etc.), catastrophes socio-économiques (épidémies, famine, etc.), catastrophes conflictuelles (actes terroristes, actions de guerre, etc.) ou catastrophes mixtes regroupant plusieurs types de catastrophes à la fois.
- Le nombre de victimes : modéré ou à effet limité (supérieur à 25 et inférieur à 100), moyen (de 99 à 1000) et majeur (supérieur à 10000).
- La durée de l'agression : courte (inférieure à 1 heure), moyenne (inférieure à 24 heures) et large (supérieure à 24 heures).
- La nature de la pathologie : chirurgicale (séisme, incendie,...) ou médicale (épidémies, intoxication,...). Pour notre étude, nous allons considérer les catastrophes avec nature de pathologie chirurgicale.
- La configuration géographique (étendue, zone urbaine ou rurale, facilité d'accès, etc.).
- La durée des opérations de sauvetage (inférieure ou supérieure à 24 heures).

1.6. Caractéristiques

Les catastrophes, quelles que soient leur nature, sont caractérisées par divers éléments qui suscitent des problèmes particuliers :

- Le caractère soudain nécessitant une action rapide ;
- L'insuffisance des moyens médicaux prévus pour les situations normales ;
- Le grand nombre de victimes demandant une adéquation des moyens disponibles pour sauver le maximum de vies humaines ;
- Les dégâts matériels ou les conditions météorologiques défavorables rendant l'accès aux victimes difficile et/ou dangereux ;
- L'environnement perturbé sur le plan sanitaire par la pollution et les risques d'épidémie.

Pour pouvoir anticiper ces problèmes et faire face aux conséquences dues à une catastrophe, un plan d'organisation des soins doit être mis en place.

2- Organisation des soins

Les catastrophes engendrent un nombre important de victimes de gravité variable. Face à de telles situations, les acteurs hospitaliers sont appelés à mettre en œuvre, dans les plus brefs délais, les moyens indispensables permettant une prise en charge d'un afflux massif de victimes. L'efficacité du système de gestion de soins est ainsi conditionnée par de multiples facteurs dont l'anticipation, la réactivité, la disponibilité des moyens et la coordination entre les différents acteurs.

L'organisation des soins en cas de catastrophe commence par le ramassage des victimes sur le lieu du sinistre jusqu'à leur prise en charge définitive dans une infrastructure hospitalière.

2.1. Données primordiales

Certaines données nécessaires doivent être disponibles avant la survenue d'une éventuelle catastrophe :

- La liste des personnels hospitaliers avec leurs coordonnées précises.
- Le tableau de garde du personnel médical (médecins, chirurgiens, infirmiers, etc.) composé des heures d'arrivées de chaque intervenant à la structure hospitalière où il est affecté.
- La liste de tous les intervenants (personnels hospitaliers, SAMU, SMUR, protection civile,...) avec leurs fonctions.
- Des consignes précises, afin d'informer à l'avance les intervenants de la conduite à tenir en cas de mobilisation.
- La constitution de l'équipe qui va intervenir au niveau du poste de secours et le matériel nécessaire.
- La capacité maximale d'accueil des établissements selon le type d'urgence.
- La liste des matériels mobilisables et leur localisation (matériel fonctionnel et en réserve). Les Postes Sanitaires Mobiles (PSM) peuvent éventuellement renforcer les structures hospitalières en situation d'exception. On distingue deux types de PSM : le poste sanitaire mobile de premier niveau (PSM1) (capacité de traitement de 25 blessés) et le poste sanitaire mobile de deuxième niveau (PSM2) (capacité de traitement de 500 blessés).
- Les plans explicatifs d'aménagement des locaux pour assurer une installation rapide.

2.2. Déclenchement

Suite à une catastrophe, une cellule de crise est créée. Cette cellule est mise en place autour du directeur de l'hôpital de référence : établissement de santé qui est « capable » de faire face à une situation exceptionnelle, afin d'organiser la coordination des services techniques et médicaux, et de mettre en œuvre les différents moyens répondant aux besoins qu'elle aura évalués.

2.3. Mise en place d'une cellule de crise

La cellule de crise est composée généralement du préfet, du directeur de l'établissement hospitalier et d'un médecin hospitalier rompu aux situations de catastrophes.

Cette cellule est un poste de commandement et de décisions où toutes les informations sont centralisées et les ordres donnés en conséquence.

La cellule de crise est organisée en sous cellules fonctionnelles permettant la gestion globale des opérations.

2.3.1 Cellule d'action

La cellule d'action a comme missions de :

- Appeler les services concernés pour les informer du déclenchement du plan d'urgence
- Donner le niveau d'exécution des consignes propres à chaque service
- Analyser les données qui émanent des sapeurs pompiers ou de toute autre personne présente sur le lieu
- Anticiper les besoins
- Recevoir les demandes des services de soins, techniques et administratifs
- Répartir le personnel et le matériel en fonctions des besoins
- Donner les ordres correspondants aux décisions prises
- Contrôler l'exécution des ordres donnés
- Réguler l'orientation des patients au sein de l'hôpital d'accueil

Un directeur, un responsable médical et un cadre paramédical supérieur forment cette sous cellule (Huguenard, 1996).

2.3.2 Cellule logistique

Cette cellule a pour rôle de :

- Recenser en temps réel la capacité disponible à savoir les personnels présents, les lits d'hospitalisation, les blocs opératoires, les salles de réanimation, etc.
- Vérifier l'organisation des personnels des services désignés par la cellule action.
- Assurer la disponibilité de tout matériel demandé par la cellule action, exemple : les bouteilles d'oxygène, respirateurs artificiels, brancards, lits, médicaments, etc.
- Prévoir les moyens « hôteliers » pour les patients (blanchisserie, restauration, etc.).

2.3.3 Cellule de renseignement

Elle permet de :

- Recueillir les informations données par les personnes qui sont sur le lieu de la catastrophe (exemple : SAMU)
- Recueillir les informations concernant les victimes admises aux centres hospitaliers
- Suivre l'orientation des victimes
- Suivre la trajectoire des victimes : transfert d'un service à l'autre, la sortie, etc.
- Identifier les patients admis aux urgences mais ne faisant pas partie de la catastrophe

Une équipe habituée à la gestion des entrées et sorties des patients dirige cette sous cellule.

Elle peut comprendre les responsables des bureaux des entrées ou d'accueil sous la direction d'un cadre hospitalier (Huguenard, 1996).

2.3.4 Cellule de communication

Elle assure la communication avec les familles des victimes et les autorités. C'est donc pour cette raison que la cellule doit assurer une communication entre les différents services et structures hospitaliers afin d'éviter les rumeurs et la désinformation.

2.4. Poste de secours ou Poste Médical Avancé

Le poste de secours ou le Poste Médical Avancé (PMA) est un maillon essentiel dans l'organisation des soins en cas de catastrophe (Adnet et *al.*, 2003).

Suite à une catastrophe, le PMA est mis en place à proximité de la zone sinistrée afin de raccourcir la noria de ramassage des victimes et économiser ainsi le potentiel de brancardage.

Il doit se situer près des voies de communication (route, rails, aérodrome, etc.) et à l'abri d'éventuelle extension du sinistre.

Le PMA assure l'accueil et l'abri des victimes, le triage des victimes en urgences absolues et urgences relatives, l'enregistrement des victimes par l'élaboration d'une « fiche médicale de l'avant » que nous présentons dans l'annexe 1, le conditionnement des victimes par la transformation du degré d'urgence permettant ainsi d'allonger le délai d'action, le convoyage et l'assistance des urgences, et enfin l'organisation des évacuations en fonction des priorités et des disponibilités hospitalières (Adnet et *al.*, 2003).

2.4.1 Triage

La décision du triage est un acte important qui peut engager le sort d'une victime et où toute erreur peut avoir des conséquences graves. Il s'agit d'un acte médical de diagnostic qui permet de catégoriser chaque victime, selon son degré d'urgence. Celui-ci se traduit par un délai de prise en charge médicale au delà duquel la victime peut voir son état s'aggraver (Ministère de la santé et de la solidarité, 2006) (Dhahri, 1999). On distingue :

(1) les **urgences absolues** :

- **extrême urgence** dont le pronostic vital des victimes est mis en jeu dans l'immédiat
- **urgence premier degré** dont le pronostic vital des victimes est mis en jeu au bout de 6 heures.

(2) les **urgences relatives** regroupent les victimes de deuxième et troisième degré nécessitant respectivement une prise en charge dans un délai de 18 heures et de 36 heures.

(3) Les **urgences dépassées**, ce sont les victimes dont l'espoir de survie est extrêmement faible (Huguenard, 1996).

(4) Les **impliqués**, ce sont les victimes qui ne présentent aucune lésion organique mais qui présente des signes de choc psycho-affectif.

2.4.2 Conditionnement primaire

Le conditionnement primaire est assuré par l'équipe médicale du PMA permettant ainsi d'allonger le délai de prise en charge à l'hôpital. Le conditionnement primaire concerne les premiers soins d'urgence qui garantissent une évacuation sanitaire dans de bonnes conditions.

2.4.3 Evacuation sanitaire

L'évacuation sanitaire assure l'arrivée des victimes dans les infrastructures hospitalières afin qu'elles bénéficient d'un traitement médical. Cette évacuation exige des choix judicieux du vecteur de transport et une parfaite coordination avec l'infrastructure d'accueil présumée avant et durant tout le trajet. La moindre faille dans le fonctionnement de ce maillon de la chaîne médicale risque de compromettre le résultat de tous les efforts consentis par l'équipe médicale du poste de secours.

Dans le cas de grandes catastrophes, les hôpitaux peuvent être détruits ou inutilisables. De même quand l'ampleur du sinistre, par le nombre de victimes, déborde très largement l'accueil local ou, quand les évacuations doivent se faire à grandes distances (le lieu de la catastrophe est très loin par rapport aux infrastructures hospitalières), un Centre Médical d'Evacuation (CME) est mis en place. Il représente une structure de soins, intermédiaire entre le PMA et les hôpitaux situés en zone arrière. Nous détaillons le fonctionnement du CME dans l'annexe 1.

2.5. Hôpital d'accueil

Lors d'un accident impliquant un grand nombre de victimes, l'infrastructure hospitalière doit être en mesure d'accueillir les sinistrés. Ainsi l'hôpital doit disposer d'un plan d'urgence appelé *plan blanc* qui lui permet en cas de catastrophe d'organiser ses ressources et ses moyens, pour faire face aux situations d'urgences (Ministère de la santé et de la solidarité, 2006).

Le plan blanc est un ensemble de procédures qui garantissent que les établissements de santé ont des capacités mobilisables à tout moment, une réactivité de la chaîne de commandement, et une coordination tant des moyens que des structures de soins entre elles. Nous nous concentrons dans les prochains paragraphes sur la gestion du flux de victimes dans le cadre du plan blanc.

2.5.1 Organisation des ressources humaines et matérielles

Comme nous l'avons indiqué dans le paragraphe 2-1, l'hôpital doit posséder la liste des personnels hospitaliers, permanents et en réserves, avec leurs coordonnées précises et le tableau de garde des personnels médical (médecins, chirurgiens, infirmiers,..) précisant l'heure d'arrivée de chacun à la structure hospitalière où il est affecté. Des consignes précises

sur la conduite à tenir en cas de mobilisation, sont indiquées dans les « fiches-réflexes » que nous présentons un exemple dans l'annexe 1.

L'hôpital doit pouvoir aussi recenser le matériel fonctionnel et en réserve, et également définir un plan d'aménagement de ses locaux pour assurer une meilleure circulation des flux humains et matériels.

2.5.2 Organisation des services pour l'accueil des victimes

Lorsque le plan d'urgence est déclenché, la cellule de crise doit réorganiser les services hospitaliers pour accueillir les victimes.

Ainsi elle doit procéder à l'augmentation de la capacité d'accueil des services hospitaliers en :

- Effectuant le recensement des lits disponibles.
- Déplaçant les malades, dont l'état le permet, provisoirement dans des services moins impliqués dans la prise en charge des victimes ou dans d'autres hôpitaux.
- Remplaçant les interventions chirurgicales programmées et non urgentes dès le déclenchement du plan d'urgence.
- Intégrant les interventions programmées et urgentes à l'ensemble des opérations à effectuer pour les victimes de la catastrophe.
- Activant les services techniques et communs les plus sollicités dans ces situations (anesthésie et réanimation, blocs opératoires, banque du sang, pharmacie, stérilisation, laboratoires, etc.).

2.5.3 Accueil et triage secondaire des victimes

Dès leur arrivée à l'hôpital, les victimes sont triées une deuxième fois par un médecin (triage secondaire) afin de réévaluer la gravité constatée sur le terrain. Leur état (degré d'urgence) peut avoir évolué pendant la phase d'évacuation sanitaire ou même au sein de l'hôpital d'accueil. L'accueil des victimes se fait par une seule entrée, en évitant le passage aux services d'urgences, et ce pour pouvoir contrôler le flux des victimes.

Cependant, à tout moment, des victimes pourront arriver à l'hôpital sans être passées par les étapes de tri et de régulation au niveau du PMA.

2.5.4 Circulation dans l'hôpital et à l'entrée de l'établissement

La circulation dans l'hôpital aussi bien des victimes, des ambulances, du personnel, que des familles et des médias est assurée par des trajets les plus simples possibles. Cela est

nécessaire surtout pour les victimes et les ambulances. Une entrée et une sortie distinctes sont balisées avec un sens unidirectionnel qui leur est attribué.

2.5.5 Conditionnement secondaire

Malgré le conditionnement primaire effectué au poste de secours, le plus souvent dans des conditions de travail contraignantes, les victimes subiront un nouveau conditionnement médical une fois arrivées dans l'infrastructure d'accueil. Le conditionnement secondaire est l'ensemble des opérations médicales qui assurent la stabilité de la victime.

2.5.6 Traitement définitif

Le conditionnement secondaire étant assuré, les victimes seront affectées aux divers services hospitaliers en fonction de leurs blessures. Elles subiront ensuite un traitement médical définitif et auront un suivi permanent de l'évolution de leur état dans l'hôpital d'accueil. Si la capacité de l'hôpital d'accueil est dépassée, les victimes sont orientées vers d'autres hôpitaux.

La loi n° 2004-806 du 09 août 2004 relative à la politique de la santé publique en France a donné un fondement législatif aux plans blancs. Le plan blanc a été adapté en Tunisie suite à la circulaire n° 2002/50 du 06 juin 2002. Aujourd'hui tout établissement hospitalier en France et en Tunisie doit donc avoir un plan qui lui permet en cas de catastrophe d'organiser ses ressources et ses moyens, pour faire face aux situations d'urgences (Ministère de la santé et de la solidarité, 2006).

Le plan blanc doit être élaboré et testé lors d'exercices de simulation avant la survenue d'une éventuelle catastrophe. Les tests ont pour but de vérifier la bonne organisation mais aussi le bon dimensionnement des ressources nécessaires.

Le plan blanc représente un maillon essentiel d'un plan de secours plus global permettant l'organisation de toute la chaîne des soins en situation d'exception. Ainsi, la coordination entre les différents maillons de la chaîne est très importante pour assurer une efficacité maximale.

2.6. Flux de victimes

Suite à une catastrophe, les victimes sont évacuées via une noria de ramassage au PMA. Une fois triées et conditionnées, elles sont orientées vers les hôpitaux d'accueils (petite noria d'évacuation) pour une prise en charge médicale et chirurgicale si nécessaire.

Si la capacité d'accueil de l'hôpital est dépassée, les victimes sont évacuées vers d'autres hôpitaux plus éloignés pour une prise en charge définitive (grande noria d'évacuation). Les victimes impliquées sont transférées aux hébergements si elles ne peuvent pas retourner à leurs domiciles. Les victimes décédées sont assignées aux morgues.

La représentation suivante montre les flux de victimes en situation d'exception.

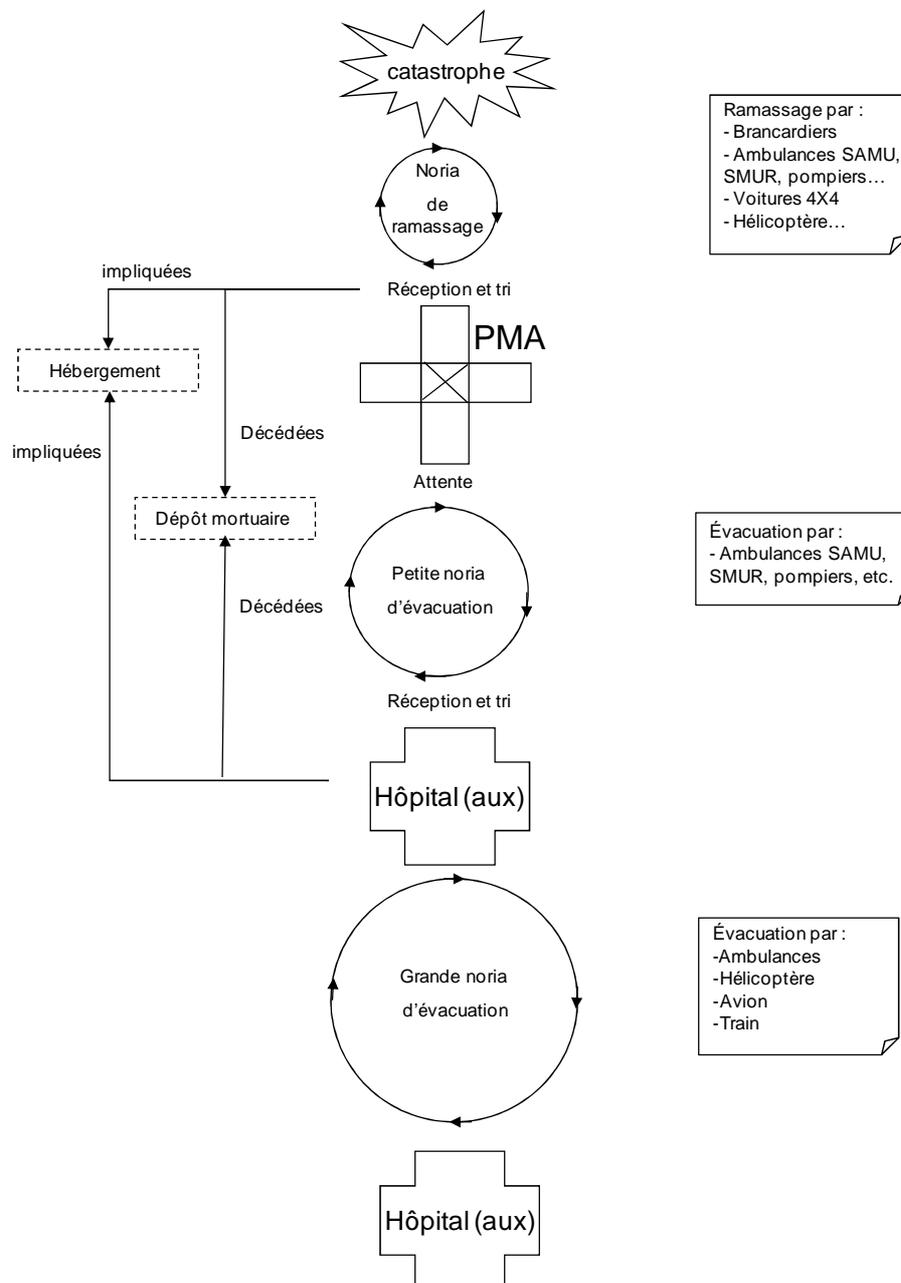


Figure 1.1. Flux de victimes en situation d'exception

3- Typologies des plans de secours

Un plan de secours est un mode d'organisation des soins à partir du lieu sinistré jusqu'à l'hôpital d'accueil. Il peut être relatif à une démarche d'organisation sanitaire, au nombre de victimes engendrées par le sinistre, ou à la nature de la catastrophe. Parmi ces plans de secours, il existe :

- Le plan d'organisation des secours ORSEC qui est une organisation générale des secours. Il recense l'ensemble des moyens publics et privés susceptibles d'être mis en œuvre. Il comporte aussi un organigramme et un schéma du réseau de liaisons entre les différents services et les secteurs concernés.
- Le plan rouge qui est prévu pour tous les risques présentant de nombreuses victimes. Ils sont définis comme l'ensemble des « procédures de secours d'urgences à engager afin de remédier aux conséquences d'un événement entraînant ou pouvant entraîner de nombreuses victimes » (Ministère de la santé et de la solidarité, 2006).
- Les plans particuliers d'intervention (PPI) qui sont établis pour « faire face aux risques particuliers liés à l'existence ou au fonctionnement d'ouvrages ou d'installations dont l'entreprise est localisée ou fixe ». Ces plans sont élaborés pour toutes les entreprises à risques (exp : installations nucléaires).
- Les plans de secours spécialisés qui sont déclenchés suite à « un accident ou un sinistre de nature à porter atteinte à la vie et à l'intégrité des personnes et des biens. Il s'agit par exemple des plans de secours spécialisés SNCF, autoroute, transport de matière dangereuse, inondations ».
- Les plans gouvernementaux « pirates » : en réaction aux cas de suspicion ou d'actes terroristes. Ils sont déclenchés par le Premier Ministre. Ces plans sont classés par type de menace, dont : le plan Biotox (biologique), le plan Piratox (chimique-toxique), le plan Piratome (nucléaire et radiologique), le plan Piranet (systèmes d'information) et le plan Piratair (espace aérien).
- Les plans sanitaires spécifiques, dont fait partie le plan variole qui précise les modalités de la vaccination antivariolique collective que les autorités sanitaires peuvent être conduites à mettre en place en urgence. Le plan de réponse contre une menace de SRAS (Syndrome Respiratoire Aigu Sévère) et le plan gouvernemental de prévention et de lutte « Pandémie grippale » fait également partie de ces plans spécifiques.

Il existe d'autres plans de secours qui ne sont pas cités ici. Ce sont plutôt des dispositifs dont la mise en œuvre départementale est demandée aux préfets par voie de circulaire, par exemple : le plan canicule et le plan air.

4- Conclusion

La particularité du système hospitalier en situation d'exception est qu'il repose d'une part sur le caractère soudain nécessitant des décisions et des actions rapides, et d'autre part, sur le grand nombre de victimes avec des degrés d'urgence variés et pour lesquelles une adéquation des ressources est nécessaire. Ainsi, il est important de développer pour répondre avec le maximum d'efficacité à de telles situations des outils de gestion et d'aide à la décision.

Dans la littérature, plusieurs travaux traitent des problèmes d'organisation et d'optimisation des systèmes hospitaliers en situation normale, en appliquant des méthodes et des outils issus du domaine manufacturier (Chaabane et Guinet, 2003).

Bien que le contexte hospitalier en situation normale et en situation d'exception n'est pas le même, il est utile de passer en revue les travaux qui traitent des problèmes d'optimisation en milieu hospitalier. Un grand nombre de ces travaux traitent du problème de la planification et de l'ordonnancement des interventions dans les plateaux médico-techniques eu égard à leur importance dans le système hospitalier.

Dans le chapitre 2 nous présentons les travaux menés sur l'organisation et l'optimisation des systèmes hospitaliers en général, et sur les blocs opératoires en particulier.

Chapitre 2. La revue de la littérature

Les systèmes hospitaliers sont des systèmes complexes faisant intervenir un nombre important et très varié de ressources humaines et matérielles. Dans la littérature plusieurs travaux ont été proposés pour résoudre certains problèmes qui relèvent de l'optimisation du flux humain et matériel, du dimensionnement, et de la programmation opératoire. (Ballou, 1992) classifie les problèmes de la logistique hospitalière selon trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel.

Nous présentons dans ce chapitre une revue de la littérature selon ces trois niveaux temporels. Nous détaillons plus particulièrement les travaux réalisés sur le dimensionnement, la planification et l'ordonnancement des interventions au niveau des blocs opératoires.

1- Niveau stratégique : dimensionnement

(Hammami, 2004) montre que le dimensionnement des systèmes hospitaliers est une tâche assez difficile pour deux raisons : la multiplicité des flux de soins (HRP2, 2004), et le caractère stochastique des durées des activités composant ces flux (HRP2, 2004).

Les problèmes de dimensionnement sont souvent rencontrés dans la littérature dans le but d'optimiser les ressources critiques (Kusters et Groot, 1996) (Wang et *al.* 2007) et de satisfaire les besoins sanitaires. La plupart de ces travaux sont basés sur quatre approches de résolution : Les chaînes de Markov, la programmation mathématique, la théorie des files d'attente et la simulation.

Les chaînes de Markov sont utilisées par (Kao, 1974) pour analyser les différents flux de patients dans les unités de soins et estimer leurs temps de séjour à l'hôpital. Ainsi, il est possible de calculer les ressources nécessaires en personnels de soins et en lits d'hospitalisation. (Tancrez et *al.*, 2008) étudient la perturbation engendrée par l'intercalation d'urgences dans le programme opératoire. Ce travail permet de dimensionner le nombre de salles dédiées aux cas urgents.

Plusieurs travaux utilisent la modélisation mathématique pour résoudre les problèmes traités (Vissers, 1994). (Vissers, 1998) propose un modèle à trois étapes. La première étape consiste à chercher selon le nombre de patients admis à l'hôpital, le nombre optimal en lits d'hospitalisation, personnels infirmiers et salles opératoires. La deuxième étape cherche à

affecter ces ressources aux différentes spécialités. Enfin, la dernière étape attribue le reste des moyens aux spécialités en fonction des ressources critiques déjà dimensionnées.

(Teow et Tan, 2007) présente un modèle de programmation linéaires en deux étapes. La première étape permet de dimensionner le nombre de lits. La deuxième étape consiste à affecter ces lits à leur emplacement suivant la configuration des salles et la formation du personnel infirmier.

(Lapierre et *al.* 1999) et (Murracy, 2005) proposent une approche intégrée pour le dimensionnement du nombre de lits et la planification des interventions en tenant compte du nombre de patients admis à l'hôpital. (Venkataraman et Brusco, 1996) proposent aussi une approche intégrée pour le dimensionnement et la planification du personnel infirmier.

(Kusters et Groot, 1996) utilise la programmation dynamique pour le dimensionnement des lits d'hospitalisation en prenant en considération le programme opératoire déjà établi, la disponibilité du personnel infirmier et les dates d'arrivée et de sortie des patients de l'hôpital.

(Gorunescu et *al.*, 2002) (Kao et Tung, 1981) et (Mackay, 2001) dimensionnent le nombre de lits en respectant les différentes configurations des salles. Les auteurs utilisent la théorie des files d'attente. Les modèles ainsi développés sont basés sur les flux de patients, leur temps d'attente, et la durée de leur séjour à l'hôpital. (Cochran et Roche, 2009) propose un modèle basé sur les flux de patients pour dimensionner la surface du service d'urgence selon certains critères fixés au préalable.

Pour comprendre et analyser le fonctionnement des systèmes hospitaliers, la simulation est largement utilisée dans la littérature (Dumas, 1984) (Harper et Shahani, 2002) (Kim et Horowitz, 2002) (Ridge et *al.*, 1998). Dans ce contexte, certains travaux se sont intéressés au dimensionnement du nombre des salles opératoires et des lits de réveil (Dussauchoy et *al.*, 2003), ainsi que des lits des unités de soins intensifs (Kim et *al.*, 2000).

Au service d'urgence, la simulation est aussi utilisée pour ajuster le nombre des équipes médicales (Wang and *al.* 2007) (Miller et *al.*, 2004) et optimiser le service d'urgence par le dimensionnement du nombre de lits nécessaires pour accueillir les patients (Miller et *al.*, 2004). Pour réduire le temps d'attente des patients aux urgences, (Wang and *al.* 2007) améliorent l'efficacité des médecins en leur éliminant des actes qui peuvent être délégués au corps paramédical. Aussi ils ont pu identifier un passage « rapide » auprès des patients qui ne nécessitent pas de tests complémentaires et l'opinion de spécialistes. L'ajustement du nombre d'équipes médicales a permis de garder un fonctionnement normal en prenant en compte les ressources matérielles attribuées et le nombre de patients à traiter.

D'après cette étude sur le dimensionnement des ressources hospitalières, nous remarquons que le dimensionnement du nombre de lits d'hospitalisation est particulièrement étudié dans la littérature. En effet, Les lits d'hospitalisation constituent une ressource goulot de l'hôpital (Visser, 1998).

2- Niveau tactique et opérationnel : planification et ordonnancement

Le domaine hospitalier est un secteur qui induit des coûts élevés. Ainsi, les méthodes d'optimisation trouvent largement leurs places notamment ceux qui concernent l'optimisation de la planification.

Le problème de planification est souvent associé à un problème d'ordonnancement. En effet, au niveau du bloc opératoire par exemple, le problème de la planification peut se modéliser comme un problème hebdomadaire d'affectation des interventions aux salles opératoires et d'un problème journalier d'ordonnancement des interventions du bloc opératoire (Hammami, 2004) (Fei et al., 2009 a).

Dans la littérature, plusieurs travaux traitent le problème de la planification et d'ordonnancement des interventions au bloc opératoire. L'importance de ce problème dans le système décisionnel, explique l'abondance des travaux. Il s'agit d'ordonner et d'affecter les interventions aux ressources (salles opératoires, chirurgiens, etc.), et ainsi déterminer, sur un horizon fixe, les dates de début de chaque intervention (Kao, 1973) (Kao, 1974) (Hancock et Walter, 1984) (Kusters et Groot, 1996) (Hammami, 2004) (Blake J.T. et al., 2002 b), (Kuo P.C. et al., 2003), (Guinet et Chaabane, 2003), (Fei H. et al., 2004) (Fei et al., 2009 a).

Un programme opératoire peut tenir compte de tous les services connexes aux salles opératoires qui impactent sur le processus opératoire, à savoir la salle de surveillance post-interventionnelle, dite salle de réveil, et éventuellement les services d'hospitalisation et le service de soins intensifs et de réanimation.

Nous présentons dans ce qui suit les travaux portant sur la construction des programmes opératoires, la modélisation et la simulation des flux hospitaliers, ainsi que sur la mutualisation des ressources humaines et matérielles. Un intérêt particulier est porté aux urgences.

2.1. La programmation opératoire en situation normale

2.2.1 La programmation opératoire sans tenir compte des urgences

Dans la littérature plusieurs travaux se sont intéressés à la programmation opératoire centrée sur les salles opératoires. Pour cette raison, plusieurs politiques de programmation ont été proposées.

L'horizon d'étude peut être vierge de toute contrainte de placement, on parle dans ce cas de programmation ouverte. (Kharraja, 2004). (Kharraja et *al.*, 2002) distinguent deux méthodes de programmation ouverte. La première méthode consiste à affecter les interventions d'une manière chronologique : premier demandeur, premier servi. La deuxième méthode est basée sur un processus de négociation entre les différents acteurs. Elle est plus avantageuse que la première méthode parce qu'elle prend en considération les avis de tous les acteurs ce qui rend cette technique souple et adaptable aux aléas. La première méthode est plus simple à mettre en œuvre, mais elle engendre un fort taux de déprogrammation et de fortes tensions entre les chirurgiens et les services.

(Fei et *al.*, 2009 a) partagent le problème en deux parties : (1) planification des interventions, en affectant à chaque patient le jour où il sera opéré, et les ressources nécessaires (salle opératoire et chirurgien) à la réalisation de son opération. (2) ordonnancement journalière des interventions dans les salles opératoires sous contraintes de disponibilité des lits dans la salle de réveil. Cependant, (Roland et *al.*, 2009 a) proposent une approche intégrant simultanément la planification et l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires.

D'autres travaux se sont intéressés à la planification dans des salles opératoires spécialisées en endoscopie. (Fei et *al.*, 2009 b) proposent une planification des interventions chirurgicales dans un centre d'endoscopie composé de deux salles opératoires.

(Beliëm et Demeulemeester, 2008) considèrent un programme opératoire préétabli qui sert à élaborer un ordonnancement du personnel de soins.

L'horizon d'étude peut contenir des plages horaires programmées à l'avance par chirurgien ou par service, on parle alors de programmation par allocation préalable de plages (Dexter et *al.*, 1999), (Strum et *al.*, 1999). Il s'agit de définir un squelette de programme opératoire composé de plusieurs plages horaires à l'intérieur desquelles les chirurgiens ou les services placeront leurs interventions à leur convenance. Ainsi, la disposition et la taille des plages contribuent largement à la qualité de la solution lors d'affectation des interventions aux

plages horaires. (Dexter et *al.*, 2001) montrent que dans le cas des plages sous-dimensionnées l'hôpital a recours souvent à des heures supplémentaires.

Ainsi, il est important de dimensionner les plages horaires. (Dexter et *al.*, 2002 a) calculent pour chaque groupe de chirurgiens une plage horaire en se basant sur une technique d'extraction des données en estimant le nombre total d'heures nécessaires pour chaque groupe de chirurgiens. Des modèles statistiques sont aussi proposés dans (Dexter et *al.*, 2002 b) et (Strum et *al.*, 1999). Certains travaux se sont intéressés à la programmation linéaires en nombre entiers et les heuristiques de bin packing (Blake et *al.*, 2002 a) pour résoudre ce type de problématique.

Une troisième stratégie de programmation opératoire consiste à allouer des plages horaires par chirurgien ou par spécialité (service) avec la possibilité d'ajustement (Dexter F. et *al.*, 2000), (Hammami S. et *al.*, 2006). Cette méthode de programmation est basée sur les techniques présentées dans le paragraphe précédent. Toutefois (Kharraja, 2004) distingue deux méthodes. La première méthode consiste à pallier les surcharges de travail de certains chirurgiens en réaffectant certaines interventions aux plages non affectées. La deuxième méthode consiste à calculer le taux de remplissage des plages et à valider à chaque fois les durées des plages par les chirurgiens (*Released block time*).

Ainsi la programmation opératoire par allocation avec possibilité d'ajustement permet d'augmenter le taux de remplissage des plages horaires (Hammami, 2004). En effet, ce processus permet d'améliorer les performances du programme opératoire en ajustant les plages horaires afin de pouvoir planifier des nouvelles interventions.

Une comparaison des performances des politiques de programmation opératoire se trouve dans (Chaabane S. et *al.*, 2006).

(Hammami S. et *al.*, 2006) développent 3 programmes linéaires en nombre entiers : (1) formation des groupes de chirurgiens. (2) construction du Plan Directeur d'Allocation (PDA) qui permet d'allouer des plages individuelles et des plages communes aux chirurgiens. (3) affectation des interventions au PDA. En effet, le programme commence par remplir les plages individuelles, puis les plages communes, et s'il reste des interventions non affectées alors elles sont placées dans les plages banalisées. Ces derniers représentent la somme des temps inexploités par plage horaire pour des chirurgiens opérant dans la même salle et pendant le même jour (Kharraja et Marcon, 2003). Ce problème suppose que les autres services (Salles de réveil, services d'hospitalisation,...) sont bien dimensionnés.

[(Dexter F. et *al.*, 2000) , proposent une approche qui consiste à affecter les nouvelles interventions dans les plages dites : « Overflow Block Time » (OBT). Ces plages représentent la somme des temps inexploités par plage horaire, durant une semaine, par des chirurgiens du même groupe. (Dexter F. et *al.*, 2000) affectent chaque nouvelle intervention au premier OBT qui arrive à l'absorber, ou à l'OBT permettant de la réaliser au plus tôt.

Bien que les travaux sur la programmation opératoire centrée sur les salles opératoires sont assez abondants, les travaux qui prennent en considération certains services annexes tels que les salles de surveillance post-interventionnelles (SSPI), (Ozkarahan, 2000), (Jebali A. et *al.*, 2004), (Marcon.E., 2004), (Fei H. et *al.*, 2006), (Guinet A. et *al.*, 2006) (Fei et *al.*, 2009 a), et les services d'hospitalisation (Jebali A. et *al.*, 2004) restent relativement pauvres.

(Kharraja et *al.*, 2002) et (Guinet, 2002) modélisent le problème de la planification des interventions dans les salles opératoires et la salle de réveil comme étant un flow shop hybride à deux étages. Les salles opératoires constituent des « machines parallèles » au premier étage et les lits de la salle de réveil sont des « machines identiques parallèles » au deuxième étage. (Kharraja et *al.*, 2002) considèrent ce problème de flow shop hybride avec blocage. C'est-à-dire que le patient ne peut être affecté à un lit qu'à la condition qu'une place soit libre dans la salle de réveil. La fonction objectif est la minimisation du makespan (C_{max}). Ainsi le problème considéré est FH2/Block/ C_{max} . (Guinet, 2002) considère que les patients passent sans attente de la salle opératoire à la salle de réveil. Un temps de nettoyage de la salle opératoire est nécessaire après chaque intervention. La fonction objectif est la minimisation du C_{max} . Le problème est modélisé par : $N/2, m_1, m_2, I/F, no-wait, R_{nsd}/C_{max}$, avec m_1 le nombre de salles opératoires et m_2 le nombre de lits dans la salle de réveil. (Augusto et *al.* 2009) réalisent un programme opératoire en étudiant l'impact de non disponibilité des lits dans la salle de réveil. Ils considèrent trois ressources : les brancardiers, les salles opératoires et les lits de réveil.

Très peu de travaux se sont intéressés au programme opératoire centré sur les salles opératoires et les services hors bloc opératoire notamment sur la salle des soins intensifs et la salle de réanimation (Kim et *al.*, 2000) (Kim et Horowitz, 2002) et les services d'hospitalisation.

Différentes méthodes de résolution du problème de la programmation opératoire sont présentées dans la littérature. Elles se basent sur : la programmation linéaire (Ozkarahan

2000), (Blake *et al.*, 2002 a), (Guinet et Chaabane, 2003), (Jebali A. *et al.*, 2004), (Jebali *et al.*, 2005), la génération de colonnes (Fei *et al.*, 2004) (Fei *et al.*, 2009 a) (Roland *et al.*, 2009 a) (Fei *et al.*, 2009 b), les algorithmes génétiques (Fei *et al.*, 2009 a) (Roland *et al.*, 2009 a) et la recherche tabou (Fei *et al.*, 2006). Les règles longest surgical time first et shortest surgical time first (Pinedo, 2002), les procédures Λ -shapped et V-shapped (Al-Turki *et al.* 1996), (Chunfu 2001) ainsi que l'algorithme de Johnson (Johnson 1954) sont étudiés pour le lissage de la charge en SSPI et la minimisation du C_{max} dans (Marcon, 2004). (Augusto *et al.* 2009) utilisent la relaxation lagrangienne pour résoudre le problème de la programmation opératoire en étudiant l'impact de disponibilité des lits dans la salle de réveil.

2.1.2 La programmation opératoire avec prise en compte des urgences

Bien que la programmation opératoire ait fait l'objet de plusieurs efforts de recherche dans le cadre des interventions programmées, peu de travaux ont pris en considération les urgences.

Dans (Kuo *et al.*, 2003) les auteurs proposent un programme linéaire, qui alloue, dans le planning pré-établi une plage horaire par chirurgien dédiée aux urgences non programmées. Aucune intervention non programmée ne pourrait être réalisée en dehors de ces plages horaires. Dans (Lamiri *et al.*, 2006), un modèle stochastique pour la planification simultanée, des interventions programmées et celles non programmées, est présenté. Les auteurs proposent une approche basée sur la programmation linéaire mixte en nombres entiers et la méthode de simulation Monte Carlo. Il s'agit d'insérer une urgence dans un programme prédictif déjà établi. (Roland *et al.*, 2009 b) présentent aussi un modèle stochastique pour la planification des interventions dans le bloc opératoire en utilisant les chaînes de Markov. Le dépassement des durées opératoires estimées, l'arrivée des cas urgents et le blocage suite à une insuffisance des lits dans la salle de réveil, sont tous modélisés par des événements stochastiques. Une simulation du modèle proposé a permis d'identifier le taux de perturbations et le temps d'attente des patients qui nécessitent des actes urgents. (Hammami, 2004) a développé une approche qui constitue plusieurs possibilités d'insertion d'une urgence dans le programme opératoire. Chaque possibilité constitue une étape qui doit être testée avant de passer à l'étape d'après : (1) insertion de l'urgence au sein du groupe de chirurgiens pour lequel l'urgence est affectée à l'un de chirurgiens de ce groupe. (2) insertion de l'urgence à l'une des plages banalisées. (3) réaffectation des plages du groupe de chirurgiens pour lequel l'urgence est affectée à l'un des chirurgiens de ce groupe. (4) insertion de

l'urgence dans d'autres groupes de chirurgiens. (5) redéfinition des plages restantes des chirurgiens.

La prise en charge des urgences vitales inter-hospitalières a été traitée dans (Glaa, 2008). Ce problème est résolu en deux étapes : (1) la conception et l'évaluation de la chaîne de survie inter-hospitalière. (2) le dimensionnement et l'affectation de l'équipe mobile de réanimation d'urgence ainsi que le positionnement des défibrillateurs semi automatiques. L'auteur précise que le problème peut être considéré dans le cas d'une catastrophe.

La plupart des travaux qui traitent les situations d'urgence (Hammami, 2002) (Hammami, 2004), se sont inspirés des recherches réalisées sur les problèmes réactifs dans le domaine industriel. A savoir : l'insertion d'un ou plusieurs jobs (Tadeuz, 2007), qui peut (peuvent) être urgent(s) (Sun et Xue, 2001), dans le planning préétabli, et l'ordonnancement des activités avec des durées incertaines (Van de Vonder et *al.*, 2007) (Bonfill et *al.*, 2007). (Tadeuz, 2007) réordonnance un ensemble d'ordres de fabrication sur plusieurs machines identiques organisées en flow shop. Le réordonnancement est réalisé suite à une perturbation causée par : la modification de la quantité d'un ordre de fabrication (OF) et l'annulation ou l'ajout d'un ou plusieurs OF. Tadeuz utilise trois stratégies de réordonnancement à savoir : le réordonnancement de tous les OF suite à une perturbation à un instant donné (REALL), le réordonnancement d'une partie des OF (RENON), et le réordonnancement uniquement des OF qui sont en attente de la matière (REMAT).

(Bonfill et *al.*, 2007) traitent un problème d'ordonnancement robuste et réactif dans un environnement incertain. Deux perturbations sont considérées : les durées incertaines des opérations et les pannes. Ce travail comporte deux étapes de résolution : (1) la génération d'un ordonnancement proactif permettant d'absorber au maximum les perturbations qui surviennent au cours du processus de production, minimisant ainsi le réordonnancement des lots. (2) l'approche réactive qui sert à ajuster l'ordonnancement suite à une perturbation, soit par une simple translation à droite (shift right), ou si nécessaire par un réordonnancement des lots.

En cas d'insertion d'un OF urgent, (Sun et Xue, 2001) passent directement au réordonnancement des OF restantes.

En situation normale, les critères fréquemment utilisés pour programmer les interventions sont, la maximisation du taux d'exploitation du bloc opératoire (Kuo et *al.*, 2003), (Lamiri et *al.*, 2006), (Fei H. et *al.*, 2006), (Hans et *al.*, 2007) (Fei et *al.*, 2009 b), la minimisation du C_{max} (Marcon, 2004), la minimisation des heures supplémentaires

(Chaabane S. et *al.*, 2006), (Guinet A. et *al.*, 2006), (Dexter et *al.*, 2007) (Fei et *al.*, 2009 b) et de l'attente entre les dates d'hospitalisation et d'intervention (Jebali A. et *al.*, 2004) (Persson et A.Persson, 2009). (Hammami, 2004) minimise le coût d'introduction d'une urgence dans le programme opératoire en minimisant le nombre des interventions à reporter.

2.2. Modélisation et simulation

Pour comprendre et analyser le fonctionnement de tels systèmes, différents outils de modélisation et de simulation sont utilisés (Artiba et *al.*, 2004), (Bounekkar et *al.*, 2004), (Trilling et *al.*, 2004) (Aleksy et Chabroul, 2006), (Aloui et *al.*, 2006) (Glaa, 2008).

Dans ce sens, Wang.Q (Wang, 2004) propose un modèle mathématique pour l'évaluation du taux de service d'une source goulot (un service d'urgence par exemple) et du taux de mortalité, dans le cas où l'arrivée des patients est aléatoire. Dans (Balin et Giard, 2006) et (Tao et Guinet, 2006), les auteurs présentent des modèles de simulation du processus de passage des patients aux urgences. Ils utilisent respectivement ARIS et des concepts orientés objets, afin d'identifier les différents points de dysfonctionnement et d'améliorer le processus existant.

(Marcon, 2004) propose une simulation de différentes stratégies d'ordonnancement des interventions au bloc opératoire afin d'évaluer leur impact sur les salles de soins post-interventionnels (SSPI). L'objectif est de minimiser la date de fermeture de la SSPI (à partir d'un lissage de la charge horaire). La simulation est réalisée sur deux configurations de blocs opératoires : spécialisés et polyvalents, avec cinq règles d'ordonnancement : longest surgical time first qui permet de minimiser le Cmax et par conséquent les dépassements horaires d'ouverture des salles opératoires, shortest surgical time first qui permet de minimiser le nombre d'interventions en retard, V-shaped ou Λ -shaped qui permet de minimiser la somme des retards et enfin l'algorithme de Johnson qui permet d'optimiser le critère Cmax.

Le problème traité est un flow-shop hybride stochastique (durées modélisées par des variables aléatoires) à deux étages avec 'n' machines en parallèle sur le premier étage (salles d'opérations) et 'm' machines en parallèle au second étage (les lits à SSPI), avec blocage.

Les trajectoires empruntées par les patients, au service d'urgence, sont modélisées dans (Bounekkar et *al.*, 2004). Les auteurs considèrent qu'une trajectoire-patient est une succession, dans le temps, d'événements relatifs à un patient à partir d'un instant initial et pendant une durée donnée. Les événements sont caractérisés par une nomenclature de consommation des ressources et des biens de santé. La démarche de résolution consiste tout

d'abord à structurer les données, ensuite à représenter la trajectoire du patient utilisant les principes de construction d'image, et enfin à définir les différentes méthodes pour classifier les trajectoires.

Pour minimiser le temps d'attente des patients dans un hôpital suédois, (Persson et A.Persson, 2009) propose une approche intégrant de façon conjointe la simulation et l'optimisation.

2.3. Mutualisation des ressources humaines et matérielles

Certains travaux imposent que chaque chirurgien ne peut opérer que dans une seule salle opératoire (Marcon et *al.*, 2003), (Nouaouri et *al.*, 2008). Dans d'autres travaux, les chirurgiens peuvent être nomades et intervenir, dans une même journée, dans des salles différentes. Le problème d'ordonnancement est assimilé, dans ce cas, à un problème d'ordonnancement sur machines parallèles (Kharraja et *al.*, 2002). Par rapport à cette organisation, et avec comme objectif la minimisation du Cmax, Guinet, (Guinet et Chaabane, 2003) et Jebali (Jebali, 2004) ont proposé des modèles linéaires mixtes. Dans (Guinet A. et *al.*, 2006) les auteurs considèrent, en plus de la minimisation du Cmax, la minimisation du flow time (somme des dates de réalisation des interventions). Les auteurs proposent une approche heuristique en trois phases. Une première phase de pré-ordonnancement qui définit, à l'aide d'une règle de priorité (SPT ou LPT), les précédences séquentielles entre les interventions de chaque chirurgien. Une deuxième phase, basée sur une heuristique, est dédiée à l'ordonnancement des interventions respectant les contraintes de précédence. Et enfin, une troisième phase utilisant des règles FAM ou LBM pour l'affectation des interventions aux différentes salles. (Vermeulen et *al.*, 2009) proposent une méthode basée sur la programmation dynamique assurant une mutualisation des ressources entre plusieurs patients partagés en groupe.

Dans l'hypothèse de chirurgiens nomades avec prise en compte des salles de surveillances post-interventionnelles (SSPI), (Ozkarahan, 2000), (Marcon, 2004), (Fei H. et *al.*, 2006), (Guinet A. et *al.*, 2006), et des services d'hospitalisation (Jebali et *al.*, 2005), le problème est assimilé à un flow-shop hybride à deux étages.

Il est important de noter que dans tous les travaux établis, le problème d'affectation des interventions aux chirurgiens n'est en aucun cas posé. En effet, chaque intervention est assignée au départ au chirurgien de la spécialité demandée. A l'opposé, dans la situation de

crise que nous abordons, les chirurgiens sont tous polyvalents et doivent se partager les salles opératoires, afin de réaliser un maximum d'actes chirurgicaux.

3- Conclusion

Bien que le problème de programmation des interventions au bloc opératoire a fait l'objet de plusieurs efforts de recherche en situation normale, il n'existe pas, à notre connaissance, de travaux abordant ce problème en situation d'exception, où le défi majeur de l'hôpital est de sauver le maximum de vies humaines. Par ailleurs, suite à une catastrophe, les interventions programmées sont différées pour céder la place aux interventions urgentes. Ainsi, les victimes évacuées ne peuvent être assimilées à des urgences quotidiennes, auxquelles les travaux qui s'y rapportent s'appliqueraient.

Notre champ d'étude se limite aux salles opératoires, ressource goulot des établissements de soins notamment dans le cas d'une catastrophe. Notre étude porte sur : (1) le dimensionnement des ressources humaines et matérielles dans le cadre des exercices de simulation du plan blanc. (2) l'ordonnancement et l'affectation des interventions dans les salles opératoires avec et sans partages des ressources critiques (salles opératoires et chirurgiens). (3) l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires en tenant compte des différentes perturbations.

Chapitre 3. Le dimensionnement des ressources critiques

Lors d'une situation d'exception impliquant un grand nombre de victimes, l'hôpital doit être en mesure d'accueillir les sinistrés. Cette mission ne peut être accomplie que si l'établissement hospitalier dispose des ressources lui permettant de prendre en charge toutes les victimes.

Plusieurs travaux se sont intéressés au problème de dimensionnement dans le milieu hospitalier en situation normale. La plupart d'entre eux centrent leurs études sur les ressources critiques, plus particulièrement sur les lits d'hospitalisation (Gorunescu et *al.*, 2002) (Kao, 1974) (Kao et Tung, 1981) (Mackay, 2001). Ces dernières années, quelques travaux ont porté un intérêt plus particulier au problème de dimensionnement dans les services d'urgence (Cochran et Roche, 2009) (Miller et *al.*, 2004) (Wang and *al.* 2007). Malheureusement, tous ces travaux ne considèrent pas des situations d'exception avec un afflux massif de victimes demandant des soins chirurgicaux urgents.

Nous traitons dans ce chapitre le problème de dimensionnement des ressources critiques dans le cadre des exercices de simulations du plan blanc. Nous cherchons, plus précisément à proposer un outil d'aide à la décision pour dimensionner le nombre de salles opératoires nécessaires, et à calculer les dates d'arrivées au plus tard des chirurgiens pour opérer toutes les victimes qui ont besoin d'un traitement chirurgical.

1- La présentation du problème

1.1. Le plan blanc

Afin d'assurer un maximum d'efficacité, plusieurs pays imposent à leurs établissements hospitaliers de disposer d'un plan d'urgence. Ce plan consiste à préparer et organiser les procédures, ressources et moyens pour être en mesure de répondre avec efficacité à toute situation exceptionnelle. A titre d'exemple, aux Etats Unis d'Amérique les hôpitaux doivent disposer d'un plan d'urgence nommé « Disaster Management Plan (DMP) ». Dans d'autres

pays comme la France et la Tunisie, chaque établissement sanitaire doit disposer d'un plan blanc (Ministère de la santé publique, 2002) (Ministère de la santé et de la solidarité, 2006).

Le plan blanc est un ensemble de procédures qui garantissent qu'un établissement de santé a des capacités mobilisables à tout moment. Il est testé lors des exercices de simulation réguliers, selon plusieurs scénarios. Ces tests ont pour but de vérifier la bonne organisation des ressources humaines et matérielles, et d'estimer les ressources supplémentaires nécessaires pour faire face à une situation d'urgence donnée. Ils vérifient entre autres la liste des personnels, permanents et en réserve, ainsi que les dispositifs médicaux et paramédicaux disponibles pour traiter toutes les victimes.

1.2. Le problème étudié

En situation d'exception, les victimes sont évacuées du lieu du sinistre à l'hôpital d'accueil via le PMA. Le triage au PMA permet de définir leur degré d'urgence, leur date d'arrivée à l'hôpital, la nature de leurs pathologies, et la durée opératoire nécessaire pour celles qui nécessitent des actes chirurgicaux.

Parmi la liste des personnels, permanents et en réserve figure le tableau de garde des équipes chirurgicales en cas d'exception (composées des chirurgiens, des anesthésistes et des infirmiers) précisant l'heure d'arrivée de chacune d'elles à l'hôpital. Toutefois, du fait des conditions de déplacement contraignantes en situation de crise, un ou plusieurs membres de l'équipe chirurgicale peut (ou peuvent) arriver en retard. Nous supposons dans ce chapitre que chaque chirurgien est affecté à une seule salle opératoire.

Lors des exercices de simulation du plan blanc, l'infrastructure hospitalière doit être en mesure d'évaluer sa capacité de prise en charge et d'estimer ainsi ses besoins en ressources humaines et matérielles. Elle doit prévoir entre autres le nombre de salles opératoires nécessaires et les dates d'arrivées au plus tard des équipes chirurgicales afin de traiter toutes les victimes.

Ainsi, l'hôpital doit disposer d'un outil d'aide à la décision qui lui permettra de connaître la capacité qu'il doit mobiliser. Pour calculer le nombre de salles opératoires minimales, nous devons connaître le nombre, l'état et les dates d'arrivées des victimes qui nécessitent des interventions chirurgicales, ainsi que les dates d'arrivées au plus tôt des équipes chirurgicales à l'hôpital d'accueil (selon le tableau de garde). En fonction de ces données et avant tout exercice de simulation du plan blanc, l'hôpital doit prévoir plusieurs scénarios pour pouvoir

évaluer très rapidement la capacité dont il a besoin. Les dates d'arrivées au plus tard sont calculées dès que le nombre de salles opératoires ont été fixées.

Dans la suite de ce texte, chaque fois que nous évoquerons une ressource « chirurgien », elle sera équivalente à « l'ensemble de l'équipe chirurgicale » composée des tous les praticiens hospitaliers, infirmiers, anesthésistes, etc... qui entourent ce seul chirurgien.

Dans ce contexte, nous traitons le problème de dimensionnement des ressources les plus critiques en situation d'urgence : salles opératoires et chirurgiens.

2- L'approche proposée

Pour la résolution du problème de dimensionnement, nous proposons deux modèles de programmation linéaire en nombres entiers (\mathcal{P}_1) et (\mathcal{P}_2).

Etant donné le tableau de garde des chirurgiens, avec leurs dates d'arrivées au plus tôt à l'hôpital, le programme (\mathcal{P}_1) cherche à optimiser l'ordonnancement des interventions de façon à minimiser le nombre de salles opératoires exploitées et à traiter toutes les victimes qui ont besoin d'actes chirurgicaux.

Dans un deuxième temps, nous proposons, en fixant le nombre de salles opératoires (trouvé par (\mathcal{P}_1)), le programme (\mathcal{P}_2) qui consiste à définir les dates d'arrivées au plus tard (ou les marges horaires « slack time ») des chirurgiens tout en garantissant la prise en charge de l'ensemble des victimes.

Nous présentons ci-dessous les étapes de résolution de l'approche proposée :

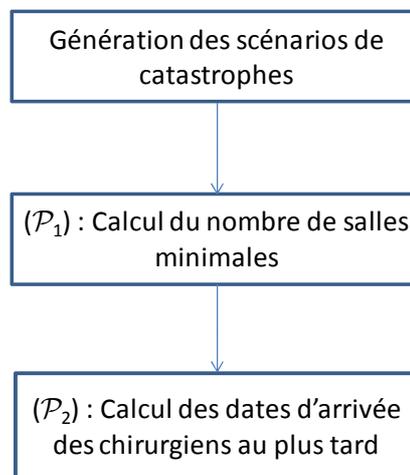


Figure 3.1. Etapes de résolution

Ainsi, les perturbations qui peuvent survenir à cause des retards des équipes chirurgicales, seront absorbées par les slacks times et l'optimalité des solutions sera toujours assurée avec le même nombre de salles opératoires. Cependant, dans le cas où le chirurgien arrive avant sa date au plus tard, le slack time permettra d'absorber d'autres types de perturbations à savoir l'arrivée d'une nouvelle victime, la dégradation d'un état, le dépassement d'une durée opératoire, le retard d'approvisionnement des salles opératoires en matériels, etc.

Avant de présenter les deux modèles mathématiques des programmes linéaires (\mathcal{P}_1) et (\mathcal{P}_2), nous définissons les notations suivantes :

N Nombre de victimes.

H Nombre total de chirurgiens.

T Horizon de l'étude.

d_i Durée de l'intervention de la victime i .

dl_i Date limite d'intervention de la victime i .

rv_i Date d'arrivée de la victime i à l'hôpital.

rc_h Date d'arrivée du chirurgien h à l'hôpital, prédéfinie selon le tableau de garde.

Considérons les variables de décisions suivantes :

t_i Date de début de l'intervention de la victime i .

rl_h Date d'arrivée au plus tard du chirurgien h .

St_h Le slack time du chirurgien h ($St_h = rl_h - rc_h$).

$y_{ijh} = 1$ si l'intervention de la victime j suit l'intervention de la victime i avec un même chirurgien h , 0 sinon.

$X_{ith} = 1$ si l'intervention de la victime i est affectée à l'instant t au chirurgien h , 0 sinon.

$NO_h = 1$ si le chirurgien h est affecté à une salle opératoire, 0 sinon.

2.1. Le dimensionnement du nombre des salles opératoires

Le modèle d'optimisation (\mathcal{P}_1) suivant utilise les notations présentées ci-dessus. Nous proposons un programme linéaire en nombres entiers.

- La fonction objectif (1) minimise le nombre de salles opératoires utilisées.

$\text{Minimiser } \sum_{h=1}^H NO_h$	(1)
---------------------------------------	-----

- Les contraintes (2) assurent qu'une victime est affectée une et une seule fois pendant l'horizon T .

$\sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^H X_{ith} = 1$	$\forall i \in \{1..N\}$	(2)
---	--------------------------	-----

- Les contraintes (3) vérifient que pour chaque chirurgien h , une victime au plus est opérée à l'instant t .

$\sum_{i=1}^N X_{ith} \leq 1$	$\forall t \in \{0..T\} \quad \forall h \in \{1..H\}$	(3)
-------------------------------	---	-----

- Les contraintes (4) imposent pour chaque victime traitée, que la date de prise en charge ne dépasse pas la date limite d'intervention.

$t_i - dl_i \leq 0$	$\forall i \in \{1..N\}$	(4)
---------------------	--------------------------	-----

- (5) et (6) vérifient qu'une intervention ne peut avoir lieu que lorsque victime et chirurgien sont présents à l'hôpital.

$t_i - rv_i \geq 0$	$\forall i \in \{1..N\}$	(5)
---------------------	--------------------------	-----

$t_i - rc_h \sum_{t=0}^T X_{ith} - M \left(1 - \sum_{t=0}^T X_{ith} \right) \geq 0$	$\forall i \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1..H\}$	(6)
--	---	-----

- Les contraintes (7a), (7b) et (8) permettent de mettre $y_{ijh}=1$ chaque fois que l'intervention j est effectuée à la suite de i par le même chirurgien h .

$\sum_{j \neq i}^N y_{ijh} \leq 1$	$\forall i \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1..H\}$	(7a)
------------------------------------	---	------

$\sum_{j \neq i}^N y_{jih} \leq 1$	$\forall i \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1..H\}$	(7b)
------------------------------------	---	------

$\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N y_{ijh} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T X_{ith} - 1$	$\forall h \in \{1, H\}$	(8)
--	--------------------------	-----

- Les contraintes (9) retiennent la date de début d'intervention concernant chacune des victimes traitées.

$t_i = tX_{ith}$	$\forall h \in \{1, H\} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\}$	(9)
------------------	--	-----

- Les contraintes (10) permettent de laisser un temps suffisant à un chirurgien h de réaliser deux opérations consécutives i et j . M est un nombre positif très grand.

$t_j \geq t_i + y_{ijh}d_i - M(1 - y_{ijh})$	$\forall i, j \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1, H\}$	(10)
--	--	------

- Les équations (11) garantissent qu'une salle opératoire est utilisée par un chirurgien que lorsqu'au moins une intervention est affectée à cette salle.

$X_{ith} \leq NO_h$	$\forall i \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1, H\} \quad \forall t \in \{0..T\}$	(11)
---------------------	--	------

- Les contraintes (12), (13) et (14) sont des contraintes d'intégrité

$y_{ijh} \in \{0, 1\}$	$\forall i, j \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1, H\}$	(12)
------------------------	--	------

$X_{ith} \in \{0, 1\}$	$\forall i, j \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\} \quad \forall h \in \{1, H\}$	(13)
------------------------	---	------

$NO_h \in \{0, 1\}$	$\forall h \in \{1, H\}$	(14)
---------------------	--------------------------	------

Les résultats obtenus (paragraphe 3.2) à l'aide de ce modèle montrent qu'il était important de le développer.

2.2. L'optimisation des dates d'arrivées au plus tard des équipes chirurgicales

Le deuxième modèle d'optimisation (\mathcal{P}_2) a pour but, à partir du nombre minimal de salles opératoires proposé par (\mathcal{P}_1), de déterminer les dates d'arrivées au plus tard des chirurgiens (ou slacks times). La formulation mathématique de ce problème d'optimisation est présentée ci-dessous selon un programme linéaire en nombres entiers.

- La fonction objectif (15) exprime la maximisation des marges horaires (slacks times) des équipes chirurgicales.

$\text{Maximiser } \sum_{h=1}^H St_h$	(15)
---------------------------------------	------

- Les contraintes (16) assurent qu'une victime est affectée une et une seule fois pendant l'horizon T .

$\sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^H X_{ith} = 1$	$\forall i \in \{1..N\}$ (16)
---	-------------------------------

- Les contraintes (17) vérifient que pour chaque chirurgien h , une victime au plus est opérée à l'instant t .

$\sum_{i=1}^N X_{ith} \leq 1$	$\forall t \in \{0..T\} \quad \forall h \in \{1..H\}$ (17)
-------------------------------	--

- Les contraintes (18) imposent pour chaque victime traitée, que la date de prise en charge ne dépasse pas la date limite d'intervention.

$t_i - dl_i \leq 0$	$\forall i \in \{1..N\}$ (18)
---------------------	-------------------------------

- (19) vérifient qu'une intervention ne peut avoir lieu que lorsque la victime est présente à l'hôpital.

$t_i - rv_i \geq 0$	$\forall i \in \{1..N\}$ (19)
---------------------	-------------------------------

- Les contraintes (20) assurent que chaque intervention respecte la date d'arrivée au plus tard du chirurgien concerné :

$t_i - rl_h \sum_{t=0}^T X_{ith} - M \left(1 - \sum_{t=0}^T X_{ith} \right) \geq 0$	$\forall i \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1..H\}$ (20)
--	--

- Les contraintes (21a), (21b) et (22) permettent de mettre $y_{ijh}=1$ chaque fois que l'intervention j est effectuée à la suite de i par le même chirurgien h .

$\sum_{j \neq i}^N y_{ijh} \leq 1$	$\forall i \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1..H\}$ (21a)
------------------------------------	---

$\sum_{j \neq i}^N y_{jih} \leq 1$	$\forall i \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1..H\}$ (21b)
------------------------------------	---

$\sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N y_{ijh} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T X_{ith} - 1$	$\forall h \in \{1..H\}$ (22)
--	-------------------------------

- Les contraintes (23) retiennent la date de début d'intervention concernant chacune des victimes traitées.

$t_i = tX_{ih}$	$\forall h \in \{1, H\} \forall i \in \{1..N\} \forall t \in \{0..T\}$	(23)
-----------------	--	------

- Les contraintes (24) permettent de laisser un temps suffisant à un chirurgien h de réaliser deux opérations consécutives i et j . Nous désignons par M un nombre positif très grand.

$t_j \geq t_i + y_{ijh}d_i - M(1 - y_{ijh})$	$\forall i, j \in \{1..N\}$	$\forall h \in \{1, H\}$	(24)
--	-----------------------------	--------------------------	------

- Les contraintes (25), (26) et (27) sont des contraintes d'intégrité

$y_{ijh} \in \{0, 1\}$	$\forall i, j \in \{1..N\}$	$\forall h \in \{1, H\}$	(25)
------------------------	-----------------------------	--------------------------	------

$X_{ih} \in \{0, 1\}$	$\forall i, j \in \{1..N\}$	$\forall t \in \{0..T\}$	$\forall h \in \{1, H\}$	(26)
-----------------------	-----------------------------	--------------------------	--------------------------	------

$NO_h \in \{0, 1\}$	$\forall h \in \{1, H\}$	(27)
---------------------	--------------------------	------

Les résultats obtenus par ce modèle sont présentés dans le paragraphe 3.2.

3- Expérimentation et analyse des résultats

Dans cette section, nous présentons et analysons les résultats obtenus par les programmes (\mathcal{P}_1) et (\mathcal{P}_2) détaillés ci-dessus. Ces résultats ont été obtenus en utilisant le solveur Cplex solver 10.1 sur une machine Bixeon® de processeur 3.00 GHz et 4 Go de RAM.

3.1. Problèmes tests

Afin de valider notre approche, nous exploitons les données (générées aléatoirement selon la loi normale) présentées ci-dessous à savoir.

i	d_i (mn)	dl_i (mn)	rv_i (mn)	i	d_i (mn)	dl_i (mn)	rv_i (mn)
1	120	510	0	36	60	330	180
2	60	270	0	37	120	330	120
3	60	420	240	38	90	810	240
4	60	150	30	39	60	450	300
5	120	630	120	40	90	570	330
6	60	750	420	41	90	600	420
7	60	300	120	42	60	450	360
8	60	630	450	43	60	600	270
9	90	450	60	44	90	900	450
10	90	480	150	45	60	660	240
11	90	660	210	46	120	630	480
12	150	630	390	47	90	480	150
13	60	660	240	48	60	630	180
14	60	630	300	49	120	600	270
15	120	630	30	50	60	510	210
16	60	660	330	51	150	510	420
17	60	600	330	52	60	450	270
18	60	660	300	53	90	60	0
19	90	630	420	54	90	720	360
20	60	660	60	55	60	480	120
21	60	270	30	56	150	330	30
22	150	270	180	57	60	450	360
23	60	270	30	58	60	540	180
24	120	180	90	59	90	510	0
25	150	540	0	60	150	240	120
26	90	510	270	61	60	30	0
27	90	600	300	62	120	450	210
28	90	480	120	63	60	330	180
29	120	630	450	64	90	120	0
30	60	540	300	65	60	450	270
31	150	630	450	66	60	240	120
32	90	420	360	67	90	360	30
33	60	360	30	68	60	540	300
34	120	570	330	69	90	360	180
35	150	510	420	70	60	270	150

Tableau 3.1. Dates limites et dates d'arrivées des victimes¹.

Nous avons défini 15 instances de taille maximale ($N=70$). Ces instances diffèrent entre elles par les dates d'arrivée au plus tôt des chirurgiens ($R = rc_1, \dots, rc_H$ où $H = 10$) données par le tableau de garde suivant (Tableau 3.2) :

¹ mn : minutes

R	rc_1 (mn)	rc_2 (mn)	rc_3 (mn)	rc_4 (mn)	rc_5 (mn)	rc_6 (mn)	rc_7 (mn)	rc_8 (mn)	rc_9 (mn)	rc_{10} (mn)	rc_{11} (mn)
R_1	0	0	0	30	30	30	60	60	120	120	120
R_2	0	0	0	30	30	30	60	60	60	120	120
R_3	0	0	0	30	30	60	60	60	120	120	120
R_4	0	0	30	30	30	60	60	60	120	120	120
R_5	0	0	30	30	60	60	60	120	120	120	120

Tableau 3.2. Dates d'arrivées au plus tôt des chirurgiens à l'hôpital d'accueil (tableau de garde).

Chaque problème test est libellé $PN.R$; N désigne le nombre de victimes et R les dates d'arrivées des chirurgiens. A titre d'exemple $P50.R_5$, où $R_5 = (0 ; 0 ; 30 ; 30 ; 60 ; 60 ; 60 ; 120 ; 120 ; 120 ; 120)$, est un problème de 50 victimes et 11 chirurgiens disponibles à partir des dates $rc_1 = rc_2 = 0$ minutes, $rc_3 = rc_4 = 30$ minutes, $rc_5 = rc_6 = rc_7 = 60$ minutes et $rc_8 = rc_9 = rc_{10} = rc_{11} = 120$ minutes.

Les résultats numériques sont obtenus, en fixant l'horizon $T = \max_{i=1, \dots, N} (dl_i + d_i)$. En effet, au-delà de cette date aucune victime ne peut être prise en charge. 30 minutes est le pas de discrétisation de l'intervalle $[0, T]$.

3.2. Expérimentation

Les résultats présentés dans les tableaux 3.3 et 3.4 sont obtenus en résolvant respectivement le programme (P_1) et le programme (P_2) . Pour chaque instance nous indiquons : le temps de calcul en secondes (CPU (s)), le nombre de contraintes ($N.Cont.$), le nombre de variables ($N.Var.$), le nombre d'itérations ($N.Iter.$) et la valeur de la fonction objectif notée NO_c^* pour (P_1) (nombre minimal de salles) et ST^* (maximisation des marges horaires des chirurgiens) pour (P_2) . $C_{max}(h)$ est la durée totale du programme opératoire exprimée en heure (h), et $TM(\%)$ le taux d'occupation moyen des salles opératoires.

$TM(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{C_{max} \cdot NO_c^*}$	(I)
--	-----

<i>Instances</i>	NO_c^*	$C_{max}(h)$	$TM(\%)$	$CPU(s)$	<i>N.Cont.</i>	<i>N.Var.</i>
<i>P25.R₁</i>	5	10	67.00	0.1	63148	2104
<i>P25.R₂</i>	5	10	67.00	0.1	63148	2104
<i>P25.R₃</i>	5	10	67.00	3	63148	2104
<i>P25.R₄</i>	7	8.5	56.30	6.1	63148	2104
<i>P25.R₅</i>	7	8.5	56.30	2.5	63148	2104
<i>P50.R₁</i>	7	14.5	72.91	6	572845	7006
<i>P50.R₂</i>	7	14.5	72.91	9	572845	7006
<i>P50.R₃</i>	7	14.5	72.91	12	572845	7006
<i>P50.R₄</i>	9	12	68.52	16	572845	7006
<i>P50.R₅</i>	9	12	68.52	35	572845	7006
<i>P70.R₁</i>	10	17	59.41	73	1409158	13027
<i>P70.R₂</i>	10	17	59.41	112	1409158	13027
<i>P70.R₃</i>	10	17	59.41	140	1409158	13027
<i>P70.R₄</i>	11	15	61.21	148	1409158	13027
<i>P70.R₅</i>	11	15	61.21	176	1409158	13027

Tableau 3.3. Résultats du modèle 1.

Le tableau 3.3 indique le nombre minimal de salles opératoires nécessaires pour traiter toutes les victimes nécessitant des opérations chirurgicales tout en respectant le tableau de garde des chirurgiens en situation d'exception. Le dimensionnement permet une exploitation optimale des ressources disponibles. Par exemple, pour traiter 50 victimes à temps selon les dates d'arrivées des chirurgiens R_1 , R_2 et R_3 , nous avons besoin de 7 salles opératoires. Dans ce cas, si l'hôpital dispose d'un grand nombre de salles opératoires, uniquement 7 d'entre elles seront utilisées. Bien que, l'ordonnancement des interventions aux salles se fait de manière à exploiter au minimum les ressources, le programme peut être amené parfois à proposer l'utilisation d'une nouvelle salle pour affecter une ou plusieurs victimes. Ce qui explique les taux d'occupation assez faibles des salles opératoires (maximum 72.91% et minimum 56.30%).

Néanmoins, les salles restantes peuvent être gardées dans le cas d'une aggravation de la catastrophe actuelle.

A contrario, le nombre minimal de salles opératoires peut dépasser le nombre de salles disponibles à l'hôpital. Dans ce cas, le programme (\mathcal{P}_1) permet d'estimer le nombre de salles opératoires à ajouter dans l'hôpital. Les salles peuvent être permanentes (extension de la capacité opératoire de l'hôpital) ou modulables (installation au moment du déclenchement de la catastrophe). Ceci permettra d'éviter d'envoyer les victimes vers d'autres hôpitaux qui peuvent être éloignés et d'augmenter ainsi leur chance de survie.

Nous remarquons que le temps de calcul ne dépasse pas les 3 minutes, ce qui permet d'utiliser ce programme même au moment de la catastrophe notamment dans le cas où la catastrophe enregistrée ne figure pas parmi les scénarios testés lors des exercices de simulation.

<i>Instances</i>	<i>ST*</i>	<i>St_c</i>	<i>NO_c*</i>	<i>CPU</i>	<i>N.Cont.</i>	<i>N.Var.</i>
<i>P25.R₁</i>	210	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=150$	5	2h 51 mn	7847320	72382
<i>P25.R₂</i>	210	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=150$				
<i>P25.R₃</i>	210	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=150$				
<i>P25.R₄</i>	180	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=0, St_6=180,$ $St_7=180$	7	4h 47 mn		
<i>P25.R₅</i>	180	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=30, St_6=180,$ $St_7=180$				
<i>P50.R₁</i>	660	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=30, St_6=120,$ $St_7=120$	7	9h 16 mn	9319586	108060
<i>P50.R₂</i>	660	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=30, St_6=120,$ $St_7=120$				
<i>P50.R₃</i>	660	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=30, St_6=90,$ $St_7=120$				
<i>P50.R₄</i>	630	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=0, St_6=60,$ $St_7=60, St_8=60, St_9=150$	9	10h 14 mn		
<i>P50.R₅</i>	600	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=0, St_6=60,$ $St_7=60, St_8=60, St_9=150$				
<i>P70.R₁</i>	420	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=0, St_6=120,$ $St_7=120, St_8=120,$ $St_9=150, St_{10}=240$	10	19h 14 mn	11463274	134764
<i>P70.R₂</i>	420	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=0, St_6=120,$ $St_7=120, St_8=120,$ $St_9=180, St_{10}=240$				
<i>P70.R₃</i>	390	$St_1=0, St_2=0, St_3=0,$ $St_4=0, St_5=30, St_6=120,$ $St_7=120, St_8=120,$ $St_9=180, St_{10}=240$				

$P70.R_4$	360	$S_{t_1}=0, S_{t_2}=0, S_{t_3}=0,$ $S_{t_4}=0, S_{t_5}=0, S_{t_6}=0,$ $S_{t_7}=30, S_{t_8}=30, S_{t_9}=30,$ $S_{t_{10}}=150, S_{t_{11}}=150$	11	21 h 51 mn
$P70.R_5$	330	$S_{t_1}=0, S_{t_2}=0, S_{t_3}=0,$ $S_{t_4}=0, S_{t_5}=0, S_{t_6}=0,$ $S_{t_7}=30, S_{t_8}=30, S_{t_9}=60,$ $S_{t_{10}}=150, S_{t_{11}}=180$		

Tableau 3.4. Résultats du modèle 2.

D'après le tableau 3.4, nous remarquons que les marges (slacks time) varient d'un chirurgien à un autre. En effet, elles dépendent des degrés d'urgence des victimes qui leurs sont affectées. Les chirurgiens doivent être disponibles avant leurs dates d'arrivée au plus tard, sinon le pronostic vital des victimes sera mis en jeu.

Connaître la marge de chaque chirurgien, permet de déterminer à quel point l'ordonnancement optimal est sensible au retard. En effet, les perturbations peuvent survenir non seulement à cause des retards des équipes chirurgicales, mais aussi à cause des problèmes d'approvisionnement en matières médicales et paramédicale, d'acheminement à temps des victimes au bloc opératoire, etc. Ces perturbations pourront être absorbées par les slacks times et l'optimalité des solutions sera toujours assurée avec le même nombre de salles opératoires.

Le calcul des dates d'arrivée au plus tard aide aussi l'hôpital à identifier les chirurgiens qui devraient être disponibles à temps. Toutefois, ces résultats sont très intéressants dans le sens où ils indiquent les différentes solutions que l'hôpital peut adopter par exemple dans le cas où un ou plusieurs chirurgiens ne peuvent pas arriver à temps à cause des infrastructures endommagées.

Examinons à titre d'exemple l'instance $P50.R_1$ (figure 3.2) : les chirurgiens 5, 6 et 7 possèdent respectivement une marge de 30, 120 et 120 minutes, contrairement aux chirurgiens 1, 2, 3 et 4 ($S_{t_1}=0, S_{t_2}=0, S_{t_3}=0$ et $S_{t_4}=0$) qui doivent être disponibles à la date indiquée dans le tableau de garde. La présence obligatoire de certains chirurgiens est assurée à l'instant $t = 0$, puisqu'il devrait avoir en situation normale des chirurgiens dans les unités d'urgence. Considérons maintenant que le chirurgien 7 ne peut être disponible à temps à cause des difficultés d'accès à l'hôpital d'accueil. Dans ce cas l'hôpital possède d'autres solutions de rechange en remplaçant le chirurgien 7 par le chirurgien 8, 9, 10 ou 11.

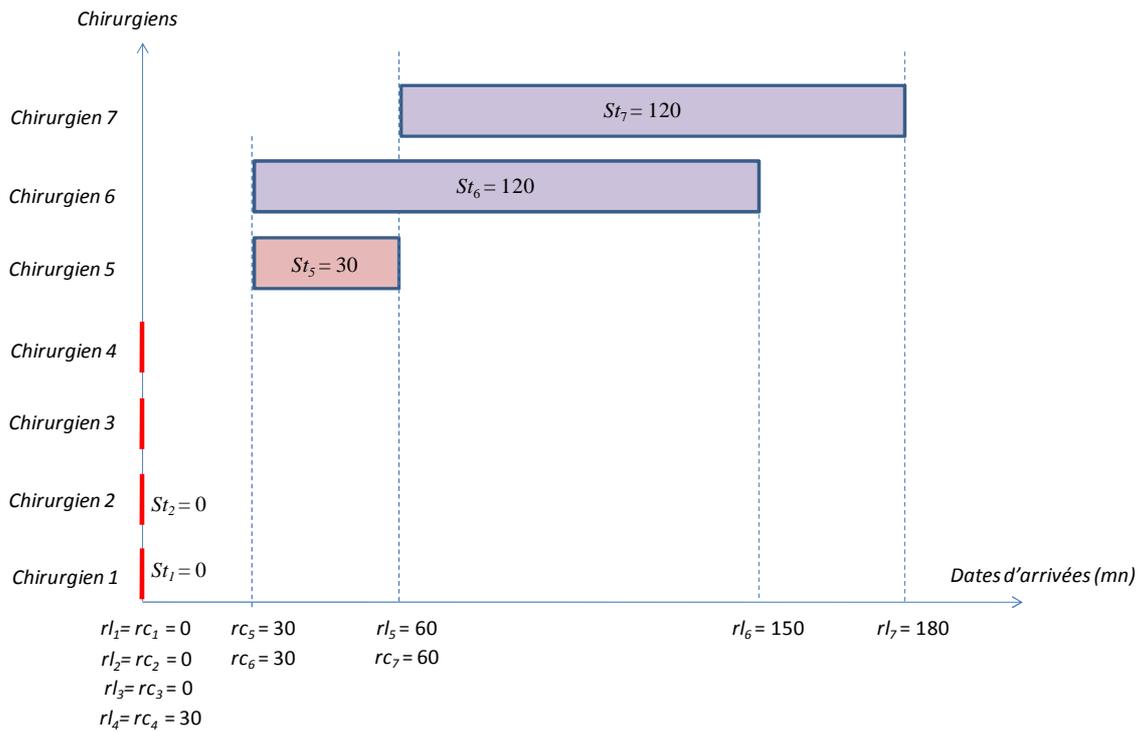


Figure 3.2. Les marges des chirurgiens pour le cas $P50.R_1$

En analysant le temps de calcul du programme (\mathcal{P}_2) nous constatons qu'il croît en fonction du nombre de victimes (le CPU maximal est de 21h 51 mn). Ceci est négligeable par rapport au temps nécessaires à la préparation du plan blanc dans un hôpital.

4- Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre à l'organisation hospitalière dans le cadre du plan blanc, plus particulièrement au dimensionnement des salles opératoires et des chirurgiens.

Notre approche de résolution est basée sur deux programmes linéaires en nombres entiers. Le premier modèle calcule le nombre minimal de salles opératoires nécessaires pour traiter toutes les victimes à temps sous contraintes des dates d'arrivée au plus tôt des chirurgiens. Le deuxième modèle permet d'utiliser au mieux les marges (slacks times) des chirurgiens afin que le dimensionnement proposé reste toujours optimal. A cause de la taille du problème étudié nous n'avons pu considérer une approche multi-objectif qui intègre à la fois ; l'optimisation du nombre de salles opératoires et les dates d'arrivées au plus tard des chirurgiens.

Le dimensionnement est basé sur un ordonnancement optimal des interventions dans les salles opératoires. Ainsi, elle permet une organisation optimale des ressources testée lors des exercices de simulation du plan blanc.

En se basant sur les résultats de dimensionnement et des exercices de simulations du plan blanc, l'hôpital doit s'organiser au mieux au moment de la catastrophe afin de pouvoir traiter le maximum de victimes. Le chapitre suivant présente le niveau opérationnel de la problématique étudiée, à savoir, l'optimisation de l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires.

Chapitre 4. L'optimisation de l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires

Les blocs opératoires représentent une ressource goulot dans le système hospitalier (Jebali et *al.*, 2005). En situation normale, plusieurs travaux se sont intéressés à la programmation opératoire qui consiste à affecter et à ordonnancer les interventions sur les ressources (salles opératoires, chirurgiens, etc.) afin de réduire les coûts de prise en charge médicale (Kuo et *al.*, 2003), (Guinet et Chaabane, 2003). En situation d'exception, le problème qui se pose est celui de la maximisation du nombre de victimes traitées pour sauver le plus grand nombre de vies humaines (cf. chapitre 1).

Face à une telle situation, les ressources humaines et matérielles dans le bloc opératoire doivent être optimisées et mutualisées afin d'assurer un maximum d'efficacité.

Nous abordons dans ce chapitre le problème d'ordonnancement et d'affectation des interventions aux salles opératoires en mode prédictif. Nous étudions ensuite le nomadisme des chirurgiens entre les blocs opératoires dans le cas d'un ou plusieurs actes chirurgicaux, et son influence sur le nombre de victimes traitées.

1- Le périmètre d'étude et les hypothèses

Notre étude se limite aux victimes de catastrophes qui relèvent d'une pathologie chirurgicale. Ces catastrophes peuvent être naturelles (cyclones, séismes, glissement de terrain, etc.), socio-économiques (épidémies, famine, etc.), conflictuelles (actes terroristes, actions de guerre, etc.) ou mixtes.

Suite à une catastrophe, le nombre de victimes qui nécessitent des opérations chirurgicales est généralement compris entre 25% et 30% du nombre total des blessés. Nous considérons pour notre étude, des catastrophes moyennes à effet limité dont le nombre de victimes, nécessitant des actes chirurgicaux, est compris entre 25 et 70.

Pour une durée d'agression courte (inférieure à 1 heure) ou moyenne (inférieure à 24 heures), nous supposons que la durée des opérations de sauvetage est inférieure à 24 heures.

Dans ce cas, la plage de planification des victimes dans les blocs opératoires ne peut dépasser une journée.

Notre étude sera concentrée uniquement sur l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires. Nous supposons que le nombre de lits et les autres services de l'hôpital sont bien dimensionnés pour accueillir toutes les victimes traitées.

Les salles opératoires spécialisées sont transformées en salles polyvalentes et ce afin de rendre l'affectation des victimes plus flexible. Nous considérons par conséquent que les chirurgiens sont aussi polyvalents.

Face à un afflux massif de victimes, l'hôpital peut avoir recours à des actes de stabilisation médico-chirurgicale ne nécessitant aucune spécialité chirurgicale. Ces actes permettent de transformer les degrés d'urgence, et ainsi d'augmenter le délai de prise en charge définitive de la victime (Dhahri, 1999). A titre d'exemple, une extrême urgence de traumatisme hépatique complexe qui, suite à un remplissage vasculaire au niveau du PMA, devient une urgence de premier degré. Un acte chirurgical de stabilisation « packing »² à l'hôpital, d'une durée maximale de 15 minutes, permettra de transformer cette urgence, et de la faire passer au troisième degré, augmentant ainsi les chances de prise en charge complète de la victime par la suite.

Nous avons testé nos modèles d'optimisation sur plusieurs configurations hospitalières qui se différencient entre elles par le nombre de salles opératoires. Ceci est en forte corrélation avec la situation géographique dans laquelle l'hôpital d'accueil est situé : zone urbaine avec une forte ou une faible concentration de population, ou zone rurale.

2- L'ordonnancement et l'affectation prédictifs des interventions aux salles opératoires

Chaque hôpital dispose d'un plan blanc le mettant dans l'obligation d'organiser et de coordonner au mieux les moyens de secours en cas d'afflux massif de victimes (Ministère de la santé et de la solidarité, 2006). Cependant, ce plan ne permet pas de déterminer pour chaque victime et selon son degré d'urgence, l'heure à laquelle elle sera prise en charge, le chirurgien qui va l'opérer et la salle opératoire dans laquelle aura lieu l'intervention.

² Une compression des lésions hémorragiques (Gentilello et Pierson, 2001)

2.1. La présentation du problème

Suite à une catastrophe, un Poste Médical Avancé (PMA) est mis en place à proximité de la zone sinistrée, assurant le triage des victimes et les premiers soins d'urgence. Plus précisément, le triage est un acte médical de diagnostic, qui permet de catégoriser chaque victime, selon son degré d'urgence, celui-ci étant traduit par un délai de prise en charge médico-chirurgicale au delà duquel, le pronostic vital peut être engagé (Dhahri, 1999), (Ministère de la santé et de la solidarité, 2006). Ainsi, les extrêmes urgences nécessitent des gestes salvateurs immédiats au niveau du PMA. Les urgences de premier, deuxième et troisième degré sont mises en conditions afin d'être évacuées à l'hôpital d'accueil, où elles doivent être prises en charge dans des délais respectifs, inférieurs à 6 heures, 18 heures et 36 heures.

Compte tenu des capacités des moyens de transport disponibles, les victimes ne peuvent être transférées en une seule fois et arrivent progressivement à l'hôpital d'accueil. D'un autre côté, les ressources humaines (équipes médicales et paramédicales) peuvent être renforcées au cours du temps, selon l'ampleur du sinistre, le nombre de victimes et la nature des lésions à traiter.

Par rapport à cette problématique, nous développons un programme d'ordonnancement et d'affectation des interventions aux salles opératoires. Ce problème en situation d'exception, présente certaines spécificités qui, à hauteur de nos recherches, n'ont pas encore été considérées dans la littérature, et qui, à notre avis, justifient le développement de méthodes de résolution adaptées.

2.2. La description du problème

Avant de décrire le problème, voici les différentes notations utilisées :

- N Nombre de victimes.
- S Nombre de salles opératoires.
- H Nombre total de chirurgiens.
- H_t Nombre de chirurgiens présents à l'hôpital à l'instant t .
- T Horizon de l'étude.
- d_i Durée opératoire de la victime i .

dl_i Date limite d'intervention de la victime i .

rv_i Date d'arrivée de la victime i à l'hôpital.

rc_h Date d'arrivée du chirurgien h à l'hôpital.

En cas de catastrophe, le service d'aide médicale urgente (SAMU) communique à l'hôpital d'accueil, dès que possible, le nombre N de victimes. Aussi, il précise, pour chaque victime i les informations récoltées au niveau du PMA à savoir : sa date d'arrivée rv_i à l'hôpital, l'intervention médico-chirurgicale qu'elle nécessite, sa date limite dl_i (en liaison avec le degré d'urgence) et sa durée opératoire d_i .

Au niveau de l'hôpital, on dispose de S salles opératoires polyvalentes, prêtes à accueillir les victimes pendant tout le temps nécessaire T . On dispose également de H chirurgiens, chacun étant caractérisé par sa date d'arrivée, donnée selon un tableau de garde préétabli pour une telle situation, et la seule salle opératoire à laquelle il est affecté.

Nous considérons dans cette section que le nombre de salles est égal au nombre de chirurgiens ($H=S$). En effet, une salle sans chirurgien ne peut être utilisée, et un chirurgien ne peut effectuer une intervention sans salle. Dans la suite, nous parlons de chirurgien pour désigner la paire (chirurgien, salle).

Nous présentons ci-dessous le flux d'informations entre le PMA et l'hôpital d'accueil :

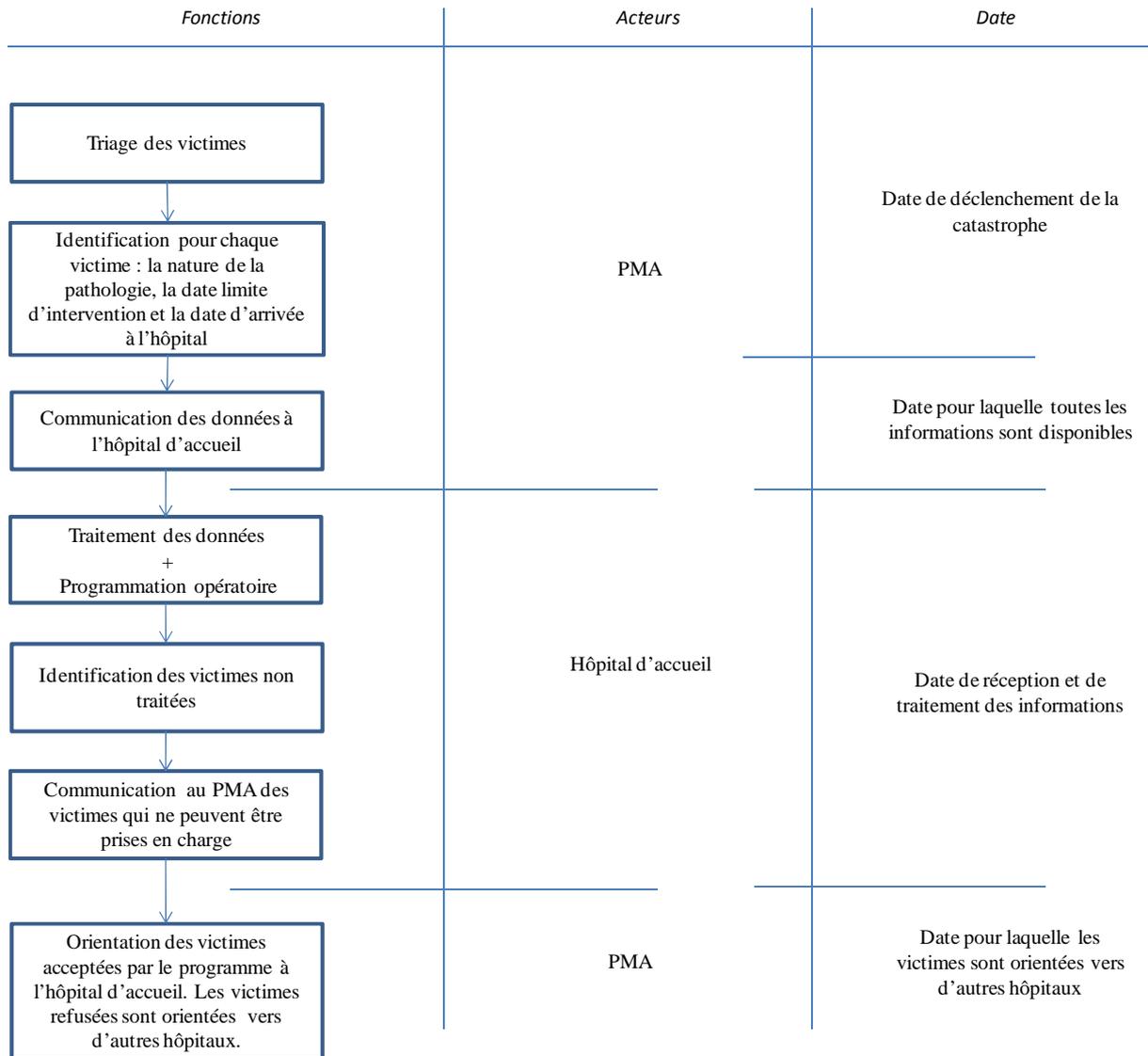


Figure 4.1 : Flux d'informations entre le PMA et l'hôpital d'accueil

Nous présentons dans le paragraphe suivant un modèle de programmation linéaire en nombres entiers intégrant simultanément les aspects affectation et ordonnancement. Face à un afflux massif de victimes, l'objectif recherché est de sauver le maximum de vies humaines. Cependant, il est indispensable de respecter les contraintes posées par le problème.

2.3. Le modèle mathématique

Considérons les variables suivantes :

t_i Date de début de l'intervention de la victime i .

$y_{ijh} = 1$ si l'intervention de la victime j suit l'intervention de la victime i avec un même chirurgien h dans la même salle, 0 sinon.

$X_{ith} = 1$ si l'intervention de la victime i est affectée à l'instant t au chirurgien h , 0 sinon.

En utilisant les différentes notations décrites ci-dessus, nous proposons le programme linéaire suivant :

- La fonction objectif (1) exprime la maximisation du nombre d'interventions réalisées.

$\text{Maximiser } \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^{H_t} X_{ith}$	(1)
--	-----

- Les contraintes (2) assurent qu'une victime est affectée au plus, une seule fois pendant l'horizon T .

$\sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^{H_t} X_{ith} \leq 1$	$\forall i \in \{1..N\}$	(2)
--	--------------------------	-----

- Les contraintes (3) vérifient que pour chaque chirurgien h , une victime au plus est opérée à l'instant t .

$\sum_{i=1}^N X_{ith} \leq 1$	$\forall t \in \{0..T\} \quad \forall h \in \{1..H_t\}$	(3)
-------------------------------	---	-----

- Les contraintes (4) garantissent que le nombre d'interventions affectées à l'instant t ne dépasse pas le nombre de chirurgiens présents à l'hôpital au même instant.

$\sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^{H_t} X_{ith} \leq H_t$	$\forall t \in \{0..T\}$	(4)
--	--------------------------	-----

- Les contraintes (5) imposent pour chaque victime traitée, que la date de prise en charge ne dépasse pas la date limite d'intervention.

$t_i - dl_i \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^{H_t} X_{ith} - M(1 - \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^{H_t} X_{ith}) \leq 0$	$\forall i \in \{1..N\}$	(5)
--	--------------------------	-----

- (6) et (7) vérifient qu'une intervention ne peut avoir lieu que lorsque victime et chirurgien sont présents à l'hôpital. Nous désignons par M un nombre positif très grand.

$t_i + M(1 - \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^{H_t} X_{ith}) \geq rv_i$	$\forall i \in \{1..N\}$	(6)
--	--------------------------	-----

$t_i - rc_h \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^{H_t} X_{ith} - M(1 - \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^{H_t} X_{ith}) \geq 0$	$\forall i \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1..H_t\}$	(7)
--	---	-----

- Les contraintes (8a), (8b) et (9) permettent de mettre $y_{ijh}=1$ chaque fois que l'intervention de la victime j est effectuée à la suite de i par le même chirurgien h .

$$\sum_{j=1/j \neq i}^N y_{ijh} \leq 1 \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1, H_t\} \quad (8a)$$

$$\sum_{j=1/j \neq i}^N y_{jih} \leq 1 \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall h \in \{1, H_t\} \quad (8b)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1/j \neq i}^N y_{ijh} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T X_{ith} - 1 \quad \forall h \in \{1, H_t\} \quad (9)$$

- Les contraintes (10) retiennent la date de début d'intervention concernant chacune des victimes traitées. Si une victime ne peut être prise en charge à temps, la date d'intervention est prise égale à la valeur M .

$$t_i = \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^{H_t} t X_{ith} + (1 - \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^{H_t} X_{ith}) M \quad \forall i \in \{1..N\} \quad (10)$$

- Les contraintes (11) permettent de laisser un temps suffisant à un chirurgien h de réaliser deux opérations consécutives des victimes i et j .

$$t_j \geq t_i + y_{ijh} d_j - M(1 - y_{ijh}) \quad \forall i, j \in \{1, N\} \quad \forall h \in \{1, H_t\} \quad (11)$$

- Les contraintes (12) et (13) sont des contraintes d'intégrité

$$X_{ith} = \{0, 1\} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\} \quad \forall h \in \{1, H\} \quad (12)$$

$$y_{ijh} = \{0, 1\} \quad \forall i, j \in \{1, N\} \quad \forall h \in \{1, H\} \quad (13)$$

Les résultats obtenus par ce programme (paragraphe 5.2) montre bien l'intérêt de cette approche de résolution.

3- Ordonnancement et affectation prédictifs des interventions avec nomadisme des chirurgiens et mono-acte chirurgical

Nous traitons dans cette partie le principe de mutualisation des ressources critiques (salles opératoires et chirurgiens) en cas de catastrophe. Les interventions sont mono-acte chirurgical, c'est-à-dire que chaque intervention est composée d'un seul acte chirurgical.

3.1. La présentation du problème

La criticité de la situation d'exception impose l'efficacité et la maîtrise conjointe des différentes ressources humaines et matérielles. Dans ce contexte, les salles opératoires peuvent être partagées entre plusieurs chirurgiens. Ces derniers se déplacent d'une salle opératoire à une autre pour réaliser les interventions qui leur sont assignées. Ce mode de fonctionnement est connu souvent sous le nom : « nomadisme des chirurgiens » (Guinet A. et *al.*, 2006). En effet, dans le cas d'un suréquipement en salles opératoires, la propriété de nomadisme permet d'optimiser l'occupation des chirurgiens, en préparant la victime en temps masqué dans une autre salle. Ce nomadisme des chirurgiens, permet d'assimiler le problème abordé à un problème d'ordonnancement sur machines identiques parallèles (Kharraja et *al.*, 2002).

3.2. La description du problème

Chaque intervention comporte successivement :

- des actes pré-opératoires, que nous considérerons de durée fixe $\delta_{pré}$, permettant de mettre en place et d'anesthésier la victime,
- l'acte chirurgical de durée p_i ,
- des actes post-opératoires, que nous considérerons de durée fixe δ_{post} , assurant le réveil de la victime, le nettoyage et la libération de la salle.

On utilisera indifféremment l'indice i pour désigner l'intervention et la victime.

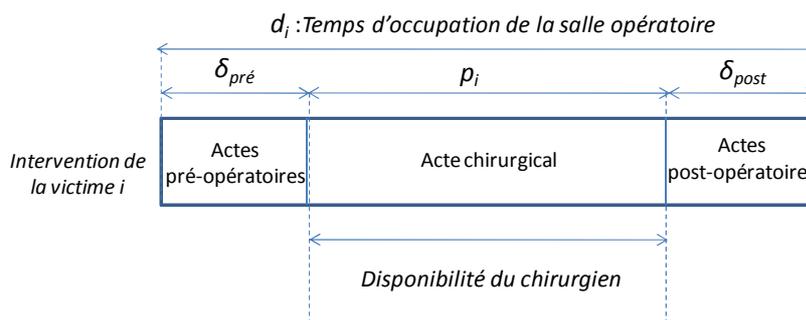


Figure 4.2 : Occupation d'une salle opératoire pendant une intervention.

Durant l'intervention, la présence du chirurgien dans la salle opératoire n'est impérative que durant l'acte chirurgical. La préparation ($\delta_{pré}$) de l'intervention peut s'effectuer en temps masqué pendant l'exécution d'une autre intervention dans une autre salle opératoire. Ainsi,

dans l'attente de la montée en puissance de l'équipe chirurgicale, les compétences déjà présentes peuvent optimiser l'exploitation des salles opératoires disponibles. Dès lors, le nomadisme des chirurgiens apparaît comme une caractéristique majeure de l'efficacité de l'équipe chirurgicale, et participe à l'objectif central de maîtrise et de réduction de la criticité de la situation (figure 4.3).

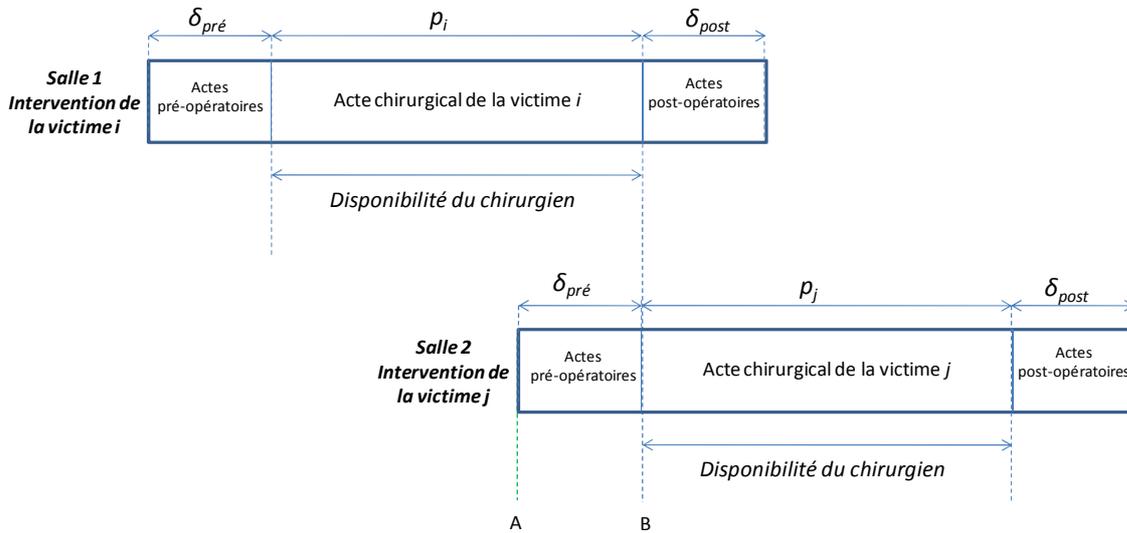


Figure 4.3 : Prise en charge optimisée de deux interventions consécutives dans deux salles opératoires par un même chirurgien.

A : Démarrage au plus tôt des actes pré-opératoires relatifs à l'intervention de la victime j dans la salle opératoire 2.

B : Début de l'acte chirurgical de l'intervention de la victime j par le chirurgien dans la salle opératoire 2.

3.3. Le modèle mathématique

Dans cette section, nous détaillons le modèle mathématique que nous proposons pour aborder cette problématique.

Pour une question de simplification (surtout pour ce qui concerne le temps de calcul), le modèle mathématique que nous présentons dans ce paragraphe, contrairement au modèle du paragraphe 2, ne permet pas de fournir le détail de l'ordonnancement à savoir l'affectation salle/chirurgien. Il fournit uniquement un ordonnancement des victimes en fonction du temps. En effet, le programme vérifie à chaque instant la disponibilité des ressources (salle et

chirurgien) pour pouvoir prendre en charge une victime. Ceci est applicable seulement dans le cas où les salles et les chirurgiens sont polyvalents.

Un algorithme d'affectation aux salles et aux chirurgiens sera présenté à la suite du modèle mathématique.

La répartition temporelle d'une intervention i peut être donnée par la figure 4.4 où d_i est la durée totale d'occupation d'une salle lors de l'intervention i ($d_i = \delta_{pré} + p_i + \delta_{post}$).

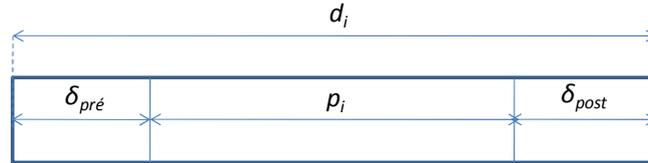


Figure 4.4 : Décomposition temporelle d'une intervention de la victime i .

Soient H_t le nombre de chirurgiens présents à l'hôpital à l'instant t et les variables de décisions X_{it} , n_{it} et q_{it} définies par :

$n_{it} = 1$ si l'intervention i occupe une salle opératoire à l'instant t , 0 sinon.

$q_{it} = 1$ si l'intervention i est affectée à un chirurgien à l'instant t , 0 sinon.

$X_{it} = 1$ si l'intervention i débute à l'instant t , 0 sinon.

Nous présentons ci-après la formulation mathématique du problème sous forme d'un programme linéaire en nombres entiers.

- La fonction objectif (14) exprime la maximisation du nombre d'interventions réalisées.

$\text{Maximiser } \sum_i^N \sum_t^T X_{it}$	(14)
--	------

- Les contraintes (15) assurent qu'une victime est affectée, au plus une fois, pendant l'horizon T .

$\sum_t^T X_{it} \leq 1$	$\forall i \in \{1..N\}$	(15)
--------------------------	--------------------------	------

- Les contraintes (16) (resp.(17)) vérifient qu'à chaque instant, le nombre de salles occupées (resp. chirurgiens occupés) ne dépasse pas le nombre total S (resp. H_t).

$\sum_i^N n_{it} \leq S$	$\forall t \in \{0..T\}$	(16)
--------------------------	--------------------------	------

$\sum_i^N q_{it} \leq H_t \quad \forall t \in \{0..T\}$	(17)
---	------

- Les contraintes (18) retiennent la date de début d'intervention concernant chacune des victimes traitées. Nous désignons par M un nombre positif très grand. Si une victime ne peut être prise en charge à temps, le modèle fixe la date d'intervention à la valeur M .

$t_i = \sum_t^T tX_{it} + M(1 - \sum_t^T X_{it}) \quad \forall i \in \{1..N\}$	(18)
--	------

- Les contraintes (19) imposent pour chaque victime traitée, que la date de prise en charge ne dépasse pas la date limite d'intervention.

$t_i - dl_i \sum_t^T X_{it} - M(1 - \sum_t^T X_{it}) \leq 0 \quad \forall i \in \{1..N\}$	(19)
---	------

- Les contraintes (20) permettent de tenir compte des différentes dates d'arrivée des victimes, à l'hôpital.

$t_i + M(1 - X_{it}) \geq rv_i \quad \forall i \in \{1..N\}$	(20)
--	------

- Les contraintes (21) et (22) permettent de fixer n_{it} à 1, tant qu'à l'instant t , une salle opératoire est occupée par la victime i .

$\sum_{t'=t}^{t+d_i-1} n_{it'} \geq d_i X_{it} - M(1 - X_{it}) \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{rv_i..dl_i\}$	(21)
---	------

$\sum_t^T n_{it} \leq d_i \sum_t^T X_{it} \quad \forall i \in \{1..N\}$	(22)
---	------

- Les contraintes (23) et (24), fixent q_{it} à 1, tant qu'un chirurgien est, à l'instant t , occupé à se préparer ou à réaliser l'intervention de la victime i .

$\sum_{t'=t+\delta_{pré}}^{t+(\delta_{pré}+p_i)-1} q_{it'} \geq p_i X_{it} - M(1 - X_{it}) \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{rv_i..dl_i\}$	(23)
---	------

$\sum_t^T q_{it} \leq p_i \sum_t^T X_{it} \quad \forall i \in \{1..N\}$	(24)
---	------

Ces quatre dernières contraintes nous permettent d'obtenir, à chaque instant, le nombre de salles et de chirurgiens occupés.

- Les contraintes (25) assurent que $X_{it} = 0$ en dehors de l'intervalle $[rv_i, dl_i]$.

$\sum_{t=0}^{rv_i-1} X_{it} + \sum_{t=dl_i+1}^T X_{it} = 0$	$\forall i \in \{1..N\}$	(25)
---	--------------------------	------

- (26) et (27) permettent de mettre respectivement, $n_{it} = 0$ et $q_{it} = 0$, avant l'arrivée de la victime à l'hôpital et pour toute date de fin d'intervention ne respectant pas la date limite imposée.

$\sum_{t=0}^{rv_i-1} n_{it} + \sum_{t=dl_i+p_i}^T n_{it} = 0$	$\forall i \in \{1..N\}$	(26)
---	--------------------------	------

$\sum_{t=0}^{rv_i-1} q_{it} + \sum_{t=dl_i+p_i}^T q_{it} = 0$	$\forall i \in \{1..N\}$	(27)
---	--------------------------	------

- Les contraintes (28), (29) et (30) sont des contraintes d'intégrité sur les variables.

$n_{it} \in \{0,1\}$	$\forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\}$	(28)
----------------------	---	------

$q_{it} \in \{0,1\}$	$\forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\}$	(29)
----------------------	---	------

$X_{it} \in \{0,1\}$	$\forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\}$	(30)
----------------------	---	------

La polyvalence des chirurgiens et des salles opératoires dans le contexte considéré, fait que nous n'avons plus de problème d'affectation des salles et des chirurgiens aux interventions. En effet, une victime n'est prise en charge que lorsque un chirurgien et une salle sont disponibles (contraintes (16) et (17)). Nous sommes donc assurés, qu'à chaque date t_i , de début d'une intervention i , il existe au moins une salle libre et un chirurgien libre.

L'algorithme ASC1 suivant permet d'obtenir, à partir des résultats du programme linéaire, les détails de l'affectation des interventions aux salles et aux chirurgiens. Il consiste à affecter l'intervention à la première salle et au premier chirurgien libres.

Soient F_s et G_s deux entiers naturels et φ l'ensemble des interventions affectées et ordonnées selon l'ordre croissant de leurs dates de début (t_i).

Algorithme ASC1

1/ Initialiser $F_s = 0 \quad \forall s \in [1, S]$; $G_h = 0 \quad \forall h \in [1, H]$.
 2/ Donner l'ensemble φ
 3/ $i=1, s=1, h=1$
 4/ Si $t_i \geq F_s$, affecter i à la salle opératoire s : $F_s = t_i + d_i$
 4.1/ Si $t_i + u \geq \max(G_h, rc_h)$, affecter i au chirurgien c : $G_h = t_i + d_i - \delta_{post}$; $\varphi = \varphi \setminus \{i\}$,
 Si $\varphi = \emptyset$, fin
 Sinon, $i=i+1$, aller en 4/
 4.2/ Sinon, $h=h+1$, aller en 4.1/
 Sinon $s=s+1$, retour en 4/

Les résultats obtenus par ce programme sont présentés dans le paragraphe 5.3.

4- Ordonnancement et affectation prédictifs des interventions avec nomadisme des chirurgiens et multi-actes chirurgicaux

Le nomadisme classique ou nomadisme mono-acte chirurgical, tel que présenté dans la partie 3, est similaire à ce que nous pouvons trouver en situation normale (Guinet A. et *al.*, 2006). Le modèle que nous présentons dans ce qui suit prend en compte la possibilité que deux chirurgiens soient affectés dans la même salle opératoire, lorsqu'une victime nécessite plusieurs actes chirurgicaux (intervention chirurgicale multi-actes).

4.1. La présentation du problème

En situation de catastrophe, on distingue deux types de nomadismes (Nouaouri et *al.*, 2008b) : le nomadisme classique ou nomadisme mono-acte chirurgical, similaire à ce que nous pouvons trouver en situation normale, et le nomadisme multi-actes chirurgicaux pour lequel, un chirurgien pourrait changer de salle opératoire, pour rejoindre un autre chirurgien. Dans ce dernier cas les deux chirurgiens opèrent simultanément la même victime dont l'état nécessite plusieurs actes chirurgicaux (par exemple, une évacuation d'un hématome sous-dural et une réduction ostéosynthèse d'une fracture luxation du genou). Cette pratique est très intéressante, étant donné qu'elle peut réduire la durée totale d'une intervention multi-actes, ce qui permet de libérer la salle opératoire plus tôt, et par suite, la prise en charge de plus de victimes. Toutefois, l'affectation permanente de deux chirurgiens par salle n'est en aucun cas envisageable. En effet, d'une part, le nombre de chirurgiens disponibles est souvent limité, et d'autre part, la majorité des victimes nécessitent un seul acte chirurgical, et donc n'ont besoin que d'un seul chirurgien.

Ce type de nomadisme est assez spécifique et diffère du nomadisme classique, largement présent dans la littérature (Guinet A. et *al.*, 2006) (Marcon, 2004), où chaque intervention est mono-acte et affectée a priori à une seule équipe chirurgicale. Aussi, il est important de souligner, que contrairement au nomadisme classique, où la durée de l'intervention est toujours connue d'avance, dans le cas que nous abordons la durée d'une intervention multi-actes dépend de la date de début du deuxième acte chirurgical.

Dès lors, une exploitation optimale des ressources rares que sont les salles et les chirurgiens, ne peut être obtenue que par la notion de nomadisme.

4.2. La description du problème

Pour chaque victime, un ensemble de lésions est à traiter par des gestes chirurgicaux. Selon leur disposition et leurs caractéristiques, les lésions de même topographie ou de topographies voisines doivent être prises en charge par un même chirurgien. Par contre, les lésions de topographies différentes (par exemple, une lésion à la tête et une autre au genou), peuvent être traitées simultanément, chacune par un chirurgien. Nous définissons ainsi, l'acte chirurgical par l'ensemble des gestes à réaliser impérativement par un même chirurgien. Cet acte étant défini par l'opération de triage.

Une intervention sur une victime est caractérisée par :

- Un acte pré-opératoire, de durée fixe $\delta_{pré}$, permettant de mettre en place et d'anesthésier la victime ;
- Un acte post-opératoire, de durée fixe δ_{post} , couvrant la période de réveil de la victime, le nettoyage et la libération de la salle ;
- Le nombre et la durée des actes chirurgicaux.

Dans le cas où la victime i nécessite un seul acte chirurgical de durée p_i , le déroulement de son intervention est illustrée par la figure 4.5 :

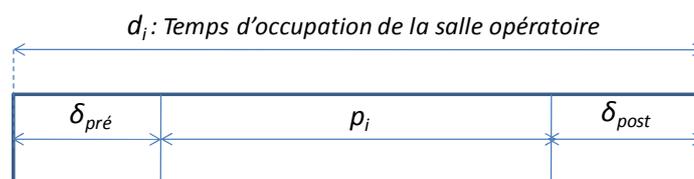


Figure 4.5. Occupation d'une salle opératoire par une victime i dans le cas d'un seul acte chirurgical

Dans certains cas, la victime i nécessite deux actes chirurgicaux ou plus. Nous nous limitons dans cette étude à deux actes chirurgicaux de durées respectives p_{i1} et p_{i2} . Le premier des deux actes à réaliser est identifié a priori par l'opération de triage au PMA. Quant au deuxième acte, il doit commencer au plus tard à la fin du premier. Une fois prise en charge par un chirurgien pour la réalisation du premier acte, une victime ne quitte la salle opératoire que lorsque le deuxième acte, que son état nécessite, est effectué. Un autre chirurgien peut rejoindre celui déjà présent sur place, et prendre en charge le deuxième acte, permettant ainsi d'opérer simultanément la même victime et de libérer la salle plus tôt. Il est toutefois important de noter, que pour une victime, l'acte pré-opératoire précède le premier acte chirurgical, et que l'acte post-opératoire suit le dernier acte effectué.

On note td_i la date de début de l'acte 2 de l'intervention i .

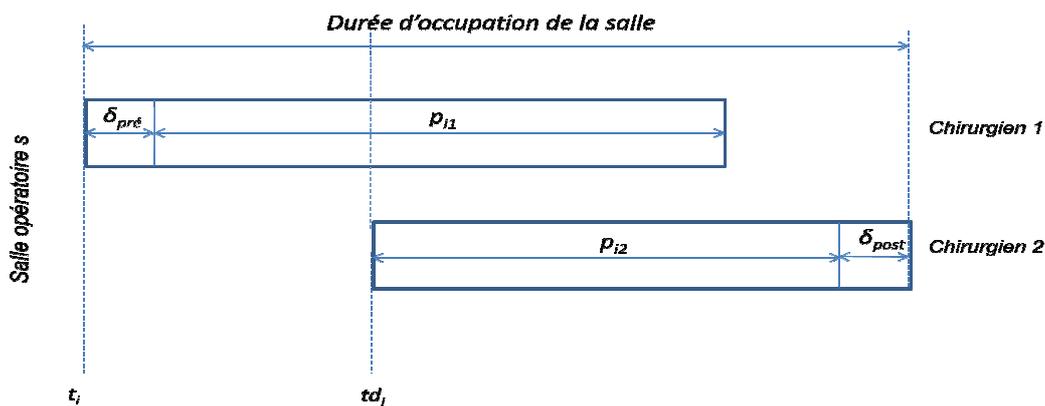


Figure 4.6. Prise en charge des deux actes chirurgicaux de la même victime i par deux chirurgiens

4.3. Le modèle mathématique

Nous adoptons dans cette partie, le même principe de résolution du modèle présenté dans le paragraphe 3.

Avant d'élaborer le modèle mathématique, nous présentons les notations suivantes :

p_{ij} Durée de l'acte chirurgical j de la victime i .

A Ensemble des victimes nécessitant 1 seul acte chirurgical.

B Ensemble des victimes nécessitant 2 actes chirurgicaux.

$$Z_i = \begin{cases} \{1\} & \text{si } i \in A \\ \{1, 2\} & \text{si } i \in B \end{cases}$$

Les variables de décision X_{ijt} et U_i définies par :

$X_{ijt}=1$ si l'acte j de la victime i débute à l'instant t , 0 sinon.

$U_i=1$ si l'intervention de la victime i a été réalisée, 0 sinon.

$n_{ijt}=1$ si l'acte j de la victime i se réalise à l'instant t , 0 sinon.

$o_{it}=1$ si l'intervention i occupe une salle à l'instant t , 0 sinon.

$q_{ijt}=1$ si l'acte j de l'intervention i est affecté à un chirurgien à l'instant t , 0 sinon.

Afin de simplifier la formulation mathématique, nous considérons, sans perte de généralités, que les interventions à un seul acte de durée p_i , sont des interventions multi-actes particulières où $p_{i1} = p_i$, et $p_{i2} = 0$.

Le modèle proposé est donné par le programme linéaire en nombres entiers suivant :

- La maximisation du nombre d'interventions réalisées est exprimée dans (31).

$\text{Maximiser } \sum_{i=1}^N U_i$	(31)
--------------------------------------	------

- Les contraintes (32) assurent que la victime i est traitée au plus une fois, pendant l'horizon T .

$\sum_{t=0}^T X_{ilt} \leq 1$	$\forall i \in \{1..N\}$	(32)
-------------------------------	--------------------------	------

- Les contraintes (33) imposent $U_i = 1$, chaque fois qu'une victime i est prise en charge ($X_{ilt}=1$).

$U_i \leq \sum_{t=0}^T X_{ilt}$	$\forall i \in \{1..N\}$	(33)
---------------------------------	--------------------------	------

- Chaque fois qu'une victime est prise en charge, les contraintes (34) assurent la réalisation de tous les actes que son état nécessite.

$\sum_{t=0}^T X_{ilt} = \sum_{t=0}^T X_{i2t}$	$\forall i \in B$	(34)
---	-------------------	------

- Le respect des dates limites d'intervention et des dates d'arrivées des victimes à l'hôpital est assuré par les contraintes (35) et (36).

$t_i - dl_i U_i - M(1 - U_i) \leq 0$	$\forall i \in \{1..N\}$	(35)
--------------------------------------	--------------------------	------

$t_i + M(1 - \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^{H_i} X_{ith}) \geq rv_i$	$\forall i \in \{1..N\}$	(36)
--	--------------------------	------

- (37) et (38) retiennent la date de début de l'acte chirurgical j de la victime i . Si une victime ne peut être prise en charge à temps, le modèle fixe la date d'intervention à la valeur M .

$$t_i = \sum_{t=0}^T tX_{i1t} + (1 - \sum_{t=0}^T X_{i1t}) \cdot M \quad \forall i \in \{1..N\} \quad (37)$$

$$td_i = \sum_{t=0}^T tX_{i2t} + (1 - \sum_{t=0}^T X_{i2t}) \cdot M \quad \forall i \in B \quad (38)$$

- (39) et (40) garantissent que le deuxième acte chirurgical ($j=2$) d'une victime i doit commencer au plus tard à $t_i + \delta_{pré} + p_{i1}$.

$$td_i \geq t_i + \delta_{pré} \quad \forall i \in B \quad (39)$$

$$td_i \leq t_i + \delta_{pré} + p_{i1} \quad \forall i \in B \quad (40)$$

- Les contraintes (41), (42), (43), (44) et (45) permettent de fixer o_{it} à 1, tant qu'à l'instant t , une salle opératoire est occupée par la victime i .

$$n_{ijt} \geq X_{ijt} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\} \quad \forall j \in Z_i \quad (41)$$

$$n_{ijt} \leq \sum_{t'=0}^T X_{ijt'} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\} \quad \forall j \in Z_i \quad (42)$$

$$\sum_{t=0}^T n_{ijt} = p_{ij} + \delta_{pré} + \delta_{post} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall j \in Z_i \quad (43)$$

$$(1 - \sum_{t'=0}^t X_{ijt'}) + n_{ijt} \geq n_{ij(t+1)} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0, \dots, T-1\} \quad \forall j \in Z_i \quad (44)$$

$$o_{it} \geq n_{ijt} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\} \quad \forall j \in Z_i \quad (45)$$

- Les contraintes (46), (47) et (48), fixent q_{ijt} à 1, tant qu'un chirurgien est, à l'instant t , occupé à réaliser l'acte j de la victime i .

$$\sum_{t'=t+\delta_{pré}}^{t+\delta_{pré}+p_{i1}-1} q_{i1t'} \geq p_{i1} \cdot X_{i1t} - (1 - X_{i1t}) \cdot M \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\} \quad (46)$$

$$\sum_{t'=t}^{t+p_{i2}-1} q_{i2t'} \geq p_{i2} \cdot X_{i2t} - (1 - X_{i2t}) \cdot M \quad \forall i \in B \quad \forall t \in \{0..T\} \quad (47)$$

$\sum_{t=0}^T q_{ijt} \leq p_{ij} \sum_t X_{ijt} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall j \in Z_i$	(48)
--	------

- Les contraintes (49) (resp.(50)) vérifient qu'à chaque instant, le nombre de salles occupées (resp. chirurgiens occupés) ne dépasse pas le nombre total S (resp. H_t).

$\sum_{i=1}^N o_{it} \leq S \quad \forall t \in \{0..T\}$	(49)
---	------

$\sum_{i=1}^N \sum_j^2 q_{ijt} \leq H_t \quad \forall t \in \{0..T\}$	(50)
---	------

Les contraintes (41) jusqu'à (50) permettent d'obtenir, à chaque instant, le nombre de salles et de chirurgiens occupés.

- Les contraintes (51), (52), (53), (54) et (55) sont des contraintes d'intégrité sur les variables.

$X_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall j \in Z_i \quad \forall t \in \{0..T\}$	(51)
---	------

$U_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in \{1..N\}$	(52)
--	------

$n_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\} \quad \forall j \in Z_i$	(53)
---	------

$o_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall t \in \{0..T\}$	(54)
--	------

$q_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in \{1..N\} \quad \forall j \in Z_i \quad \forall t \in \{0..T\}$	(55)
---	------

Egalement dans ce cas, le problème d'affectation ne se pose pas. Une victime n'est prise en charge que lorsqu'un chirurgien et une salle sont disponibles (contraintes (49) et (50)). Nous sommes donc assurés, qu'à chaque date, de début d'un acte j d'une intervention i , il existe au moins une salle et un chirurgien qui sont libres.

L'algorithme d'affectation des interventions aux salles et aux chirurgiens (ASC2) permet d'obtenir, à partir des résultats du programme linéaire, les détails du planning.

Soient F_s et G_s deux entiers naturels et φ l'ensemble des interventions affectées et ordonnées selon l'ordre croissant de leurs dates de début (t_i).

Algorithme ASC2

1/ Données :

φ : ensemble des interventions affectées, dans l'ordre croissant des dates de début (t_i).

2/ Initialisation : $i=1$; $F_s = 0$; $\forall s \in \{1..S\}$; $G_h = 0 \quad \forall h \in \{1..H\}$

3/ $s=1, h=1$

3.1/Si $t_i \geq F_s$, affecter i à la salle opératoire s :

$$F_s = \begin{cases} t_i + \delta_{pré} + p_{i1} + \delta_{post} & \text{si } i \in A \\ \max(t_i + \delta_{pré} + p_{i1} + \delta_{post}, td_i + p_{i2} + \delta_{post}) & \text{si } i \in B \end{cases}$$

Sinon, $s=s+1$, retour en 3.1/

4/ Si $t_i + \delta_{pré} \geq \max(G_h, rc_h)$, affecter l'acte 1 de i au chirurgien h : $G_h = t_i + \delta_{pré} + p_{i1}$,

Si $i \in A$, aller en 5/

Sinon, Si $td_i \geq \max(G_h, rc_h)$, affecter l'acte 2 de i au chirurgien h : $G_h = td_i + p_{i2}$,
aller en 5/

Sinon, $h=h+1$,

4.1/Si $td_i \geq \max(G_h, rc_h)$, affecter l'acte 2 de i au chirurgien h : $G_h = td_i + p_{i2}$, aller
en 5/

Sinon, $h=h+1$, aller en 4.1/

5/ $\varphi = \varphi \setminus \{i\}$

Si $\varphi = \emptyset$, fin

Sinon, $i=i+1$, aller en 3/

5- Expérimentation et analyse des résultats

Afin de valider les programmes linéaires proposés en explorant le temps de calcul nécessaire à l'obtention d'une solution, nous avons utilisé un logiciel commercial de résolution des modèles linéaires *Cplex* 10.1 sur une machine Bixeon® de processeur 3.00 GHz et 4 Go de RAM. Les résultats obtenus sont analysés en étudiant l'apport des différentes options (nomadisme, interventions mono-acte et multi-actes) sur le nombre de victimes traitées.

5.1. Problèmes tests

A cause de la nature de la problématique étudiée, nous n'avons pas trouvé de problèmes tests dans la littérature. Ainsi, nous avons défini 40 instances de taille maximale égale à 70, en nous basant sur des données réelles. Ces données sont générées à partir d'informations récoltées auprès de praticiens, tout en respectant les procédures hospitalières appliquées en

cas de catastrophe. Ces instances, générées aléatoirement selon la loi normale, diffèrent entre elles par le nombre de salles opératoires ($S = 4, 6, 8$ et 10) et les dates de disponibilité des chirurgiens ($R = rc_1, \dots, rc_H$ où $H = 4, 6, 8, 10$) rapportées dans le tableau 4.1. Nous nous limitons à 70 victimes en raison du temps de calcul très important.

Les durées, les dates ainsi que les dates limites définissant le problème, sont données en minutes (mn).

R	rc_1 (mn)	rc_2 (mn)	rc_3 (mn)	rc_4 (mn)	rc_5 (mn)	rc_6 (mn)	rc_7 (mn)	rc_8 (mn)	rc_9 (mn)	rc_{10} (mn)
R_1	0	0	0	30	30	30	60	60	120	120
R_2	0	0	0	30	30	30	60	60	60	120
R_3	0	0	0	30	30	60	60	60	120	120
R_4	0	0	30	30	30	60	60	60	120	120
R_5	0	0	30	30	60	60	60	120	120	120

Tableau 4.1. Dates d'arrivées des chirurgiens à l'hôpital d'accueil.

Chaque problème test est libellé $PN.S.R$; N désigne le nombre de victimes, S le nombre de salles opératoires et R les dates d'arrivées des chirurgiens. A titre d'exemple $P50.6.R_5$, où $R_5 = (0 ; 0 ; 30 ; 30 ; 60 ; 60)$, est un problème de 50 victimes, 6 salles opératoires et 6 chirurgiens disponibles à partir des dates $rc_1 = rc_2 = 0$ minutes, $rc_3 = rc_4 = 30$ minutes et $rc_5 = rc_6 = 60$ minutes.

Les résultats numériques sont obtenus, en fixant l'horizon $T = \max_{i=1, \dots, N} (dl_i + d_i)$. En effet, au-delà de cette date aucune victime ne peut être prise en charge. 15 minutes est le pas de discrétisation de l'intervalle $[0, T]$. Les durées opératoires des interventions chirurgicales d_i , les dates limites d'interventions dl_i et les dates d'arrivées des victimes rv_i sont reportées dans le tableau 4.2. Une intervention chirurgicale est composée par l'acte chirurgical et les actes pré-opératoire et post-opératoire. Les durées des actes pré-opératoire et post-opératoire sont données en minutes avec $\delta_{pré} = \delta_{post} = 15$.

i	d_i (mn)	dl_i (mn)	rv_i (mn)	i	d_i (mn)	dl_i (mn)	rv_i (mn)
1	120	510	0	36	60	330	180
2	60	270	0	37	120	330	0
3	60	420	240	38	90	810	240
4	60	150	30	39	60	450	300
5	120	630	120	40	90	570	330
6	60	750	420	41	90	600	210
7	60	300	120	42	60	450	360
8	60	630	150	43	60	600	270
9	90	450	60	44	90	900	450
10	90	480	150	45	60	660	240
11	90	660	210	46	120	630	420
12	150	630	330	47	90	480	150
13	60	660	240	48	60	630	180
14	60	630	300	49	120	600	270
15	120	630	30	50	60	510	210
16	60	660	150	51	150	510	420
17	60	600	330	52	60	450	270
18	60	660	300	53	90	60	0
19	90	630	420	54	90	720	0
20	60	660	60	55	60	480	120
21	60	270	30	56	150	330	30
22	150	270	180	57	60	450	360
23	60	270	30	58	60	540	180
24	120	180	90	59	90	510	0
25	150	540	0	60	150	240	120
26	90	510	270	61	60	30	0
27	90	600	300	62	120	450	210
28	90	480	120	63	60	330	180
29	120	630	450	64	90	120	0
30	60	540	300	65	60	450	210
31	150	630	450	66	60	240	120
32	90	420	360	67	90	360	30
33	60	360	30	68	60	540	300
34	120	570	330	69	90	360	180
35	150	510	150	70	60	270	150

Tableau 4.2. Dates limites d'interventions et d'arrivées des victimes à l'hôpital d'accueil.

Nous présentons dans le tableau 4.3, les victimes qui ont besoin de deux actes chirurgicaux ainsi que les durées opératoires correspondantes.

i	p_{i1} (mn)	p_{i2} (mn)	i	p_{i1} (mn)	p_{i2} (mn)
1	60	30	38	30	30
5	30	60	39	15	15
10	30	30	43	15	15
11	30	30	45	15	15
15	30	60	47	30	30
20	15	15	51	60	60
21	15	15	54	30	30
25	60	60	59	30	30
28	60	30	62	30	60
29	30	60	64	30	30
33	15	15	67	30	30
34	30	60	68	15	15

Tableau 4.3. Victimes à multi-actes chirurgicaux

La répartition des victimes selon les trois familles de problèmes tests, 25, 50 et 70, sont présentées dans le tableau suivant :

N	Victimes
25	2; 3; 5; 8; 10; 12; 15; 16; 20; 30; 33; 35; 37; 39; 41; 43; 46; 48; 50; 52; 54; 58; 61; 65; 68
50	18; 23; 25; 2; 3; 27; 29; 5; 8; 31; 36; 38; 10; 12; 15; 16; 20; 69; 30; 33; 35; 37; 39; 40; 41; 44; 47; 49; 51; 53; 55; 43; 46; 48; 50; 56; 57; 59; 60; 52; 54; 62; 63; 64; 58; 61; 65; 66; 67; 68
70	1 à 70

Tableau 4.4. Taille des instances en nombre de victimes

5.2. Les résultats de l'ordonnancement et l'affectation prédictifs des interventions aux salles opératoires

Pour chacune des instances générées, nous avons résolu le programme linéaire en nombres entiers développé dans le paragraphe 2 de ce chapitre. Nous indiquons : le temps de calcul en secondes ($CPU (s)$), le nombre de contraintes ($N.Cont.$), le nombre de variables

($N.Var.$), le nombre d'itérations ($N.Iter.$), la valeur de la fonction objectif ($F.Obj.1$), le pourcentage de victimes traitées (P (%)), la durée totale du programme opératoire ($C_{max}(h)$) exprimée en heure (h), et le taux d'occupation des salles opératoires $TO(\%)$.

$$TO(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^H d_i \cdot X_{ith}}{C_{max} \cdot S} \quad (I)$$

Nous ne présentons pas dans ce tableau les instances pour lesquelles il est évident que toutes les victimes vont être prises en charge (capacité largement supérieure à la charge).

Problèmes tests	CPU (s)	N.Cont.	N.Var.	N.Iter.	F.Obj.1	P (%)	C _{max} (h)	TO(%)
<i>P25.4.R₁</i>	0.1	32569	2528	721	24	96	10	81.25
<i>P25.4.R₄</i>	0.1	32569	2528	785	23	92	10	77.5
<i>P25.6.R₁</i>	0.1	38677	2947	765	25	100	10.5	53.17
<i>P25.6.R₃</i>	0.1	38677	2947	765	25	100	10.5	53.17
<i>P25.6.R₄</i>	0.1	38677	2947	784	24	96	10	53.33
<i>P25.6.R₅</i>	0.1	38677	2947	784	24	96	10	53.33
<i>P50.4.R₁</i>	11	175572	4954	13415	38	76	14.5	94.82
<i>P50.4.R₄</i>	9	175572	4954	12366	37	74	14.5	93.10
<i>P50.6.R₁</i>	49	192775	5782	22816	47	94	14.5	78.73
<i>P50.6.R₃</i>	49	192775	5782	22816	47	94	14.5	78.73
<i>P50.6.R₄</i>	26	192775	5782	41589	46	92	14.5	79.88
<i>P50.6.R₅</i>	26	192775	5782	41589	46	92	14.5	79.88
<i>P50.8.R₁</i>	63	217125	6972	22722	50	100	14.5	63.79
<i>P50.8.R₃</i>	64	217125	6972	22722	50	100	14.5	63.79
<i>P50.8.R₄</i>	26	217125	6972	56496	49	98	14.5	62.06
<i>P50.8.R₅</i>	26	217125	6972	56496	49	98	14.5	62.06
<i>P70.4.R₁</i>	74	445824	7573	22383	43	61	14.5	98.30
<i>P70.4.R₄</i>	59	445824	7573	20675	42	60	14.5	98.13
<i>P70.6.R₁</i>	188	498529	8521	41221	55	79	15	85.55
<i>P70.6.R₃</i>	190	498529	8521	41221	55	79	15	85.55
<i>P70.6.R₄</i>	177	498529	8521	39522	54	77	15	83.88
<i>P70.6.R₅</i>	173	498529	8521	39522	54	77	15	83.88
<i>P70.8.R₁</i>	309	579458	9204	67322	65	93	15	77.91
<i>P70.8.R₃</i>	308	579458	9204	67322	65	93	15	77.91
<i>P70.8.R₄</i>	354	579458	9204	66582	64	91	15	76.66
<i>P70.8.R₅</i>	355	579458	9204	66582	64	91	15	76.66
<i>P70.10.R₁</i>	395	654726	11580	71594	70	100	16.5	61.21
<i>P70.10.R₂</i>	393	654726	11580	71594	70	100	16.5	61.21
<i>P70.10.R₃</i>	420	654726	11580	71594	70	100	17	59.41
<i>P70.10.R₄</i>	360	654726	11580	66783	69	99	17	59.41
<i>P70.10.R₅</i>	373	654726	11580	66783	69	99	17	58.82

Tableau 4.5. Résultats numériques

Problèmes tests	Numéros des victimes refusées par le programme
<i>P25.4.R₁</i>	20
<i>P25.4.R₄</i>	20; 54
<i>P25.6.R₄</i>	54
<i>P25.6.R₅</i>	54
<i>P50.4.R₁</i>	5; 20; 33; 43; 52; 68; 25; 47; 51; 57; 60; 62
<i>P50.4.R₄</i>	5; 20; 33; 37; 43; 52; 61; 68; 25; 47; 51; 62; 67
<i>P50.6.R₁</i>	43; 60; 62
<i>P50.6.R₃</i>	43; 60; 62
<i>P50.6.R₄</i>	20; 43; 52; 54
<i>P50.6.R₅</i>	20; 43; 52; 54
<i>P50.8.R₄</i>	37
<i>P50.8.R₅</i>	37
<i>P70.4.R₁</i>	5; 10; 15; 20; 33; 39; 43; 46; 52; 61; 68; 23; 25; 29; 47; 51; 59; 60; 62; 1; 7; 9; 11; 14; 28; 32; 34
<i>P70.4.R₄</i>	5; 20; 33; 37; 39; 43; 46; 52; 54; 61; 68; 23; 25; 29; 47; 51; 59; 60; 62; 64; 67; 1; 9; 14; 28; 32; 34; 45
<i>P70.6.R₁</i>	5; 20; 33; 43; 52; 68; 25; 47; 51; 59; 62; 67; 28; 34; 45
<i>P70.6.R₃</i>	5; 20; 33; 43; 52; 68; 25; 47; 51; 59; 62; 67; 28; 34; 45
<i>P70.6.R₄</i>	5; 20; 33; 43; 52; 54; 68; 25; 29; 47; 51; 60; 62; 11; 34; 45
<i>P70.6.R₅</i>	5; 20; 33; 43; 52; 54; 68; 25; 29; 47; 51; 60; 62; 11; 34; 45
<i>P70.8.R₁</i>	20; 33; 43; 51; 62
<i>P70.8.R₃</i>	20; 33; 43; 51; 62
<i>P70.8.R₄</i>	43; 52; 54; 51; 62; 45
<i>P70.8.R₅</i>	43; 52; 54; 51; 62; 45
<i>P70.10.R₄</i>	2
<i>P70.10.R₅</i>	2

Tableau 4.7. Victimes non prises en charge par l'hôpital

Sur l'ensemble des instances de même taille, le renforcement de la capacité permet d'identifier le nombre de victimes qui peuvent être traitées en agissant sur le nombre de salles opératoires et les dates d'arrivées des chirurgiens à l'hôpital. Considérons, à titre d'exemple, les instances *P50.4.R₁* et *P50.6.R₁*, on augmenterait le nombre de victimes traitées de 12 (100 % de victimes seront traitées) si 2 salles opératoires et 2 chirurgiens de plus étaient disponibles à l'hôpital à l'instant $t = 0$. Aussi, pour le cas de 70 victimes et 6 salles opératoires

($P70.6.R_3$ et $P70.6.R_4$), 1 victime pourrait être traitée en plus, si le chirurgien 3 rejoignait l'hôpital à l'instant $t = 0$.

En revanche, nous constatons que les salles opératoires sont mieux occupées dans le cas où toutes les victimes ne sont pas traitées à 100%. En effet, plus nous traitons de victimes (ou plus la capacité augmente), plus le taux d'occupation $TO(\%)$ décroît. Dans le cas où la capacité est inférieure à la demande, et en raison de la nature du problème traité (maximisation du nombre des survivants), le programme cherche à optimiser l'occupation des salles et des chirurgiens pour pouvoir affecter le maximum de victimes. La figure suivante affirme notre point de vue.

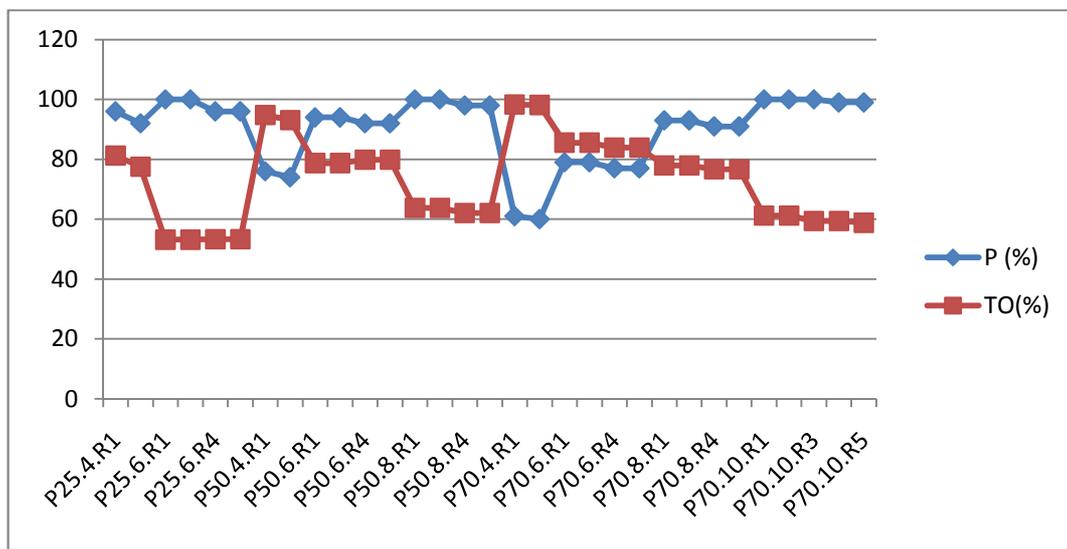


Figure 4.8. Evolution Taux d'occupation des salles opératoires / Pourcentage de traitement de victimes

Aussi, il est important de préciser qu'à cause des dates d'arrivées et de limites des victimes, le taux d'occupation n'atteint jamais les 100%.

Ce constat aide les décideurs à anticiper, et par voie de conséquence à s'organiser au mieux, afin de sauver le maximum de vies humaines.

5.3. Les résultats de la mutualisation des ressources critiques : cas d'interventions mono-acte chirurgical

Nous présentons dans le tableau 4.8, les résultats obtenus suite à la résolution du programme linéaire correspondant (paragraphe 3). Nous indiquons le temps de calcul en secondes ($CPU (s)$), le nombre de contraintes ($N.Cont.$), le nombre de variables ($N.Var.$), le

nombre d'itérations ($N.Iter.$), la valeur de la fonction objectif ($F.Obj.2$), le pourcentage de victimes traitées (P (%)), la durée totale du programme opératoire ($C_{max}(h)$) et le taux d'occupation des salles opératoires $TON(\%)$. En plus, nous calculons pour chaque instance le pourcentage de nouvelles victimes traitées dans le cas de mutualisation des ressources critiques $GN(\%)$.

$$TON(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^H d_i \cdot X_{ith}}{C_{max} \cdot S} \quad (II)$$

$$GN(\%) = \frac{F.Obj.2 - F.Obj.1}{F.Obj.1} \quad (III)$$

Problèmes tests	CPU (s)	N.Cont.	N.Var.	N.Iter.	F.Obj.2	P(%)	$C_{max}(h)$	TON(%)	GN(%)
<i>P25.4.R₁</i>	0.01	6841	5073	4289	25	100	12	69.79	4,2
<i>P25.4.R₄</i>	0.01	6841	5073	5427	25	100	12.5	67.00	8,3
<i>P50.4.R₁</i>	42	17519	12571	9255	41	82	13.75	90.16	12,5
<i>P50.4.R₄</i>	38	17519	12571	9422	41	82	15.25	89.52	16,7
<i>P50.6.R₁</i>	56	17519	12571	6875	50	100	14.5	85.05	12,5
<i>P50.6.R₃</i>	35	17519	12571	6145	50	100	15	82.22	12,5
<i>P50.6.R₄</i>	72	17519	12571	12577	50	100	14	88.09	16,7
<i>P50.6.R₅</i>	81	17519	12571	12577	50	100	14	88.09	16,7
<i>P70.4.R₁</i>	104	24484	20583	18962	46	66	15.5	96.12	12,5
<i>P70.4.R₄</i>	95	24484	20583	13369	46	66	16	96.87	16,7
<i>P70.6.R₁</i>	1378	24484	20583	153041	61	87	15.5	87.12	25
<i>P70.6.R₃</i>	586	24484	20583	27276	61	87	16	88.96	25
<i>P70.6.R₄</i>	847	24484	20583	50797	60	86	16	88.96	25
<i>P70.6.R₅</i>	620	24484	20583	43920	60	86	15.5	86.18	25
<i>P70.8.R₁</i>	25	24484	20583	5432	70	100	14,75	85.59	20,8
<i>P70.8.R₃</i>	18	24484	20583	89685	70	100	14,75	85.59	20,8
<i>P70.8.R₄</i>	172	24484	20583	13151	70	100	15	84.16	25
<i>P70.8.R₅</i>	181	24484	20583	14541	70	100	17.5	72.14	25

Tableau 4.8. Résultats numériques

En examinant le tableau 4.8, nous constatons, que sur l'ensemble des instances, le temps de calcul varie entre 0.01 secondes (*P25.4.R₁*) et 22.96 minutes (*P70.6.R₁*). Avec une durée inférieure ou égale à 1 minute dans 44% des cas et inférieure ou égale à 5 mn dans 67% des cas.

L'algorithme ASC1 permet, à partir des résultats du programme linéaire, de fournir les détails de l'ordonnancement proposé. Considérons, à titre d'exemple, l'instance $P25.4.R_1$. Le programme proposé est détaillé dans le tableau 4.9.

Victimes	t_i	s	h	Victimes	t_i	S	h
2	0	1	1	16	360	1	2
61	30	3	4	20	390	2	4
33	45	2	1	12	390	4	1
37	120	1	1	50	405	3	2
65	120	2	2	35	420	1	3
58	180	4	3	8	450	2	2
48	225	2	2	46	495	3	2
3	240	3	1	30	525	2	3
10	240	4	3	68	540	1	4
5	285	3	1	41	600	1	1
52	300	1	2	15	615	4	2
39	300	2	4	54	630	1	3
43	330	4	3				

Tableau 4.9. Programme des salles et des chirurgiens.

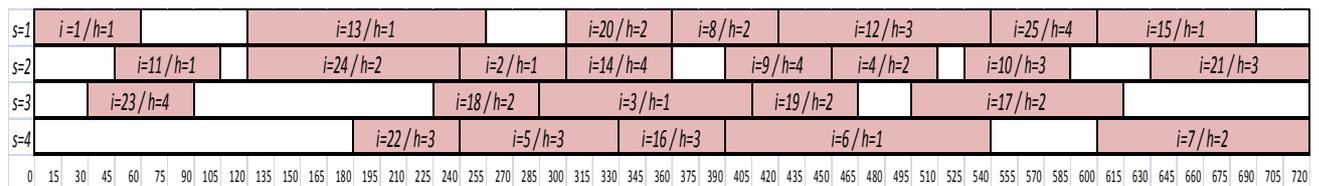


Figure 4.9 : Représentation graphique du programme détaillé des salles opératoires.

t (mn)

En examinant l'apport du nomadisme, nous remarquons que nous arrivons à augmenter le nombre de victimes traitées jusqu'à 25% ($GN(\%) = 25$) dans 33% des cas. Il est important de préciser que dans les instances ($P25.4.R_1$, $P25.4.R_4$), ($P50.6.R_1$, $P50.6.R_3$, $P50.6.R_4$, $P50.6.R_5$) et ($P70.8.R_1$, $P70.8.R_3$, $P50.8.R_4$, $P70.8.R_5$) 100% des victimes sont traitées. Ce qui prouve l'intérêt de la mutualisation des ressources face à une telle situation.

Dans le cas où les ressources disponibles ne permettent pas de traiter la totalité des victimes, il est important d'identifier la liste de celles pour lesquelles la prise en charge ne peut se faire à temps. L'examen des données concernant ces cas non traités, peut aider les décideurs à prendre les bonnes dispositions à temps.

Considérons à titre d'exemple l'instance $P50.4.R_1$, l'identification des victimes refusées par le programme linéaire proposé est donné par le tableau 4.10, en 42 secondes (tableau 4.8).

Instance	Victimes
$P50.4.R_1$	5; 20; 43; 52; 68; 18; 47; 51; 62

Tableau 4.10. Victimes non prises en charge par l'hôpital d'accueil.

Nous constatons que les salles opératoires sont mieux occupées dans le cas où la totalité des victimes ne sont pas traitées. En effet, plus nous augmentons la capacité, plus le taux d'occupation $TO(\%)$ décroît (figure 4.10).

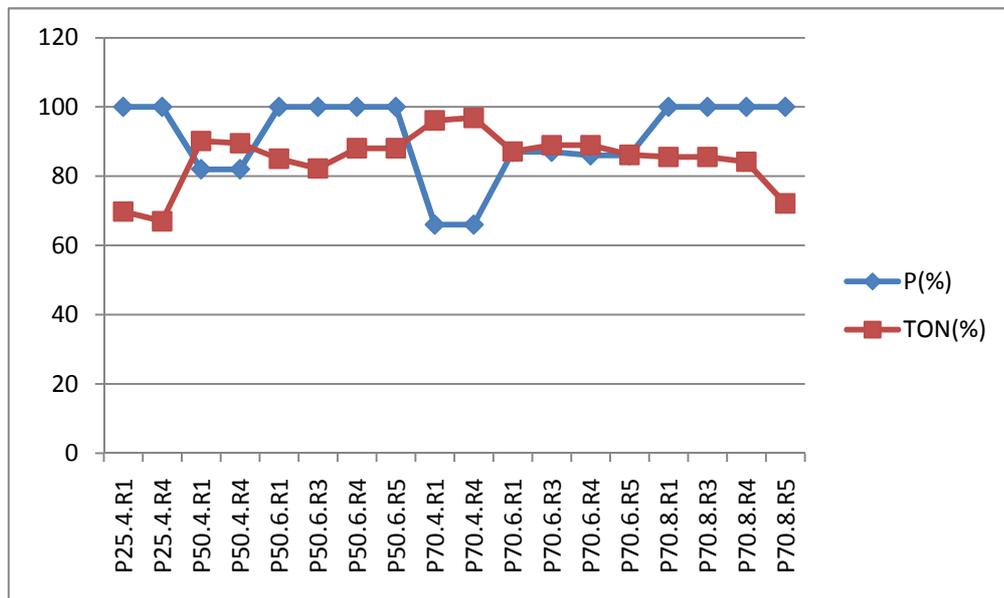


Figure 4.10 : Evolution du Taux d'occupation des salles opératoires / Pourcentage de traitement de victimes

En examinant les dates limites d'interventions de chaque cas non traité, on peut, selon le degré d'urgence, soit faire appel à un autre centre de soin, soit renforcer l'équipe de chirurgiens.

5.4. Les résultats de la mutualisation des ressources critiques : cas d'intervention multi-actes chirurgicaux

Pour chaque instance $PN.S.R$ nous indiquons : le temps de calcul en secondes (CPU (s)), le nombre de contraintes ($N.Cont.$), le nombre de variables ($N.Var.$), le nombre d'itérations

($N.Iter.$), la valeur de la fonction objectif ($F.Obj.3$), le pourcentage de victimes traitées (P (%)), la durée totale du programme opératoire en heures ($C_{max}(h)$) et le taux d'occupation des salles opératoires $TOM(\%)$ Nous calculons aussi le gain en pourcentage sur le nombre de victimes traitées dans le cas de mutualisation des ressources critiques avec des interventions multi-actes chirurgicaux. Nous désignons par $GM(\%)$ le gain calculé par rapport au modèle avec interventions mono-acte chirurgical. $GNM(\%)$ est le gain obtenu en comparant les résultats avec ceux obtenus par le modèle sans nomadisme.

$$TOM(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T \sum_{h=1}^H d_i \cdot X_{iht}}{C_{max} \cdot S} \quad (IV)$$

$$GM(\%) = \frac{F.Obj.3 - F.Obj.2}{F.Obj.2} \quad (V)$$

$$GNM(\%) = \frac{F.Obj.3 - F.Obj.1}{F.Obj.1} \quad (VI)$$

Problèmes tests	CPU (s)	N.Cont.	N.Var.	N.Iter.	F.Obj.3	P(%)	$C_{max}(h)$	TOM(%)	GM(%)	GNM(%)
P25.4.R₁	3	7593	6891	6154	25	100	11.25	63.18	-	4
P25.4.R₄	4	7593	6891	6758	25	100	11.5	64.58	-	9
P50.4.R₁	20	21847	15853	9583	50	100	13.75	79.71	22	32
P50.4.R₄	23	21847	15853	9678	50	100	13.75	79.71	22	35
P50.6.R₁	48	21847	15853	15896	50	100	14.75	76.92	-	6
P50.6.R₃	18	21847	15853	8576	50	100	13.75	71.70	-	6
P50.6.R₄	51	21847	15853	17580	50	100	13.75	71.70	-	9
P50.6.R₅	42	21847	15853	16247	50	100	13.75	71.70	-	9
P70.4.R₁	220	30871	27476	39541	60	86	15.25	92.64	30	40
P70.4.R₄	452	30871	27476	52548	60	86	16	97.19	30	43
P70.6.R₁	76	30871	27476	21583	70	100	14	76.87	15	27
P70.6.R₃	84	30871	27476	27538	70	100	14	76.87	15	27
P70.6.R₄	182	30871	27476	33579	70	100	14	76.87	17	30
P70.6.R₅	187	30871	27476	36584	70	100	14	76.87	17	30
P70.8.R₁	72	30871	27476	24836	70	100	14	61.04	-	8
P70.8.R₃	35	30871	27476	15720	70	100	14	61.04	-	8
P70.8.R₄	26	30871	27476	12975	70	100	14	61.04	-	9
P70.8.R₅	21	30871	27476	11235	70	100	14	61.04	-	9

Tableau 4.11. Résultats numériques³

³ Le label (-) indique que le gain ne peut être calculé parce que toutes les victimes ont été déjà prises en charge.

Nous constatons d'après le tableau 4.11, que la solution optimale est obtenue en moins de 8 minutes. Dans 61% des cas, le temps CPU est inférieur ou égal à 1 minute.

En utilisant les résultats fournis par le programme linéaire, le détail du programme opératoire proposé est donné par l'algorithme ASC2.

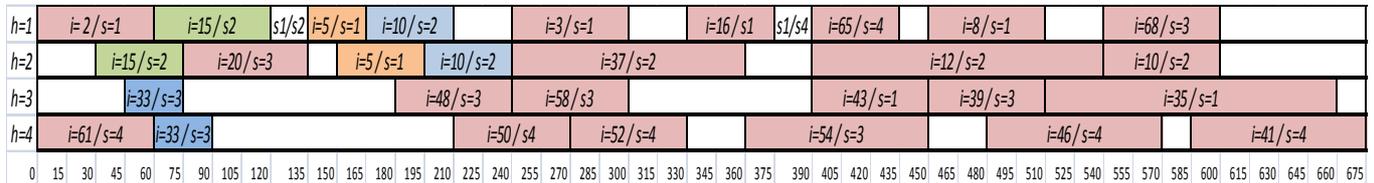


Figure 4.11. Représentation graphique du programme détaillé des salles opératoires

t (mn)

Le libellé si/sj indique que le chirurgien s'est déplacé, après la fin de l'acte chirurgical, de la salle opératoire si à la salle opératoire sj pour commencer un autre acte.

Afin d'examiner l'apport du nomadisme des chirurgiens, dans le cas multi-actes chirurgicaux, nous calculons $GM(\%)$ et $GNM(\%)$. Nous constatons que le nomadisme multi-actes chirurgicaux est très intéressant étant donné que nous arrivons à augmenter le nombre de victimes traitées jusqu'à 43% ($GM(\%) = 43$). L'apport du nomadisme multi-actes chirurgicaux est aussi considérable si nous comparons les résultats que nous obtenons par rapport au nomadisme classique ($GM(\%) = 30$, pour les instances $P70.4.R_1$ et $P70.4.R_4$). En effet, cette pratique peut réduire la durée totale d'une intervention multi-actes, ce qui permet de libérer la salle opératoire plus tôt, et par suite, la prise en charge de plus de victimes. Il est important de préciser qu'avec le nomadisme multi-actes chirurgicaux nous arrivons à traiter 100% des victimes dans 89% des cas en recourant uniquement aux moyens disponibles à l'instant de la catastrophe.

Nous remarquons d'après la figure 4.12 que plus la capacité de traitement augmente, plus le taux d'occupation diminue (exemple : $P70.4.R_1$ et $P70.4.R_4$). Néanmoins, dans certains cas (exemple : $P50.4.R_1$, $P50.4.R_4$ et $P70.6.R_3$) pour lesquels toutes les victimes sont traitées, le taux d'occupation des salles est assez élevé (exemple : $TOM(\%) = 79.71$ dans le cas $P50.4.R_1$).

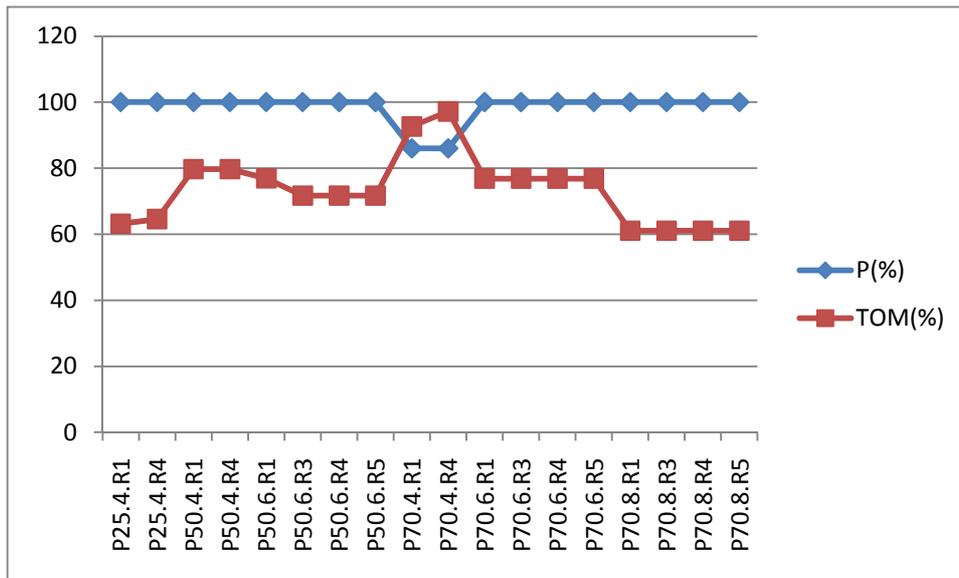


Figure 4.12 : Evolution Taux d'occupation des salles opératoires / Pourcentage de traitement de victimes.

6- Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un problème d'ordonnancement et d'affectation des interventions chirurgicales en cas de catastrophe. Face à une telle situation la maîtrise conjointe des différentes ressources humaines et matérielles est indispensable pour assurer une meilleure efficacité.

Nous avons développé trois programmes. Le premier consiste à ordonnancer les interventions dans les salles opératoires sans tenir compte du problème de partage des ressources (chaque chirurgien est affecté à une seule salle opératoire). Afin de pouvoir encore optimiser l'exploitation des salles en se basant sur la mutualisation des ressources critiques, nous avons introduit dans le deuxième programme la notion du nomadisme des chirurgiens. Le troisième programme traite le problème de nomadisme multi-actes chirurgicaux.

Pour les différentes instances générées, les résultats sont obtenus en des temps acceptables (22.96 minutes au maximum). En plus, l'apport du nomadisme des chirurgiens, dans le cas du nomadisme classique ($GN(\%) = 25$ dans 33% des cas) ou le nomadisme multi-actes chirurgicaux (un gain qui arrive jusqu'à 43%), a permis une meilleure occupation des salles à des instants critiques. Néanmoins, dans le cas où la capacité est supérieure à la demande, le taux d'occupation atteint au minimum les $TO(\%) = 53.17\%$.

Cependant, le caractère instable d'une situation d'exception fait que le programme opératoire est confronté à plusieurs perturbations. Il serait donc nécessaire de compléter notre étude par une approche réactive de façon à tenir compte de ces perturbations.

Chapitre 5. L'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires avec prise en compte des perturbations

L'efficacité du système de gestion hospitalier est conditionnée par de multiples facteurs dont l'anticipation et la réactivité. Une situation d'exception est caractérisée par l'apparition brutale de plusieurs perturbations qui troublent l'exécution du programme opératoire prédictif.

Face à une telle situation l'hôpital doit disposer d'un outil d'aide à la décision lui permettant de réagir en temps réel.

Ces dernières années, certains travaux se sont intéressés aux problèmes réactifs dans le domaine hospitalier en situation normale, notamment quand il s'agit de prendre en considération des interventions urgentes au niveau du bloc opératoire (Lamiri et *al.*, 2006) (Hammami, 2004) (Roland et *al.*, 2009 b). Tous ces travaux ne considèrent pas un problème d'ordonnancement dans une situation d'exception avec un afflux massif de victimes. Dans une telle situation la plupart des interventions doivent être réalisées en urgence et dans un horizon de temps relativement court.

Ainsi, Contrairement aux chapitres 3 et 4, traitant le problème d'optimisation des ressources en mode prédictif, nous proposons dans ce chapitre un modèle réactif de programmation opératoire en situation d'exception dont la finalité est de prendre en charge le maximum de victimes.

1- La présentation du problème

1.1. Les perturbations

L'un des défis posés à la programmation opératoire en situation d'exception est l'aptitude à faire face aux perturbations.

(Hammami, 2004) distingue deux types de perturbations : les incertitudes et les aléas. Les incertitudes sont les imprécisions qui affectent les mesures physiques et les erreurs qui découlent de la différence entre l'estimation prévisionnelle d'une grandeur et sa valeur

effective. Les aléas sont les événements de type discret qui entraînent des modifications dans le modèle.

1.1.3 Les incertitudes

Les durées des interventions chirurgicales ne sont pas connues au préalable. En effet, l'ordonnancement prédictif est basé sur une estimation des chirurgiens en se basant sur leur expérience. Dans notre cas, l'estimation des durées opératoires se fait au niveau du PMA par un médecin catégorisant les victimes selon leur degré d'urgence.

Pour le même type d'intervention chirurgicale, la durée nécessaire pour réaliser un acte pré-opératoire, post-opératoire ou chirurgical est variable en fonction de l'état du patient, de l'expérience et de la compétence de l'équipe chirurgicale et, des complications pouvant survenir lors de l'intervention (Hammami, 2004).

1.1.4 Les aléas

En situation normale, les urgences constituent le type de perturbation qui entraîne le plus de changement sur le programme opératoire établi [Lafon et Landry, 2001 S.Hammami]. Ce constat est d'autant plus vrai en cas de catastrophe.

Face à une telle situation où la plupart des interventions sont urgentes, des victimes non attendues peuvent arriver à l'hôpital d'accueil à n'importe quel instant pour des interventions également urgentes. En effet, si à chaque instant des victimes peuvent être évacuées du PMA vers l'hôpital, certaines d'entre elles, nécessitant des actes chirurgicaux urgents, arrivent directement à l'hôpital sans passer par le PMA. Par ailleurs, des victimes peuvent voir leur état se dégrader ou s'améliorer, réduisant ou allongeant ainsi leur date limite d'intervention prévue. Ces événements imprévisibles ont ainsi tendance à perturber très fortement les programmes pré-établis.

Nous présentons ci-dessous une typologie des principales perturbations rencontrées en cas de catastrophe.

Incertitudes	Aléas	Cas traité
Dépassement de la durée opératoire estimée.		oui
	Arrivée d'une nouvelle victime via le PMA.	oui
	Arrivée d'une nouvelle victime sans passer par le PMA.	oui
	Dégradation de l'état d'une victime.	oui
	Matériel non disponible à temps dans la salle opératoire.	non
	Arrivée d'une victime (via le PMA) en retard à cause des conditions contraignantes de déplacement.	non
	Arrivé d'un chirurgien et / ou un personnel de soins en retard à cause des conditions contraignantes de déplacement.	non
Dépassement de la durée pré-opératoire ou/et post-opératoire estimée.		non

Tableau 5.1. Typologie des principales perturbations rencontrées en cas de catastrophe

Face à cette complexité, la performance d'un système d'organisation hospitalière se trouve fortement tributaire de son aptitude à adapter rapidement les décisions déjà prises afin de prendre en compte les incertitudes et les aléas.

1.2. Le problème étudié

Dans le cas d'une catastrophe, les victimes sont normalement évacuées du lieu du sinistre jusqu'à l'hôpital d'accueil via le PMA. Le triage des victimes est réalisé au PMA. Il permet de définir le degré d'urgence, la date d'arrivée à l'hôpital, la nature des pathologies et la (ou les) durée(s) opératoire(s) nécessaire(s) pour les victimes qui doivent subir des actes chirurgicaux.

En se basant sur ces données, l'hôpital d'accueil réalise son programme opératoire prédictif à l'instant $t = t_0$. Toutefois, des perturbations peuvent survenir à n'importe quel moment au cours de l'exécution du programme.

Suite à une perturbation à l'instant $t = t_p$, l'hôpital doit réagir rapidement, afin de pouvoir en minimiser les conséquences, notamment sur le nombre de victimes à traiter. Pour réduire la complexité du problème étudié nous supposons que chaque chirurgien est affecté à une salle opératoire. Ainsi les chirurgiens ne sont pas nomades.

Dans ce contexte, nous traitons le problème d'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires en tenant compte des différentes perturbations qui peuvent survenir au cours du temps.

Pour ce faire nous proposons un modèle réactif de programmation opératoire en situation d'exception dont la finalité est de prendre en charge le maximum de victimes.

2- L'approche proposée

Pour la résolution du problème réactif, nous proposons une heuristique composée de plusieurs modèles de programmation linéaire en nombre entiers.

Pour un instant donné, nous ne traitons qu'une seule perturbation à la fois : arrivée d'une nouvelle victime, évolution d'un degré d'urgence, sur-estimation ou sous-estimation d'une durée opératoire.

Nous présentons dans le paragraphe suivant, l'approche réactive proposée dans le cas d'arrivée d'une nouvelle victime qui a besoin d'un traitement chirurgical urgent. Il est important de préciser que nous traitons une seule victime à la fois.

2.1. L'arrivée d'une nouvelle victime à l'hôpital d'accueil

La durée de sauvetage varie en fonction de la nature de la catastrophe. Du fait des contraintes d'accès sur le lieu du sinistre et de la limitation de la capacité de ramassage des équipes de secours, les victimes ne peuvent être évacuées en une seule fois et arrivent progressivement au PMA. Ce dernier communique à l'hôpital d'accueil les dates d'arrivées des nouvelles victimes ainsi que leur degré d'urgence. Toutefois, d'autres victimes arrivent directement à l'hôpital sans passer par le PMA (exemple : catastrophe AZF Toulouse (Ministère de la santé, de la famille et des personnes handicapées, 2002)). L'insertion de ces victimes dans le programme opératoire est beaucoup plus difficile parce qu'on ne connaît à

l'avance ni leur date d'arrivée ni leur degré d'urgence. Le programme opératoire doit donc être en mesure de réagir à temps pour absorber ces aléas.

Du point de vue de la programmation, qu'une victime soit transférée du PMA vers l'hôpital ou qu'elle se présente directement à l'hôpital sans passer par le PMA, elle est traitée de la même manière. La seule différence réside dans le fait que sa date d'arrivée et son degré d'urgence ne sont connus, dans le deuxième cas, qu'à son arrivée à l'hôpital puisqu'elle n'aura subi aucun traitement préalable au PMA.

2.1.1. L'algorithme de résolution

Soit P_0 le programme prédictif connu à l'instant $t = t_0$ (le programme prédictif réalisé au chapitre 4). $t = t_p$ (date de la perturbation) est la date pour laquelle le PMA annonce l'arrivée d'une nouvelle victime. Cette dernière peut arriver directement à l'hôpital d'accueil sans passer par le PMA.

Afin de minimiser l'effet d'une perturbation sur le programme opératoire prédictif P_0 , nous procédons en plusieurs étapes. Le programme P_I cherche à insérer la nouvelle victime dans une plage inexploitée. Si elle n'a pas été insérée, on calcule pour chaque salle opératoire une marge libre Δg_s et la somme des marges libres Δ_i des interventions appartenant à une même salle afin de forcer l'insertion. Cette méthode de calcul est inspirée de la méthode PERT (annexe 2).

$\Delta g_s = \sum_{i \in s} \Delta_i$	(I)
--	-----

Avec :

$\Delta_i = DF_tard_i - DF_tôt_i$	(II)
-------------------------------------	------

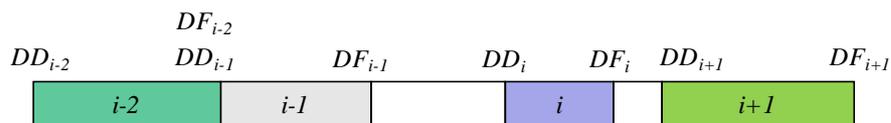


Figure 5.1. Ordonnancement prédictif des interventions.

La date de fin au plus tard est donnée par l'équation (III).

$DF_tard_i = \min(dl_i + d_i, DD_{i+1})$	(III)
---	-------

La date de fin au plus tôt est donnée par l'équation (IV).

$DF_tôt_i = DF_{i-1} + d_i$	(IV)
------------------------------	------

P_2 cherche à affecter la nouvelle victime à la salle opératoire qui possède le plus grand Δg_s . Sous la contrainte que les interventions qui sont en cours d'exécution ne seront pas interrompues, la victime est insérée à la date au plus tard en vérifiant les contraintes de la date d'arrivée, et de la date limite d'intervention. Lorsque la victime est affectée à une salle, nous appliquons la méthode shift right pour décaler toutes les interventions après la victime insérée avec une durée égale à sa durée opératoire.

Si P_2 arrive à insérer la nouvelle victime sans remettre en cause la prise en charge à temps des autres victimes, alors c'est la fin de l'heuristique. Sinon on revient à l'ordonnancement initial (P_0) et on passe à l'étape suivante.

Dans ce cas, P_3 réordonnance, à partir de la date de la perturbation, les victimes appartenant à la salle opératoire qui possède le plus grand Δg_s . Les interventions qui sont en cours d'exécution ne seront pas interrompues. Si la nouvelle victime n'a pas pu être insérée, le programme P_4 réordonnance, à partir de la date de la perturbation, toutes les interventions dans toutes les salles opératoires, sous contrainte que les interventions qui sont en cours d'exécution ne seront pas interrompues.

Si aucune solution n'est trouvée, la victime n'a toujours pas été insérée, elle sera réorientée vers un autre hôpital.

Nous présentons dans la figure 5.2, l'approche réactive proposée dans le cas d'insertion d'une nouvelle victime dans le programme opératoire.

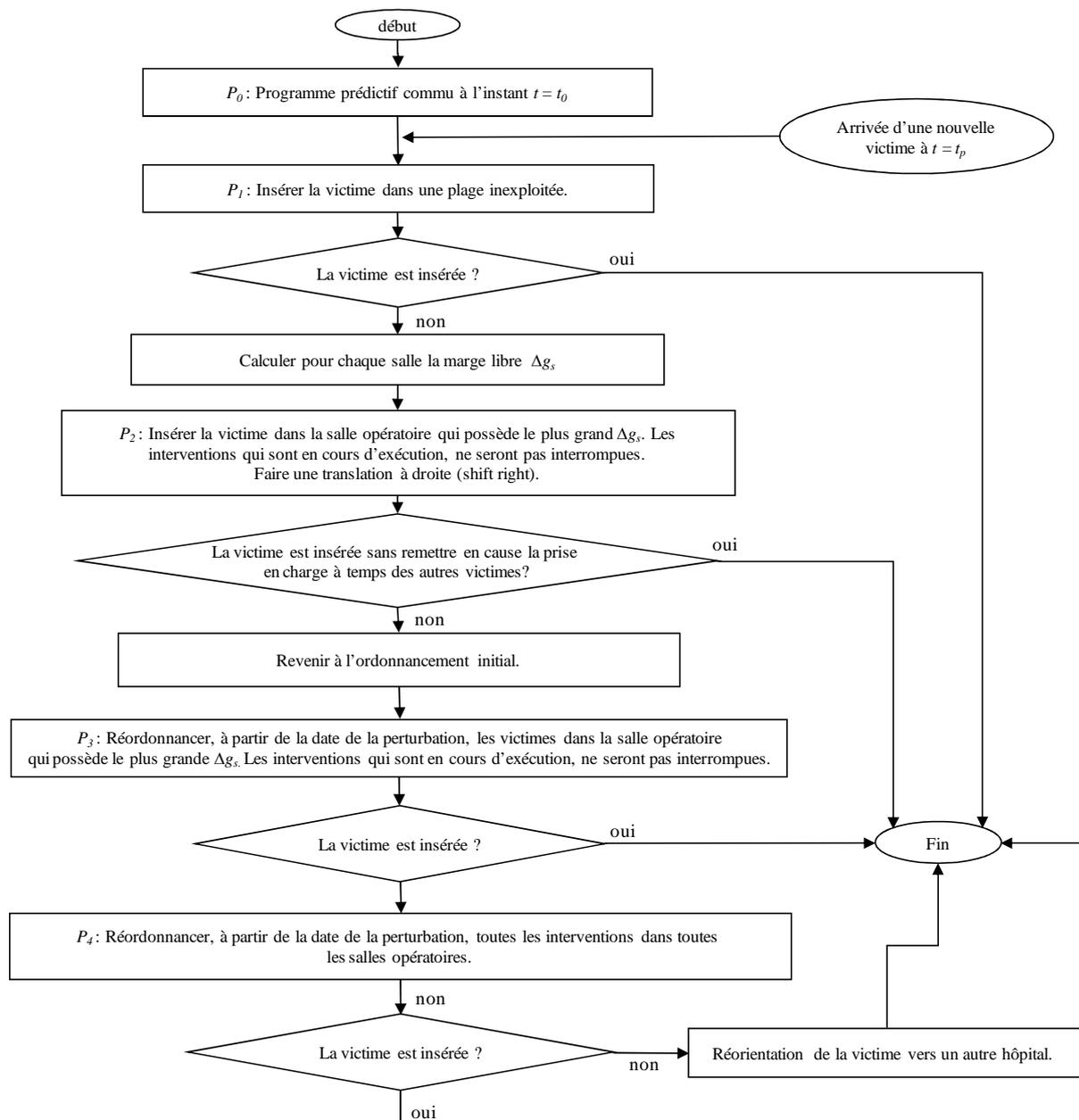


Figure 5.2. Algorithme de résolution réactif dans le cas d'insertion d'une nouvelle victime.

Afin de mieux expliquer notre approche de résolution, nous proposons l'exemple illustratif suivant :

Soit le programme opératoire prédictif P_0 composé de neuf interventions ordonnancées sur deux salles opératoires S_1 et S_2 :

Nous désignons par PI_j , la plage inexploitée d'indice j

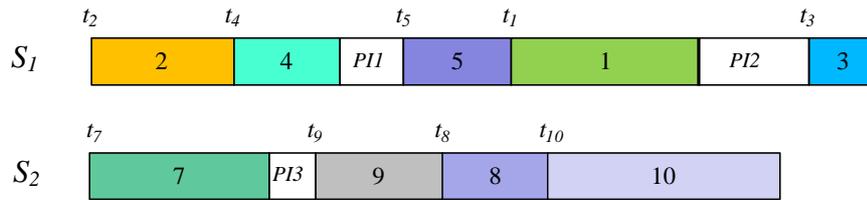


Figure 5.3. Programme opératoire prédictif P_0 .

(6) est la nouvelle victime à insérer dans le programme opératoire.

Etant donné le programme prédictif P_0 connu à l'instant $t = t_0$, le programme P_1 cherche à insérer la nouvelle victime dans une plage inexploitée de taille suffisante et qui doit satisfaire en même temps les deux contraintes relatives à : (1) la date limite d'intervention et (2) la date d'arrivée de la victime à l'hôpital.

En calculant les plages inexploitées, on cherche à insérer la victime 6 dans l'une de ces plages.

Soit :

$d_6 \geq t_5 - (t_4 + d_4) \Leftrightarrow$ la victime 6 ne peut pas être insérée dans cette plage PII .

$d_6 \geq t_9 - (t_7 + d_7) \Leftrightarrow$ la victime 6 ne peut pas être insérée dans cette plage $PI3$.

$d_6 \leq t_3 - (t_1 + d_1) \Leftrightarrow$ insertion de la victime 6 dans la plage inexploitée $PI2$.

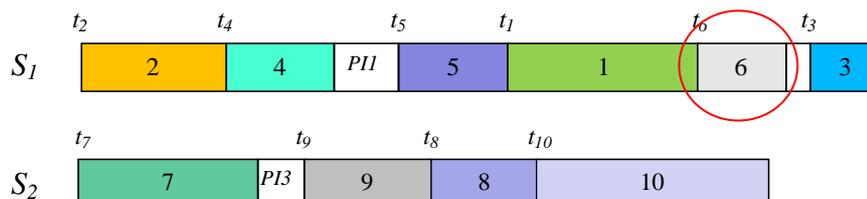


Figure 5.4. Programme opératoire obtenu suite à la résolution du programme P_1 .

Si la nouvelle victime a pu être insérée en utilisant les plages de temps inexploitées, alors l'algorithme se termine, sinon la nouvelle victime est insérée en réordonnant les opérations que doivent subir l'ensemble des victimes dont l'opération n'a pas commencée sur la base d'une heuristique décrite ci-après. Pour cela, on calcule pour chaque salle opératoire sa marge libre Δg_s . Le programme P_2 insère ensuite la victime, avant sa date limite d'intervention, dans la salle qui possède le plus grand Δg_s . Les opérations déjà commencées

ne seront de ce fait pas interrompues. Une fois la nouvelle victime insérée, toutes les interventions suivantes sont décalées à droite (*Shift Right*) d'une durée égale à la durée de la nouvelle intervention insérée.

En reprenant l'exemple ci-dessus dans le cas où $d_6 \geq t_3 - (t_1 + d_1)$, $d_6 \geq t_5 - (t_4 + d_4)$ et $d_6 \geq t_9 - (t_7 + d_7)$, nous calculons les marges libres de chaque salle.

Nous supposons, après calcul, que $\Delta g_1 \geq \Delta g_2$. Ainsi la salle opératoire S_1 possède la plus grande marge libre.

Soit $t_1 \leq dl_6$, $t_1 \geq rv_6$ et $(t_1 + d_1) \geq dl_6 \iff$ insertion de la victime 6 à la date t_1 et décalage à droite des victimes 1 et 3 avec une durée égale à d_6 .

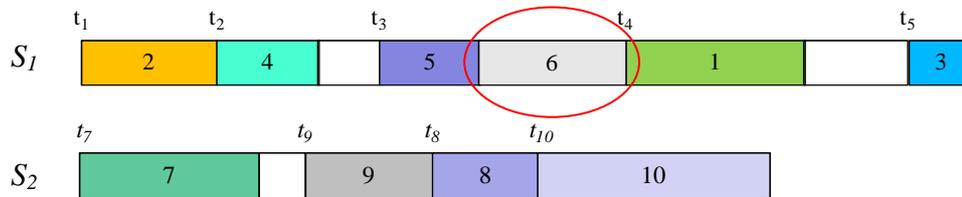


Figure 5.5. Programme opératoire obtenu suite à la résolution de l'algorithme *shift right* (P_2).

Si la nouvelle victime est insérée sans exclure d'autres victimes du programme opératoire, alors l'ordonnancement est terminé. Sinon on revient à l'ordonnancement initial et le programme P_3 réordonne à partir de la date de la perturbation toutes les victimes (y compris la victime à insérer) appartenant à la salle opératoire qui possède la plus grande marge libre Δg_s . Les victimes qui sont déjà prises en charge en salle opératoire ne sont pas réordonnées, leur opération n'est pas interrompue.

Exemple : en calculant les marges libres des deux salles opératoires S_1 et S_2 , nous supposons que nous obtenons : $\Delta g_1 > \Delta g_2$. Ainsi on réordonne les interventions des victimes initialement affectées à S_1 à savoir : 4, 2, 5, 3, 1 ainsi que la nouvelle victime 6.

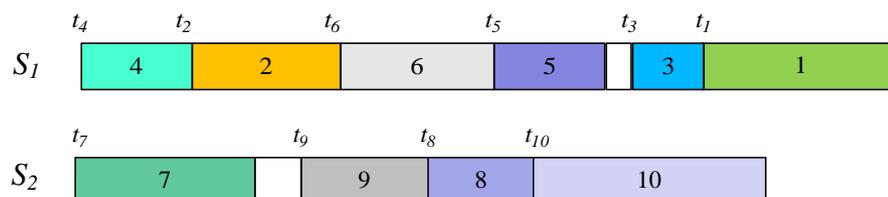


Figure 5.6. Programme opératoire obtenu suite à la résolution du programme P_3 .

Si la nouvelle victime n'est pas toujours insérée, alors toutes les interventions (y compris la victime à insérer) dans toutes les salles opératoires sont réordonnées à partir de la date de la perturbation $t = t_p$ (programme P_4). Les interventions qui sont en cours d'exécution ne seront pas interrompues.

Réordonnement de toutes les interventions dans S_1 et S_2 :

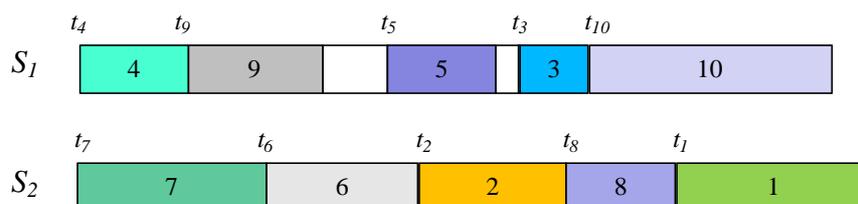


Figure 5.7. Programme opératoire obtenu suite à la résolution du programme P_4 .

Si la victime a été prise en compte dans le programme opératoire, alors c'est la fin de l'algorithme, sinon la victime est orientée vers d'autres établissements de soins.

2.1.2. La modélisation

Avant de présenter les modèles mathématiques des programmes linéaires (P_1), (P_3) et (P_4), ainsi que l'algorithme shift right (P_2), nous définissons les notations suivantes :

Les données

- S Nombre de salles opératoires.
- H Nombre total de chirurgiens.
- T Horizon de l'étude.
- d_i Durée de l'intervention de la victime i .
- dl_i Date limite d'intervention de la victime i .
- rv_i Date d'arrivée de la victime i à l'hôpital.
- rc_h Date d'arrivée du chirurgien h à l'hôpital.

Nous considérons dans cette section, que le nombre de salles est égal au nombre de chirurgiens ($H=S$) et que chaque chirurgien est affecté à une seule salle opératoire ($h = s$). Ainsi les chirurgiens ne sont pas nomades.

A partir des résultats du programme prédictif présenté dans le paragraphe 2 du chapitre 4, nous définissons t_{is} la date de début de l'intervention de la victime i dans la salle opératoire s .

$X_{its} = 1$ si l'intervention de la victime i a débuté à l'instant t dans la salle opératoire s , 0 sinon.

$$t_{is} = t.X_{its}$$

$y_{ijs} = 1$ si l'intervention de la victime j suit l'intervention de la victime i dans la même salle opératoire s , 0 sinon.

t_p Date à laquelle le programme opératoire est perturbé. t_p est généré d'une façon aléatoire.

NR Nombre de victimes à insérer. Dans notre cas où l'insertion se fait par une seule victime à la fois, $NR = 1$.

Variables de décisions

$Z_{kts} = 1$ si l'intervention de la victime k à insérer est affectée à l'instant t à la salle opératoire s , 0 sinon.

Désignons par M un nombre positif très grand et considérons :

t_k Date de début de l'intervention de la victime k .

P_I : Insertion d'une nouvelle victime dans une plage inexploitée

En utilisant les différentes notations décrites ci-dessus, nous proposons le programme linéaire suivant pour une ou plusieurs victimes à insérer dans le programme opératoire :

- La fonction objectif (1) exprime la maximisation du nombre des nouvelles interventions à insérer dans le programme opératoire.

$\text{Maximiser } \sum_k^{NR} \sum_{t_p}^T \sum_s^S Z_{kts}$	(1)
---	-----

- Les contraintes (2) assurent qu'une victime est affectée au plus, une seule fois.

$\sum_{t_p}^T \sum_s^S Z_{kts} \leq 1 \quad \forall k \in \{1..NR\}$	(2)
--	-----

- Les contraintes (3) vérifient que pour chaque plage inexploitée, une victime au plus est affectée à l'instant t .

$\sum_{t=t_{is}+d_i/t \geq t_p}^{t_{js}} Z_{kts} \leq y_{ijs} \quad \forall s \in \{1..S\} \quad \forall i, j \in \{1..N\} \quad \forall k \in \{1..NR\}$	(3)
---	-----

- (4) imposent pour chaque victime à insérer, que la date de prise en charge ne dépasse pas la date limite d'intervention.

$t_k - dl_k \sum_{t_p}^T \sum_s^S Z_{kts} - M(1 - \sum_{t_p}^T \sum_s^S Z_{kts}) \leq 0 \quad \forall k \in \{1..NR\}$	(4)
--	-----

- (5) assurent que la durée opératoire de la victime à insérer est inférieure ou égale à la durée de la plage inexploitée.

$t_{js} y_{ijs} - (t_{is} + d_i) y_{ijs} \geq d_k \sum_{t_p}^T Z_{kts} \quad \forall k \in \{1..NR\} \quad \forall i, j \in \{1..N\} \quad \forall s \in \{1..S\}$	(5)
--	-----

- (6) et (7) vérifient qu'une intervention ne peut avoir lieu que lorsque victime et chirurgien sont présents à l'hôpital.

$t_k + M(1 - \sum_{t_p}^T \sum_s^S Z_{kts}) \geq rv_k \quad \forall k \in \{1..NR\}$	(6)
--	-----

$t_k - rc_s \sum_{t=t_p}^T Z_{kts} - M(1 - \sum_{t=t_p}^T Z_{kts}) \geq 0 \quad \forall k \in \{1..NR\} \quad \forall s \in \{1..S\}$	(7)
---	-----

- (8) vérifient qu'une intervention ne peut être insérée avant la date de la perturbation t_p .

$t_k + M(1 - \sum_{t_p}^T \sum_s^S Z_{kts}) \geq t_p \quad \forall k \in \{1..NR\}$	(8)
---	-----

- Les contraintes (9) assurent que chaque victime k est insérée dans une plage inexploitée.

$(t_{is} + d_i) y_{ijs} \sum_{t_p}^T Z_{kts} \leq t_k \leq t_{js} y_{ijs} \sum_{t_p}^T Z_{kts} \quad \forall k \in \{1..NR\} \quad \forall s \in \{1..S\} \quad \forall i, j \in \{1..N\}$	(9)
--	-----

- Les contraintes (10) retiennent la date de début d'intervention insérée dans le programme. Si une victime ne peut être prise en charge à temps, la date d'intervention est prise égale à la valeur M .

$t_k = \sum_{t_p}^T \sum_s^S t \cdot Z_{kts} + (1 - \sum_{t_p}^T \sum_s^S Z_{kts})M \quad \forall k \in \{1..NR\}$	(10)
--	------

- Les contraintes (11) sont des contraintes d'intégrité

$Z_{kts} = \{0,1\} \quad \forall k \in \{1..NR\} \quad \forall t \in \{t_p..T\} \quad \forall h \in \{1..S\}$	(11)
---	------

Si la victime n'a pas été insérée, nous passons au programme P_2 .

P_2 : Algorithme *shift right*

Avant d'appliquer l'algorithme *shift right*, nous devons calculer la marge libre de chaque salle opératoire Δg_s .

Algorithme *shift right*

1/ Initialisation :

s : salle opératoire qui possède la plus grande marge libre Δg_s .

k : victime à insérer.

I_s : nombre de victimes qui n'ont pas encore été opérées dans la salle opératoire s .

p : entier vide.

2/ Insertion de la victime k :

Pour ($i = 1 ; i < I_s ; i++$)

Si $t_i \leq dl_k$ et $t_i \geq rv_k$ et $(t_i + d_i) \geq dl_k$

Alors

Insérer la victime k à la date t_i ($t_k = t_i$).

$p = i$

Fin Pour

3/ Décaler à droite, à partir de la victime k , toutes les interventions affectées à la salle opératoire s avec une durée égale à d_k :

Pour ($i = p+1 ; i < I_s ; i++$)

$t_i = t_i + d_k$

si $t_i \geq dl_i$

Alors

Retourner à l'ordonnancement initial (P_0) et aller à 4/

Fin Pour

4/ Fin

Si l'algorithme shift right n'arrive pas à insérer la nouvelle victime, nous réordonnons dans ce cas les interventions appartenant à la salle qui possède le plus grand Δg_s .

P_3 : Réordonnement des interventions dans la salle opératoire qui possède la plus grande marge libre

Pour la résolution de ce problème nous devons connaître la date à laquelle la salle opératoire s (chirurgien h) est disponible après la date t_p . A cette date, les interventions en cours d'exécution ne peuvent être interrompues.

Ainsi il est possible de calculer la prochaine date de disponibilité A_s (à partir de la date t_p) de la salle opératoire possédant la plus grande marge Δg_s . La salle s ainsi que le chirurgien h sont connus au préalable.

On désigne par W l'ensemble des victimes en attentes d'une opération chirurgicale (y compris la victime à insérer).

Variables de décision :

$X_{its} = 1$ si l'intervention de la victime i est affectée à l'instant t à la salle opératoire s , 0 sinon.

t_i Date de début de l'intervention de la victime i .

En utilisant les différentes notations décrites ci-dessus, nous proposons le modèle linéaire suivant :

La fonction objectif (12) exprime la maximisation du nombre d'interventions réalisées après la date t_p .

$\text{Maximiser } \sum_i^W \sum_{t=t_p}^T X_{its}$	(12)
---	------

- Les contraintes (13) assurent qu'une victime est affectée au plus, une seule fois.

$\sum_{t=t_p}^T X_{its} \leq 1$	$\forall i \in W$	(13)
---------------------------------	-------------------	------

- Les contraintes (14) vérifient qu'une victime au plus est opérée à l'instant t dans la salle s .

$$\sum_i^W X_{its} \leq 1 \quad \forall t \in \{t_p..T\} \quad (14)$$

- (15) imposent pour chaque victime traitée, que la date de prise en charge ne dépasse pas la date limite d'intervention

$$t_i - dl_i \sum_{t=t_p}^T X_{its} - M (1 - \sum_{t=t_p}^T X_{its}) \leq 0 \quad \forall i \in W \quad (15)$$

- (16) et (17) vérifient qu'une intervention ne peut avoir lieu que lorsque victime et chirurgien sont présents à l'hôpital.

$$t_i + M (1 - \sum_{t=t_p}^T X_{its}) \geq rv_i \quad \forall i \in W \quad (16)$$

$$t_i - rc_s \sum_{t=t_p}^T X_{its} - M (1 - \sum_{t=t_p}^T X_{its}) \geq 0 \quad \forall i \in W \quad (17)$$

- Les contraintes (18) vérifient la disponibilité de la salle opératoire s après la perturbation.

$$t_i \geq A_s \cdot X_{its} - M (1 - \sum_{t=t_p}^T X_{its}) \quad \forall i \in W \quad (18)$$

- Les contraintes (19a), (19b) et (20) permettent de mettre $y_{ijs} = 1$ chaque fois que l'intervention j est effectuée à la suite de i .

$$\sum_{j \neq i}^W y_{ijs} \leq 1 \quad \forall i \in W \quad (19a)$$

$$\sum_{j \neq i}^W y_{jis} \leq 1 \quad \forall i \in W \quad (19b)$$

$$\sum_i^W \sum_{j \neq i}^W y_{jis} = \sum_i^W \sum_{t=t_p}^T X_{its} - 1 \quad \forall s \quad (20)$$

Les contraintes (21) retiennent la date de début d'intervention concernant chacune des victimes traitées. Si une victime ne peut être prise en charge à temps, la date d'intervention est prise égale à la valeur M .

$$t_i = \sum_{t_p}^T t \cdot X_{its} + (1 - \sum_{t_p}^T t \cdot X_{its})M \quad \forall i \in W \quad (21)$$

- Les contraintes (22) permettent de laisser un temps suffisant à un chirurgien pour réaliser deux opérations consécutives i et j .

$$t_j \geq t_i + y_{ijs} d_i - M (1 - y_{ijs}) \quad \forall i, j \in W \quad (22)$$

- Les contraintes (23) et (24) sont des contraintes d'intégrité

$$X_{its} = \{0,1\} \quad \forall i \in W \quad \forall t \in \{t_p..T\} \quad (23)$$

$$y_{ijs} = \{0,1\} \quad \forall i, j \in W \quad (24)$$

Si le réordonnancement des interventions dans une salle opératoire ne suffit pas pour insérer la victime, nous proposons dans ce cas de réordonner, à partir de la date de la perturbation, les interventions dans toutes les salles opératoires.

P_4 : Réordonnancement de toutes les interventions dans toutes les salles opératoires.

Comme pour le programme P_3 , pour la résolution de ce problème nous devons connaître la date à laquelle chaque salle opératoire (chirurgien) est disponible après la date t_p . Soit A_s la date de disponibilité de la salle opératoire s calculée à l'instant t_p .

W Ensemble de victimes en attentes (y compris la victime à insérer).

Nous proposons le modèle linéaire suivant :

La fonction objectif (25) exprime la maximisation du nombre d'interventions réalisées après la date t_p .

$$\text{Maximiser } \sum_i^W \sum_{t=t_p}^T \sum_s^S X_{its} \quad (25)$$

- Les contraintes (26) assurent qu'une victime est affectée au plus, une seule fois.

$$\sum_{t=t_p}^T \sum_s^S X_{its} \leq 1 \quad \forall i \in W \quad (26)$$

- Les contraintes (27) vérifient que pour chaque salle opératoire s , une victime au plus est opérée à l'instant t .

$\sum_i^W X_{its} \leq 1$	$\forall t \in \{t_p..T\} \quad \forall s \in \{1..S\}$	(27)
---------------------------	---	------

- (28) imposent pour chaque victime traitée, que la date de prise en charge ne dépasse pas sa date limite d'intervention

$t_i - dl_i \sum_{t=t_p}^T \sum_s^S X_{its} - M (1 - \sum_{t=t_p}^T \sum_s^S X_{its}) \leq 0$	$\forall i \in W$	(28)
---	-------------------	------

- (29) et (30) vérifient qu'une intervention ne peut avoir lieu que lorsque victime et chirurgien sont présents à l'hôpital.

$t_i + M (1 - \sum_{t_p}^T \sum_s^S X_{its}) \geq rv_i$	$\forall i \in W$	(29)
---	-------------------	------

$t_i - rc_s \sum_{t=t_p}^T X_{its} - M (1 - \sum_{t=t_p}^T X_{its}) \geq 0$	$\forall i \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(30)
---	--	------

- Les contraintes (31) assurent la disponibilité des chirurgiens après la date de la perturbation.

$t_i \geq A_s \cdot X_{its} - M (1 - \sum_{t_p}^T \sum_s^S X_{its})$	$\forall i \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(31)
--	--	------

- Les contraintes (32a), (32b) et (33) permettent de mettre $y_{ijs}=1$ chaque fois que l'intervention j est effectuée à la suite de i dans la même salle opératoire s .

$\sum_{j \neq i}^W y_{ijs} \leq 1$	$\forall i \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(32a)
------------------------------------	--	-------

$\sum_{j \neq i}^W y_{jis} \leq 1$	$\forall i \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(32b)
------------------------------------	--	-------

$\sum_i^W \sum_{j \neq i}^W y_{jis} = \sum_i^W \sum_{t=t_p}^T X_{its} - 1$	$\forall s \in \{1..S\}$	(33)
--	--------------------------	------

Les contraintes (34) retiennent la date de début d'intervention concernant chacune des victimes traitées. Si une victime ne peut être prise en charge à temps, la date d'intervention est prise égale à la valeur M .

$t_i = \sum_{t_p}^T \sum_s^S t \cdot X_{its} + (1 - \sum_{t_p}^T \sum_s^S t \cdot X_{its})M \quad \forall i \in W$	(34)
--	------

- Les contraintes (35) permettent de laisser un temps suffisant à un chirurgien de réaliser deux opérations consécutives i et j .

$t_j \geq t_i + y_{ijs} d_i - M (1 - y_{ijs}) \quad \forall i, j \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(35)
--	------

- Les contraintes (36) et (37) sont des contraintes d'intégrité.

$X_{its} = \{0,1\} \quad \forall i \in W \quad \forall t \in \{t_p..T\} \quad \forall s \in \{1..S\}$	(36)
---	------

$y_{ijs} = \{0,1\} \quad \forall i, j \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(37)
---	------

Nous présentons dans le paragraphe 3.2.1, les résultats relatifs à cette heuristique d'insertion d'une nouvelle victime, tout en détaillant ceux obtenus par chaque programme.

2.2. Evolution de degrés d'urgences

En cas de catastrophe, les victimes en attente ou en cours de transfert à l'hôpital d'accueil peuvent voir leur état se dégrader ou encore s'améliorer, réduisant ou rallongeant leur date limite d'intervention et ou la durée de cette intervention.

Dans le cas où l'état d'une victime se dégrade, le problème se ramène à un problème d'insertion d'une nouvelle victime. En effet, il s'agit de supprimer du programme opératoire la victime dont l'état s'est dégradé et de l'insérer à nouveau en fonction de ses nouveaux paramètres (date limite et durée d'intervention).

Ainsi, nous appliquons la même approche de résolution adoptée dans le paragraphe 2.1 (l'arrivée d'une nouvelle victime à l'hôpital d'accueil).

Si l'algorithme n'arrive pas à insérer la victime dont l'état s'est dégradé, l'hôpital peut décider de l'insérer à la place d'une victime dont l'état est moins critique capable de supporter un transfert vers un autre hôpital.

Une victime, qui passe d'un état d'urgence relative ou absolue à un état d'urgence dépassée ne peut plus être prise en charge sur le plan médical avec des chances raisonnables de réussite d'une part et ceci sans risques majeurs pour les autres victimes qui peuvent encore être sauvées d'autre part. Dans ce cas cette victime n'est plus affectée et donc n'est plus prise en compte dans le programme opératoire. Si une victime voit son état s'améliorer cela n'entraîne aucune contrainte supplémentaire. Dans ce cas, l'ordonnancement n'est pas modifié.

Ces deux derniers cas libèrent des ressources qui devaient être affectées ou augmente les degrés de liberté de l'ordonnancement qui devient de ce fait plus apte à absorber des nouvelles perturbations.

Suite à des complications pouvant survenir au cours du processus chirurgical, l'intervention peut dépasser la durée opératoire estimée (sous-estimation des durées opératoires). Cette situation est sujette à entrainer une perturbation de l'exécution du programme en cours.

2.3. Sous-estimation ou sur-estimation des durées opératoires

2.3.2. L'algorithme de résolution

Nous présentons dans la figure 5.8, l'approche réactive proposée dans le cas d'une durée opératoire sous-estimée.

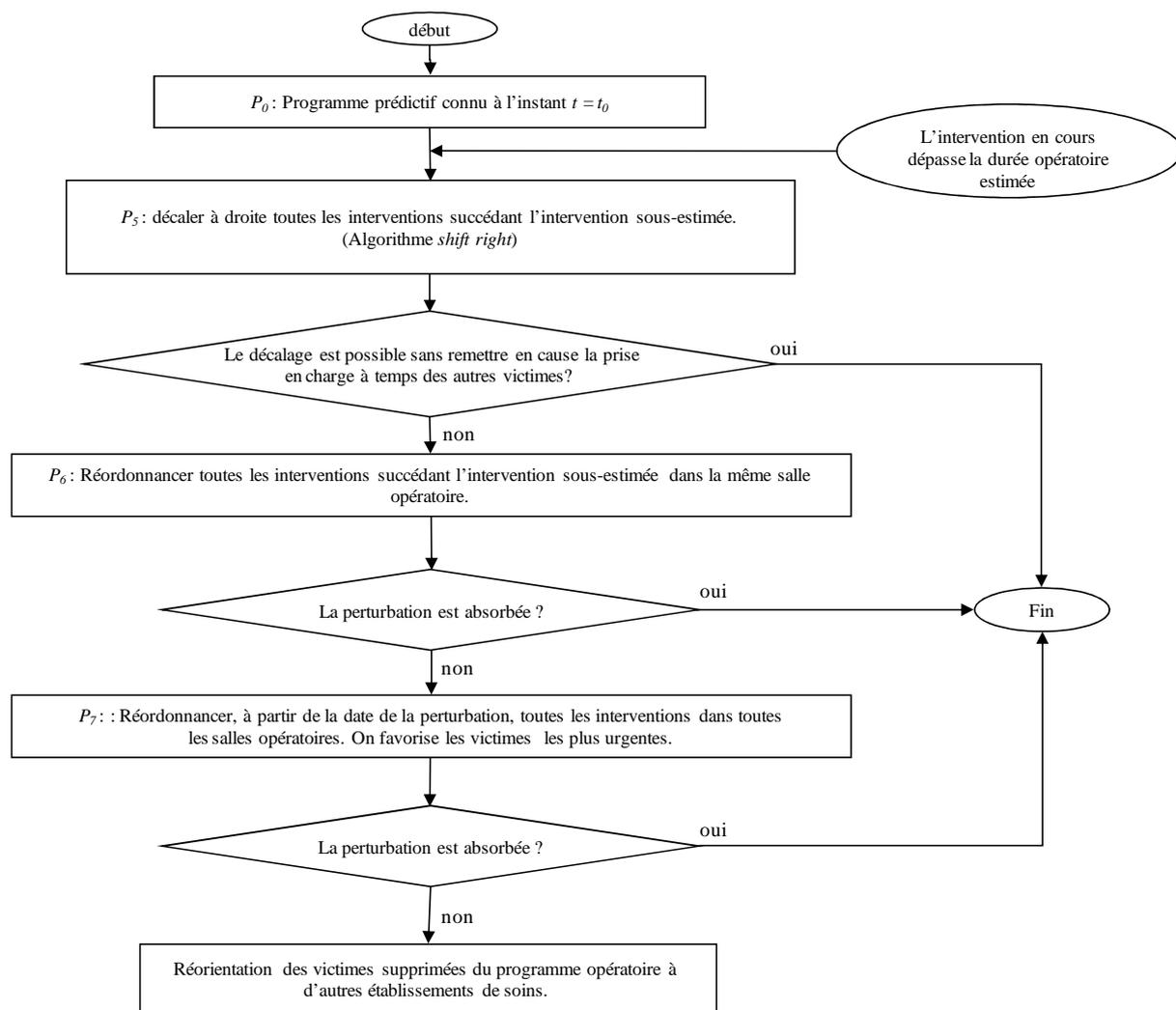


Figure 5.8. Algorithme de résolution réactif dans le cas d'une durée opératoire sous-estimée.

Pour résoudre ce problème, nous appliquons en premier lieu l'algorithme *shift right* afin de pouvoir décaler à droite toutes les interventions succédant l'intervention sous-estimée. La durée du décalage est prise égale au retard enregistré.

Si l'algorithme *shift right* ne permet pas de résoudre le problème posé par l'arrivée de cette perturbation, suite à une (ou plusieurs) victimes qui ne peut (peuvent) être traitée(s) dans les délais, P_6 tente de réordonnancer toutes les interventions qui succèdent l'intervention sous-estimée et qui sont affectées à la même salle opératoire.

Si le problème ne peut toujours pas être résolu de cette manière, le programme P_7 réordonne toutes les interventions dans toutes les salles opératoires en accordant la priorité aux interventions les plus urgentes.

Dans le cas où P_7 n'arrive pas traiter toutes les victimes, celles les moins urgentes seront orientées vers d'autres établissement de soins. En effet, ces victimes ont une date limite d'intervention plus large ce qui augmente la chance de les traiter à temps.

2.3.2. La modélisation

Notations :

- S Nombre de salles opératoires.
- H Nombre total de chirurgiens.
- T Horizon de l'étude.
- d_i Durée de l'intervention de la victime i .
- dl_i Date limite d'intervention de la victime i .
- rv_i Date d'arrivée de la victime i à l'hôpital.
- rc_h Date d'arrivée du chirurgien h à l'hôpital.
- A_s Prochaine date de disponibilité de la salle s à partir de la date t_p
- W Ensemble de victimes en attentes d'une opération chirurgicale.

La salle opératoire s est la salle dans laquelle une durée opératoire dépasse la durée estimée.

Variables de décisions

$X_{its} = 1$ si l'intervention de la victime i est affectée à l'instant t à la salle opératoire s , 0 sinon.

t_i Date de début de l'intervention de la victime i .

P_5 : Algorithme de *shift right*

Ce programme est déclenché après que le retard ait été estimé au cours du processus chirurgical de l'intervention en question.

Algorithme *shift right*

1/ Initialisation :

s : salle opératoire qui a connu le problème de sous-estimation d'une intervention

k : intervention sous-estimée.

I_s : nombre de victimes qui n'ont pas encore été opérées dans la salle opératoire s .

2/ Décaler à droite, à partir de la victime k , toutes les interventions affectées à la salle opératoire s avec une durée égale au retard estimé R :

R = le temps réellement passé dans l'intervention – le temps estimé (d_k).

Pour ($i = k+1$; $i < I_s$; $i++$)

$$t_i = t_i + R$$

$$\text{si } t_i \geq dl_i$$

Alors

Retourner à l'ordonnancement initial (P_0) et aller à 3/

Fin Pour

3/ Fin

Si l'algorithme *shift right* n'arrive pas à traiter le retard estimé, nous essayons de résoudre le problème par le programme P_6 .

P_6 : Réordonnancement de toutes les interventions succédant l'intervention sous-estimée dans la même salle opératoire.

Pour la résolution de ce problème nous devons connaître la date à partir de laquelle la salle opératoire s est disponible après l'intervention sous-estimée (ou après la date t_p).

Variables de décision :

$X_{its} = 1$ si l'intervention de la victime i est affectée à l'instant t à la salle opératoire s , 0 sinon.

t_i Date de début de l'intervention de la victime i .

La fonction objectif (38) exprime la maximisation du nombre d'interventions réalisées après l'intervention sous-estimée (après la date de la perturbation t_p).

$\text{Maximiser } \sum_i^W \sum_{t=t_p}^T X_{its}$	(38)
---	------

- Les contraintes (39) assurent qu'une victime est affectée au plus, une seule fois.

$\sum_{t=t_p}^T X_{its} \leq 1 \quad \forall i \in W$	(39)
---	------

- Les contraintes (40) vérifient qu'une victime au plus est opérée à l'instant t .

$\sum_i^W X_{its} \leq 1 \quad \forall t \in \{t_p..T\}$	(40)
--	------

- (41) imposent pour chaque victime traitée, que la date de prise en charge ne dépasse pas la date limite d'intervention.

$t_i - dl_i \sum_{t=t_p}^T X_{its} - M (1 - \sum_{t=t_p}^T X_{its}) \leq 0 \quad \forall i \in W$	(41)
---	------

- (42) et (43) vérifient qu'une intervention ne peut avoir lieu que lorsque victime et chirurgien sont présents à l'hôpital.

$t_i + M (1 - \sum_{t_p}^T X_{its}) \geq rv_i \quad \forall i \in W$	(42)
--	------

$t_i - rc_s \sum_{t=t_p}^T X_{its} - M (1 - \sum_{t=t_p}^T X_{its}) \geq 0 \quad \forall i \in W$	(43)
---	------

- Les contraintes (44) vérifient la disponibilité de la salle opératoire s après la perturbation.

$t_i \geq A_s \cdot X_{its} - M (1 - \sum_{t_p}^T X_{its}) \quad \forall i \in W$	(44)
---	------

- Les contraintes (45a), (45b) et (46) permettent de mettre $y_{ijs} = 1$ chaque fois que l'intervention j est effectuée à la suite de i .

$\sum_{j \neq i}^W y_{ijs} \leq 1 \quad \forall i \in W$	(45a)
--	-------

$\sum_{j \neq i}^W y_{jis} \leq 1 \quad \forall i \in W$	(45b)
--	-------

$\sum_i^W \sum_{j \neq i}^W y_{jis} = \sum_i^W \sum_{t=t_p}^T X_{its} - 1 \quad \forall s$	(46)
--	------

- Les contraintes (47) retiennent la date de début d'intervention concernant chacune des victimes traitées. Si une victime ne peut être prise en charge à temps, la date d'intervention est prise égale à la valeur M .

$t_i = \sum_i^W t.X_{its} + (1 - \sum_i^W t.X_{its})M \quad \forall i \in W$	(47)
--	------

- Les contraintes (48) permettent de laisser un temps suffisant à un chirurgien de réaliser deux opérations consécutives i et j .

$t_j \geq t_i + y_{ijs} d_i - M (1 - y_{ijs}) \quad \forall i, j \in W$	(48)
---	------

- Les contraintes (49) et (50) sont des contraintes d'intégrité

$X_{its} = \{0,1\} \quad \forall i \in W \quad \forall t \in \{t_p..T\}$	(49)
--	------

$y_{ijs} = \{0,1\} \quad \forall i, j \in W$	(50)
--	------

Si le programme P_6 n'arrive pas à traiter le retard estimé, nous essayons de résoudre le problème par le programme P_7 en réordonnant toutes les interventions après la date t_p .

P_7 : Réordonnement, à partir de la date de la perturbation, de toutes les interventions postérieures à la perturbation dans toutes les salles opératoires.

W Ensemble de victimes en attentes d'une opération chirurgicale au niveau de toutes les salles opératoires.

- La fonction objectif (51) exprime la maximisation du nombre d'interventions réalisées après la date t_p en accordant la priorité aux interventions les plus urgentes.

$\text{Maximiser } \sum_i^W \sum_{t=t_p}^T \sum_s^S dt^{-1} . X_{its}$	(51)
--	------

- Les contraintes (52) assurent qu'une victime est affectée au plus, une seule fois.

$\sum_{t=t_p}^T \sum_s^S X_{its} \leq 1 \quad \forall i \in W$	(52)
--	------

- Les contraintes (53) vérifient que pour chaque salle opératoire s , une victime au plus est opérée à l'instant t .

$\sum_i^W X_{its} \leq 1$	$\forall t \in \{t_p..T\} \quad \forall s \in \{1..S\}$	(53)
---------------------------	---	------

- (54) imposent pour chaque victime traitée, que la date de prise en charge ne dépasse pas la date limite d'intervention.

$t_i - dl_i \sum_{t=t_p}^T \sum_s^S X_{its} - M (1 - \sum_{t=t_p}^T \sum_s^S X_{its}) \leq 0$	$\forall i \in W$	(54)
---	-------------------	------

- (55) et (56) vérifient qu'une intervention ne peut avoir lieu que lorsque victime et chirurgien sont présents à l'hôpital.

$t_i + M (1 - \sum_{t_p}^T \sum_s^S X_{its}) \geq rv_i$	$\forall i \in W$	(55)
---	-------------------	------

$t_i - rc_s \sum_{t=t_p}^T X_{its} - M (1 - \sum_{t=t_p}^T X_{its}) \geq 0$	$\forall i \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(56)
---	--	------

- Les contraintes (57) assurent la disponibilité des chirurgiens après la date de la perturbation.

$t_i \geq A_s \cdot X_{its} - M (1 - \sum_{t_p}^T \sum_s^S X_{its})$	$\forall i \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(57)
--	--	------

- Les contraintes (58a), (58b) et (59) permettent de mettre $y_{ijs}=1$ chaque fois que l'intervention j est effectuée à la suite de i dans la même salle opératoire s .

$\sum_{j \neq i}^W y_{ijs} \leq 1$	$\forall i \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(58a)
------------------------------------	--	-------

$\sum_{j \neq i}^W y_{jis} \leq 1$	$\forall i \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(58b)
------------------------------------	--	-------

$\sum_i^W \sum_{j \neq i}^W y_{jis} = \sum_i^W \sum_{t=t_p}^T X_{its} - 1$	$\forall s \in \{1..S\}$	(59)
--	--------------------------	------

Les contraintes (60) retiennent la date de début d'intervention concernant chacune des victimes traitées. Si une victime ne peut être prise en charge à temps, la date d'intervention est prise égale à la valeur M .

$t_i = \sum_i^W \sum_s^S t.X_{its} + (1 - \sum_i^W \sum_s^S t.X_{its})M \quad \forall i \in W$	(60)
--	------

- Les contraintes (61) permettent de laisser un temps suffisant à un chirurgien de réaliser deux opérations consécutives i et j .

$t_j \geq t_i + y_{ijs} d_i - M (1 - y_{ijs}) \quad \forall i, j \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(61)
--	------

- Les contraintes (62) et (63) sont des contraintes d'intégrité.

$X_{its} = \{0,1\} \quad \forall i \in W \quad \forall t \in \{t_p..T\} \quad \forall s \in \{1..S\}$	(62)
---	------

$y_{ijs} = \{0,1\} \quad \forall i, j \in W \quad \forall s \in \{1..S\}$	(63)
---	------

Dans le cas d'une sur-estimation d'une durée opératoire, cela n'ajoute aucune contrainte supplémentaire. Le programme opératoire restera dans ce cas inchangé. Nous présentons dans ce qui suit les résultats obtenus par l'heuristique. Nous détaillons entre autre les résultats de chaque programme et heuristique de résolution.

3- Expérimentation et analyse des résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus par l'approche réactive. Ces résultats ont été obtenus en utilisant le solveur Cplex solver 10.1 sur une machine Bixeon® de processeur 3.00 GHz et 4 Go de RAM.

3.1. Les scénarios

La prise en considération d'un ensemble de scénarios est une manière de prendre en compte l'incertain (Hammami, 2004).

Les scénarios, que nous adoptons, sont basés sur les résultats des problèmes tests considérés dans le paragraphe 2 du chapitre 4. A cause du nombre de scénarios (50 scénarios) considérés par chaque instance, nous retenons pour chaque taille du problème (25, 50 et 70)

trois instances qui diffèrent entre elles par le nombre de salles opératoires et les dates de disponibilité des chirurgiens. Ces instances sont reportées dans le tableau 5.2.

<i>N</i>	<i>Instances</i>
25	<i>P25.4.R₁</i>
	<i>P25.6.R₃</i>
	<i>P25.6.R₅</i>
50	<i>P50.4.R₁</i>
	<i>P50.6.R₃</i>
	<i>P50.8.R₃</i>
70	<i>P70.4.R₁</i>
	<i>P70.6.R₃</i>
	<i>P70.10.R₃</i>

Tableau 5.2. Les instances retenues

Le programme prédictif P_0 correspondant à chacune des instances, est généré dans le paragraphe 2 du chapitre 4.

Pour chacune des instances, nous considérons 50 scénarios partagés comme suit : (1) 20 scénarios dans lesquels une nouvelle victime arrive (orientée ou pas par le PMA) à l'hôpital d'accueil, (2) 20 scénarios dans lesquels l'état d'une victime se dégrade (traduit par le décroissement de la date limite d'intervention dl_i), et (3) 10 scénarios dans lesquels une intervention dépasse la durée opératoire estimée.

Les paramètres que nous modifions par type de perturbation sont donnés dans le tableau 5.3.

<i>Types de perturbation</i>	<i>Paramètres</i>
<i>Nouvelle victime à insérer dans le programme opératoire</i>	Date d'arrivée rv_i Date limite d'intervention dl_i Durée opératoire d_i Date de la perturbation t_p
<i>Dégradation de l'état d'une victime</i>	Date limite d'intervention dl_i Date de la perturbation t_p
<i>Sous estimation d'une durée opératoire</i>	Durée opératoire d_i (suite à un retard R)

Tableau 5.3. Paramètres modifiés par type de perturbation

Les indicateurs que nous étudions sur l'ensemble des scénarios sont les suivants : le taux de prise en charge des nouvelles victimes arrivées à l'hôpital d'accueil ($V.I$ (%)), le taux de prise en charge des victimes dont l'état s'est dégradé ($V.D$ (%)) et le taux des victimes traitées dans le cas où une durée opératoire dépasse la durée estimée ($V.S$ (%)).

$V.I(\%) = \frac{\sum_j \text{Victimes } j \text{ insérées}}{\sum_i \text{Victimes } i \text{ à insérer}}$	(V)
--	-----

$V.D(\%) = \frac{\sum_j \text{Victimes } j \text{ prises en charge}}{\sum_i \text{Victimes } i \text{ dont l'état s'est dégradé}}$	(VI)
--	------

$V.S(\%) = \frac{\sum_j \text{Victimes } j \text{ traitées}}{\sum_i \text{Victimes } i \text{ programmées}}$	(VII)
--	-------

Nous calculons aussi, le pourcentage des cas pour lesquels les perturbations sont traitées et résolues par le programme P_k . $V.I.Pk$ (%) dans le cas de l'insertion d'une nouvelle victime, $V.D.Pk$ (%) dans le cas de dégradation d'un état d'une victime et $V.S.Pk$ (%) dans le cas où une intervention dépasse la durée opératoire estimée.

$V.I.Pk(\%) = \frac{\sum_j \text{Victimes } j \text{ insérées par le programme } p_k}{\sum_i \text{Victimes } i}$	(VIII)
---	--------

$V.D.Pk(\%) = \frac{\sum_j \text{Victimes } j \text{ prises en compte par le programme } p_k}{\sum_i \text{Victimes } i}$	(IX)
---	------

$V.S.Pk(\%) = \frac{\sum_j \text{Victimes } j \text{ traitées par le programme } p_k}{\sum_i \text{Victimes } i}$	(X)
---	-----

Nous présentons dans l'annexe 3 les différents scénarios. Ils sont générés d'une façon aléatoire du fait de l'impossibilité d'obtenir des informations réelles qui pourraient provenir des bases de données hospitalières. On désigne par Sc_j le scénario numéro j .

Le tableau 5.4 présente un exemple de 50 scénarios appliqués à l'instance $P25.4.R_1$.

P25.4.R₁

scénarios	Nouvelle victime à insérer				scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire	
	rv_i	dl_i	d_i	t_p		i	dl_i	t_p		i	d_i
<i>Sc1</i>	420	660	30	420	<i>Sc21</i>	2	210	60	<i>Sc41</i>	5	150
<i>Sc2</i>	90	600	30	30	<i>Sc22</i>	3	300	120	<i>Sc42</i>	8	120
<i>Sc3</i>	180	360	90	60	<i>Sc23</i>	5	450	300	<i>Sc43</i>	12	180
<i>Sc4</i>	150	600	30	30	<i>Sc24</i>	8	570	450	<i>Sc44</i>	15	150
<i>Sc5</i>	60	180	90	60	<i>Sc25</i>	10	270	210	<i>Sc45</i>	16	90
<i>Sc6</i>	60	420	30	30	<i>Sc26</i>	12	480	270	<i>Sc46</i>	20	90
<i>Sc7</i>	60	150	30	30	<i>Sc27</i>	15	510	330	<i>Sc47</i>	30	120
<i>Sc8</i>	30	540	60	30	<i>Sc28</i>	16	450	120	<i>Sc48</i>	41	120
<i>Sc9</i>	60	600	30	30	<i>Sc29</i>	30	450	60	<i>Sc49</i>	43	120
<i>Sc10</i>	150	480	90	150	<i>Sc30</i>	35	450	120	<i>Sc50</i>	46	150
<i>Sc11</i>	150	330	120	60	<i>Sc31</i>	37	180	30			
<i>Sc12</i>	120	270	150	120	<i>Sc32</i>	39	330	120			
<i>Sc13</i>	60	270	30	30	<i>Sc33</i>	43	300	30			
<i>Sc14</i>	300	420	60	240	<i>Sc34</i>	46	510	90			
<i>Sc15</i>	120	510	90	60	<i>Sc35</i>	48	270	90			
<i>Sc16</i>	420	60	120	330	<i>Sc36</i>	50	330	150			
<i>Sc17</i>	120	600	30	30	<i>Sc37</i>	52	360	240			
<i>Sc18</i>	210	120	90	180	<i>Sc38</i>	54	450	120			
<i>Sc19</i>	150	330	60	30	<i>Sc39</i>	58	270	120			
<i>Sc20</i>	210	270	150	210	<i>Sc40</i>	68	360	90			

Tableau 5.4. Exemple de 50 scénarios appliqués à l'instance $P25.4.R_1$

3.2. Les résultats

Dans les 450 cas étudiés, nous arrivons à absorber les différentes perturbations dans 63% des cas. Remarquons que la solution optimale est obtenue au minimum au bout de 26 secondes et au maximum au bout de 21 minutes.

Nous présentons ci-dessous un tableau de synthèse des instances testées selon plusieurs scénarios. Le détail des résultats est reporté dans l'annexe 4.

3.2.4. Insertion d'une nouvelle victime

Pour chacune des instances, nous indiquons : le pourcentage des cas où on arrive à insérer les nouvelles victimes dans les programmes opératoires ($V.I.(\%)$), le pourcentage des cas pour lesquels les victimes sont insérées par le programme P_1 ($V.I.P1(\%)$), le pourcentage des cas pour lesquels les victimes sont insérées par l'algorithme P_2 ($V.I.P2(\%)$), le pourcentage des cas pour lesquels les victimes sont insérées par le programme P_3 ($V.I.P3(\%)$), le pourcentage des cas pour lesquels les victimes sont insérées par le programme P_4 ($V.I.P4(\%)$), le temps de calcul minimal en secondes ($Tmin (s)$) et le temps de calcul maximal en secondes ($Tmax (s)$).

Nous rappelons que P_1 est le programme d'insertion d'une nouvelle victime dans les plages inexploitées. P_2 est l'heuristique *shift right*. P_3 est le programme de réordonnancement des interventions dans la salle opératoire qui possède la plus grande marge Δg_s . P_4 est le programme de réordonnancement de toutes les interventions dans toutes les salles opératoires. Nous reprenons le taux d'occupation des salles opératoires ($TO(\%)$) calculé dans le chapitre 4:

Instances	V.I (%)	V.I.P1 (%)	V.I.P2 (%)	V.I.P3 (%)	V.I.P4 (%)	Temps de calcul		TO (%)
						Tmin (s)	Tmax (s)	
<i>P25.4.R₁</i>	25	5	0	10	10	26	295	81.25
<i>P25.6.R₃</i>	85	10	5	35	30	47	352	53.17
<i>P25.6.R₅</i>	80	10	5	40	25	43	281	53.33
<i>P50.4.R₁</i>	10	0	0	0	10	524	682	94.82
<i>P50.6.R₃</i>	25	0	0	0	25	609	752	78.73
<i>P50.8.R₃</i>	90	15	10	40	25	43	350	63.79
<i>P70.4.R₁</i>	15	0	0	0	15	869	973	98.30
<i>P70.6.R₃</i>	35	0	0	5	30	826	1239	85.55
<i>P70.10.R₃</i>	70	5	0	25	40	76	1120	59.41
Moyenne	48	5	2	17	23	340	672	

Tableau 5.5. Résultats numériques pour le cas d'insertion d'une nouvelle victime

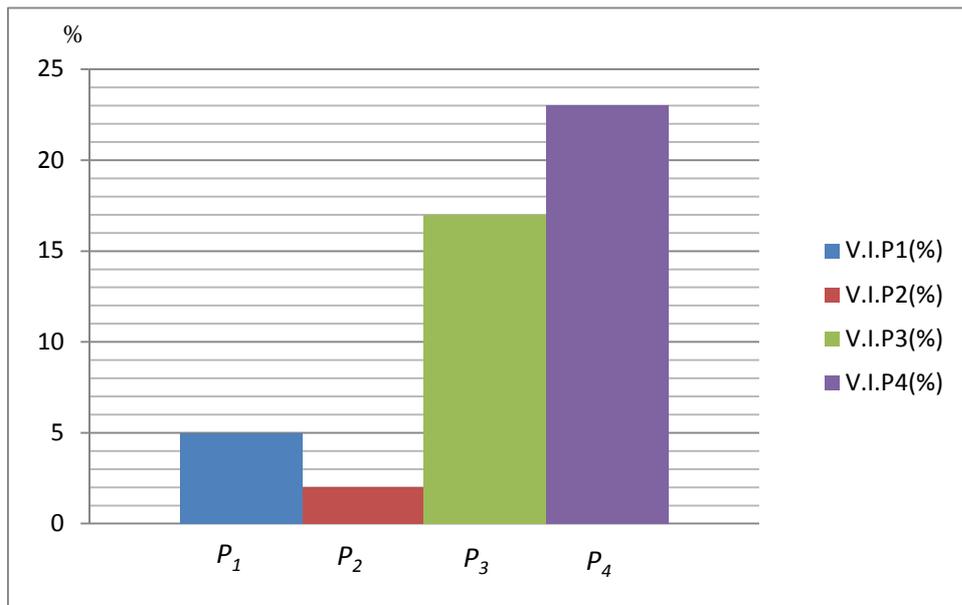


Figure 5.9. Pourcentage des cas traités par programme de résolution.

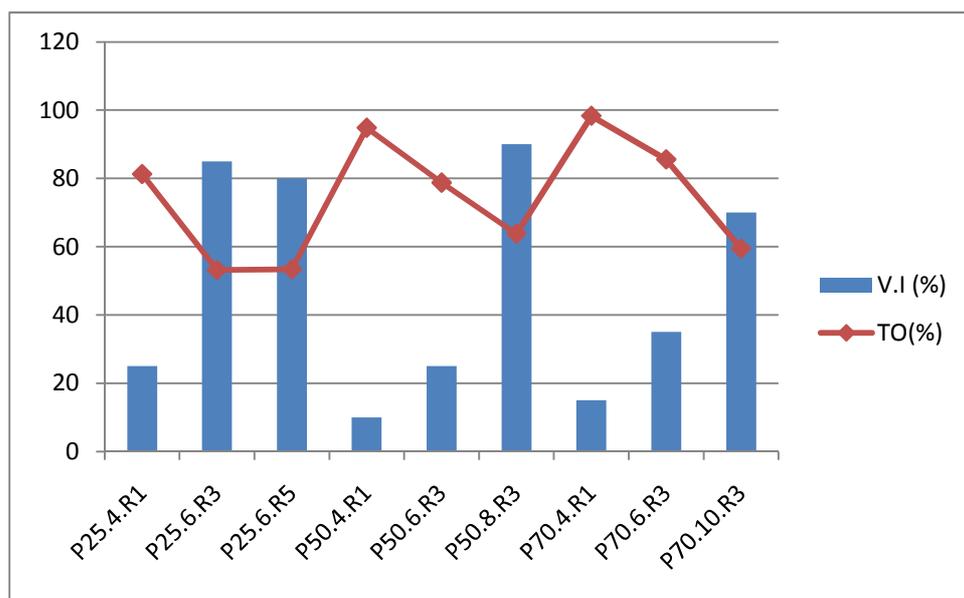


Figure 5.10. Pourcentage des cas traités par instance

Nous avons réussi à insérer les nouvelles victimes dans 48 % des cas (Tableau 5.5). Nous distinguons que le taux d'insertion des victimes varie en fonction du taux d'exploitation des salles opératoires ($TO(\%)$) (exemple : $V.I(\%) = 25\%$ pour $TO(\%) = 81.25$ ($P25.4.R1$) contre $V.I(\%) = 85\%$ pour $TO(\%) = 53.17$ ($P25.6.R3$)). En analysant la figure 5.9, nous remarquons que dans la plupart des problèmes, les victimes sont insérées en réordonnant, après la date t_p , toutes les interventions dans toutes les salles opératoires ($V.I.P4(\%) = 23$). Le programme P_3 arrive à résoudre 17% des cas, contre uniquement 5% pour le programme P_1 et 2% pour le programme P_2 . En effet, ce dernier provoque une augmentation de la date de début des interventions succédant la victime insérée. Ce qui génère, dans la plupart des cas, le dépassement d'au moins une date limite d'intervention. Les quelques cas où le programme P_1 arrive à insérer une victime, celle-ci l'est au niveau des salles qui possèdent un assez faible taux d'occupation. Nous prenons à titre d'exemple l'instance $P50.8.R3$, $V.I.P1(\%) = 15\%$ pour un $TO(\%) = 63.79$. En effet, il n'est pas aussi évident d'insérer une victime dans une plage inexploitée. Il faut que les contraintes de l'intervention de la victime en question correspondent à la durée et les dates de la plage inexploitée.

Sur l'ensemble des instances de même taille, le renforcement de la capacité (où le taux d'occupation est faible) permet de mieux absorber les perturbations (figure 5.10).

3.2.5. Evolution d'un degré d'urgence

Pour chacune des instances, nous indiquons : le pourcentage des cas où on arrive à prendre en charge les victimes dont l'état s'est dégradé ($V.D.(%)$), le pourcentage des cas pour lesquels les victimes sont traitées par le programme P_1 ($V.D.P1(%)$), le pourcentage des cas pour lesquels les victimes sont traitées par l'algorithme P_2 ($V.D.P2(%)$), le pourcentage des cas pour lesquels les victimes sont traitées par l'algorithme P_3 ($V.D.P3(%)$), le pourcentage des cas pour lesquels les victimes sont traitées par le programme P_4 ($V.D.P4(%)$), le temps de calcul minimal en secondes ($Tmin$ (s)) et le temps de calcul maximal en secondes ($Tmax$ (s)).

Instances	V.D (%)	V.D.P1(%)	V.D.P2(%)	V.D.P3(%)	V.D.P4(%)	Temps de calcul		TO(%)
						Tmin (s)	Tmax (s)	
$P25.4.R_1$	60	0	0	15	45	41	752	81.25
$P25.6.R_3$	100	5	0	45	50	56	425	53.17
$P25.6.R_5$	100	5	0	45	50	116	786	53.33
$P50.4.R_1$	45	0	0	10	35	204	851	94.82
$P50.6.R_3$	40	0	0	15	25	324	854	78.73
$P50.8.R_3$	85	0	0	35	45	107	293	63.79
$P70.4.R_1$	60	0	0	20	40	690	1158	98.30
$P70.6.R_3$	65	0	0	20	45	462	1267	85.55
$P70.10.R_3$	85	5	0	40	40	179	1143	59.41
Moyenne	71	2	0	27	42	242	837	

Tableau 5.6. Résultats numériques pour le cas d'évolution d'un degré d'urgence.

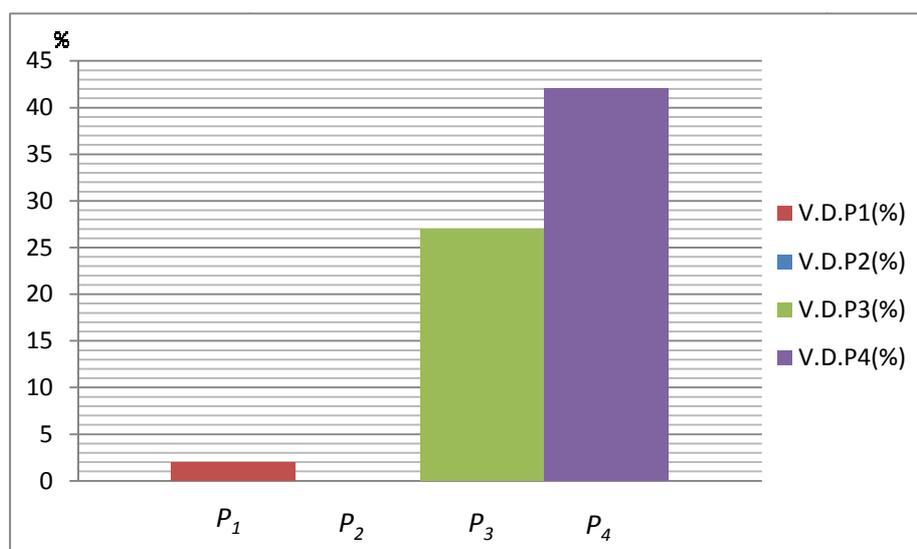


Figure 5.11. Pourcentage des cas traités par programme de résolution.

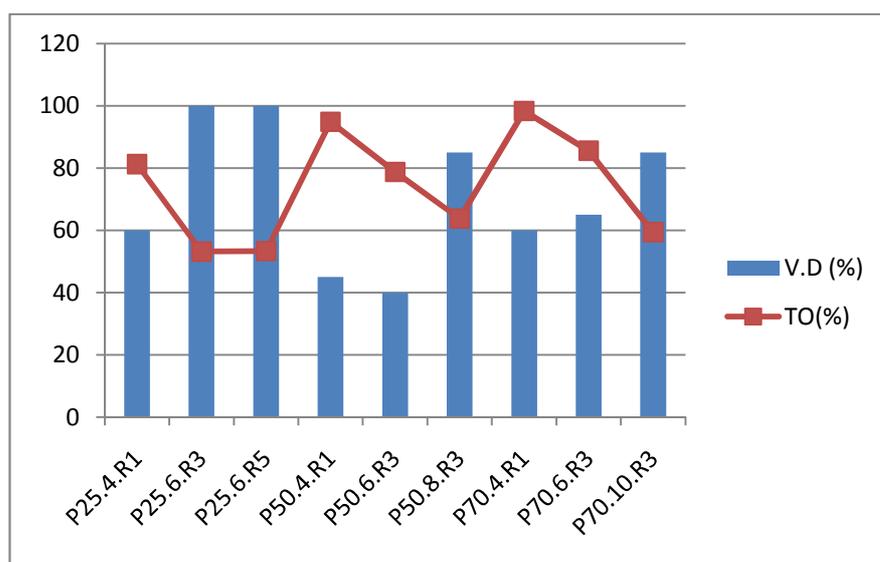


Figure 5.12. Pourcentage des cas traités par instance

Avec l'approche proposée, nous avons réussi à insérer les nouvelles victimes, dans le programme opératoire, dans 71 % des cas (Tableau 5.6). Nous remarquons d'après le tableau 5.6 et la figure 5.12 que le taux d'insertion des victimes varie en fonction du taux d'exploitation des salles opératoires ($TO(\%)$) (exemple : $V.D(\%) = 60\%$ pour $TO(\%) = 81.25$ ($P25.4.R1$) contre $V.D(\%) = 100\%$ pour $TO(\%) = 53.17$ ($P25.6.R3$)). En analysant la figure 5.11, nous remarquons que dans la plupart des problèmes, les victimes sont insérées par le programme P_4 (42 %) et P_3 (27 %). Le programme P_1 résout 2% des cas et le programme P_2 n'arrive à insérer aucune victime. Ce qui nous laisse poser la question sur l'efficacité de P_2 à pouvoir traiter les perturbations. En effet, à cause des dates limites d'interventions, le fait de décaler les dates de début des interventions à droite l'algorithme shift right (P_2) élimine d'autres victimes du programme opératoire.

En comparant les deux cas de perturbations : insertion d'une nouvelle victime et évolution d'un degré d'urgence, nous remarquons que l'algorithme de résolution permet de mieux gérer la deuxième perturbation (71% des cas traités contre 48%). En effet, les deux programmes de réordonnancement (P_3 et P_4) possèdent plus de flexibilité, puisque nous ne lui rajoutons pas de victime.

3.2.6. Sous estimation d'une durée opératoire

Pour chacune des instances, nous indiquons : le pourcentage des cas où on arrive à absorber les retards ($V.S.(%)$), le pourcentage des cas pour lesquels les perturbations causées par les interventions sous-estimées sont absorbées par l'algorithme P_5 ($V.S.P5(%)$), le pourcentage des cas pour lesquels le problème est résolu par le programme P_6 ($V.S.P6(%)$), le pourcentage des cas pour lesquels les perturbations sont absorbées par le programme P_7 ($V.S.P7(%)$), le temps de calcul minimal en secondes ($Tmin (s)$) et le temps de calcul maximal en secondes ($Tmax (s)$).

Nous rappelons que P_5 est l'heuristique *shift right*. P_6 est le programme de réordonnancement des interventions succédant l'intervention sous-estimée dans la même salle opératoire. P_7 est le programme de réordonnancement de toutes les interventions dans toutes les salles opératoires.

Instances	V.S (%)	V.S.P5(%)	V.S.P6(%)	V.S.P7(%)	Temps de calcul		TO(%)
					Tmin (s)	Tmax (s)	
$P25.4.R_1$	60	0	30	30	214	785	81.25
$P25.6.R_3$	100	0	60	40	71	324	53.17
$P25.6.R_5$	100	0	60	40	117	245	53.33
$P50.4.R_1$	50	0	20	30	309	796	94.82
$P50.6.R_3$	50	0	30	20	312	782	78.73
$P50.8.R_3$	80	0	50	30	82	243	63.79
$P70.4.R_1$	40	0	20	20	539	984	98.30
$P70.6.R_3$	60	0	20	40	571	1127	85.55
$P70.10.R_3$	90	0	60	30	739	890	59.41
Moyenne	70	0	39	31	328	686	

Tableau 5.7. Résultats numériques pour le cas : sous estimation d'une durée opératoire.

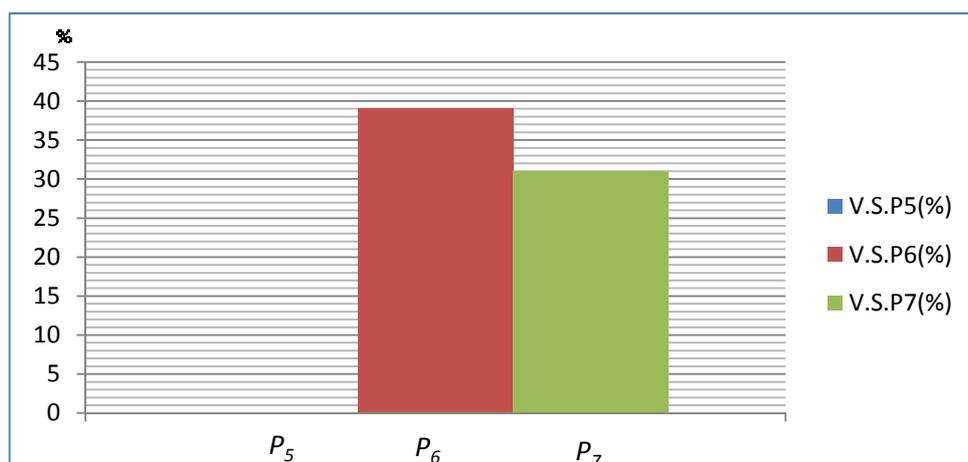


Figure 5.13. Pourcentage des cas traités par programme de résolution.

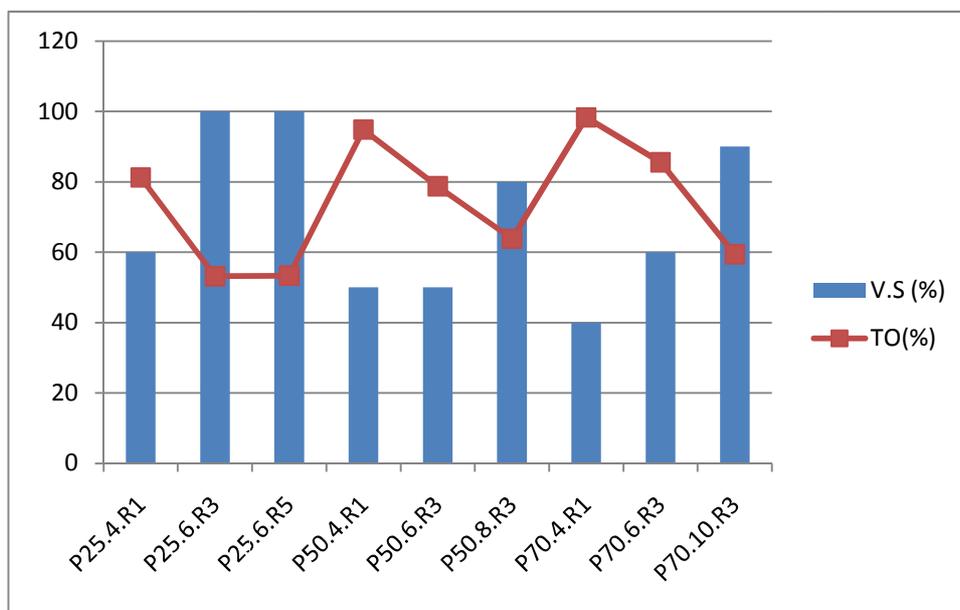


Figure 5.14. Pourcentage des cas traités par instance

Dans 70% (Tableau 5.7) des cas l'approche proposée permet d'absorber la perturbation due à une sous estimation d'une durée opératoire. Nous remarquons que ces perturbations sont traitées par les programmes P_6 (39%) et P_7 (31%). P_5 n'arrive à traiter aucune victime (figure 5.13). Ainsi faut-il garder P_5 dans l'heuristique proposée ?

Sur l'ensemble des instances de même taille (figure 5.14), le renforcement de la capacité permet de mieux absorber les perturbations. Considérons, à titre d'exemple, les instances

$P70.6.R_3$ (TO (%) = 85.55) et $P70.10.R_3$ (TO (%) = 59.41), on augmenterait le pourcentage des cas dans lesquels le retard est absorbé de 30 si 2 salles opératoires supplémentaires étaient disponibles à l'hôpital.

Il est important de préciser que le temps de calcul moyen par programme (insertion d'une nouvelle victime, dégradation d'un état, et dépassement de la durée opératoire estimée) varie entre 242 (4 minutes) secondes et 837 secondes (14 minutes). Dans certains cas, ceci reste relativement long pour répondre à une demande urgente et pour laquelle une réponse immédiate est attendue.

4- Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre à la programmation opératoire en situation d'exception avec la prise en compte de manière réactive de différents types de perturbations : arrivée d'une nouvelle victime qui nécessite une intervention urgente, évolution du degré d'urgence, et sous-estimation d'une durée opératoire.

Ainsi, nous avons développé un modèle réactif de programmation opératoire dont la finalité est de prendre en charge le maximum de victimes. Il est basé sur plusieurs programmes linéaires en nombres entiers et un algorithme de shift right.

Il s'agit d'un outil d'aide à la décision, qui aide les praticiens à se décider, selon le type de perturbation rencontrée, comment procéder pour sauver le maximum de vies humaines.

Nous avons montré dans ce chapitre, l'intérêt de cette approche pour résoudre ce type de problématique. Pour certaines instances, nous arrivons à absorber les perturbations dans 100% des cas. D'après les résultats obtenus, nous pouvons affirmer que l'algorithme shift right issu du domaine industriel, n'est pas adapté aux problèmes hospitaliers en situation d'exception. Le temps de calcul est relativement long pour certains cas que nous avons traités, ce qui réduit les possibilités d'absorber les perturbations à temps.

Conclusion générale

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés au problème d'optimisation des ressources les plus critiques en situation d'exception à savoir les salles opératoires et les chirurgiens.

Dans un premier temps nous avons centré notre étude sur le dimensionnement des ressources critiques (salles opératoires et chirurgiens) dans le cadre des exercices de simulations du plan blanc. Notre approche de résolution est basée sur deux programmes linéaires en nombres entiers. Le premier programme calcule le nombre minimal de salles opératoires nécessaires pour traiter toutes les victimes à temps sous contraintes des dates d'arrivées des chirurgiens. Le deuxième programme permet d'utiliser au mieux les marges des chirurgiens afin que le dimensionnement proposé reste toujours optimal. Ainsi, chaque hôpital d'accueil arrive à savoir, selon le nombre de victimes générées par la catastrophe, combien de salles opératoires lui sont nécessaires et comment ses chirurgiens doivent être organisés pour arriver à temps. Les résultats obtenus montrent bien l'intérêt de cette approche à pouvoir proposer une solution optimale des ressources nécessaires pour traiter toutes les victimes à temps.

Cependant, suite à une catastrophe, l'hôpital doit organiser au mieux ces ressources estimées pendant les exercices de simulation afin de pouvoir traiter toutes les victimes qui lui seront affectées. Dans ce contexte, nous avons traité le problème d'ordonnancement et d'affectation des interventions aux salles opératoires en mode prédictif. Nous avons développé trois programmes opératoires : (1) sans partage des ressources, (2) avec nomadisme des chirurgiens et mono-acte chirurgical, et (3) avec nomadisme des chirurgiens et multi-actes chirurgicaux. L'objectif a été de traiter le maximum de victimes (sauver le maximum de vies humaines). A partir des résultats obtenus, nous avons pu montrer l'intérêt de la mutualisation des ressources critiques à augmenter le nombre de victimes traitées. En effet, il s'est avéré très intéressant d'opter dans le cas d'un afflux massif de victimes pour l'ordonnancement des interventions avec nomadisme des chirurgiens tout en exploitant le gain qui peut être dégagé à partir des interventions multi-actes chirurgicaux.

En situation d'exception, la programmation opératoire doit permettre de faire face aux perturbations. Nous avons développé dans ce cadre, un modèle d'optimisation de l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires en mode réactif. Pour minimiser le risque de perturber l'ordonnancement préétabli dans toutes les salles opératoires, nous avons développé une approche de résolution en plusieurs étapes en se basant sur des programmes linéaires. En premier lieu, nous cherchons à occuper les plages vides. Ensuite, nous essayons de faire prendre en charge la perturbation par une salle opératoire, soit en appliquant l'algorithme *shift right* ou en réordonnançant les interventions en attentes et affectées à cette salle. Enfin, si la perturbation n'a toujours pas été absorbée, nous réordonnançons les interventions dans toutes les salles opératoires. Les résultats montrent que la plupart des perturbations sont absorbées en appliquant les programmes de réordonnancement. Nous avons montré que l'algorithme *shift right* n'est pas adapté pour traiter des perturbations dans le cas d'un afflux massif de victimes qui nécessitent des interventions chirurgicales urgentes.

En termes de perspectives, ce travail s'ouvre sur des problématiques qui visent à traiter des catastrophes avec un nombre de victimes plus important, et à intégrer d'autres contraintes liées aux différents composants de la chaîne hospitalière en situation d'exception (services hospitaliers, disponibilité des lits de réveil et personnel de soin, etc.). Dans ce cas, des nouvelles approches de résolutions, pour l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires, sont nécessaires pour remédier au problème du temps de calcul qui reste parfois prohibitif. Cependant, dans le cas d'une catastrophe à effet limité, nous envisageons, d'utiliser notre approche en réservant une capacité lors de l'ordonnancement prédictif des interventions dans les salles opératoires, et ce pour pouvoir absorber les éventuelles perturbations qui auront lieu.

Annexe 1. L'organisation hospitalière en cas de catastrophe

I. Fiche médicale de l'avant

La fiche médicale de l'avant est un support administratif fixée à la victime. Elle la suit depuis le PMA jusqu'au centre de soins. Elle indique : les principaux éléments d'état civil, le bilan lésionnel et l'état clinique, les thérapeutiques établies à l'avant, le triage (urgence absolue ou urgence relative), et enfin le triage définitif en fonction de l'urgence à l'évacuation, le choix du mode d'évacuation et l'évolution pendant le transport (Huguenard et Emmanuelli, 1996).

(Talon à conserver au P.M.A.)

1 POSTE MÉDICAL AVANCÉ

NOM: _____ Prénom: _____ Sexe: M F

DIAGNOSTIC: _____ Etabli par Dr: _____

U.A. U.R. DCD Evalué vers: _____ Date: _____ à: _____ h: _____

94 N° 01481

94 N° 0001481

Date: _____ Heure: _____ h: _____

NOM: _____ Prénom: _____ Sexe: M F

Nationalité: _____ Age: _____

Signes particuliers: _____

	CRÂNE	FACE	COU	TORSE	ABD.	MES.	MIS.	MES.	MES.
Fracture									
Contusion									
Plaie									
Blessure									

ÉTAT CLINIQUE:

Pression art.: _____
Fréquence card.: _____
Conscience: _____
Ventilation: _____

DIAGNOSTIC: _____ Etabli par Dr: _____

TRAITEMENT MIS EN ŒUVRE	Heures

PRIORITÉ A L'ÉVACUATION:

URGENCE ABSOLUE (U. A.) URGENCE RELATIVE (U. R.) DCD

ÉVACUATION: Couché Assis Debout à: _____ h: _____

Moyen d'évacuation: _____

Vers le Centre Médical d'Évacuation (ou hôpital) de: _____

CENTRE MÉDICAL D'ÉVACUATION de:

2

DIAGNOSTIC PRÉCIS APRÈS TRIAGE: _____ P.A.: _____ Fris. card.: _____

Conscience: _____
Ventilation: _____

Tra/Trajet et de déviation	Notes

PRIORITÉ A L'ÉVACUATION:

URGENCE ABSOLUE (U. A.) URGENCE RELATIVE (U. R.) DCD

POINT D'EMBARQUEMENT:

Voir adhésif Voir routière Voir famille

	WODATP

Accompagnement médical: oui non Couché Assis Debout

TRANSPORT Départ le _____ à: _____ h: _____

Evolution clinique et attitude thérapeutique: _____

(Talon à détacher au point d'embarquement)

3

NOM: _____ Prénom: _____ Adresse: _____

94 N° 0001481

ÉVACUÉ:

Sexe: M F P.M.A. d'origine: _____

à: _____ par: _____ vers: _____

Figure A1.1. Exemple d'une fiche médicale de l'avant

II. Les fiches réflexes

	PLAN ROUGE	Fiche réflexe : 12
	MÉDECIN TRIEUR (Chasuble blanche marquée MÉDECIN TRIEUR)	
↔ Gradé triage, Médecin chef PMA		
○ Le Médecin Trieur est : Désigné par le Médecin Chef PMA.		
○ Position géographique Zone triage du PMA.		
○ Missions <ol style="list-style-type: none">1. Organise avec le gradé triage, l'espace et les moyens qui sont affectés à la zone triage,2. S'assure que le gradé triage affecte ses personnels,3. Catégorise les victimes en U.A., U.R., U.M.P., DECEDES,4. Fait mettre en œuvre, si nécessaire, des gestes secouristes de survie,5. Fait remplir la Fiche Médicale de Tri (FMT),6. Vérifie que les victimes sont enregistrées,7. Rend compte au médecin chef P.M.A.		
○ Moyens Autorité sur l'ensemble des personnels et moyens secouristes et médicaux affectés à la zone triage.		

Figure A1.2. Exemple d'une fiche de réflexe

II. Le Centre Médicale d'Evacuation (CME)

La mise en œuvre d'un CME ne peut se concevoir que lors des grandes catastrophes avec des hôpitaux détruits ou inutilisables ou quand l'ampleur du sinistre, par le nombre de victimes, déborde très largement l'accueil local et même quand les évacuations doivent se faire à grandes distances (le lieu de la catastrophe est très éloigné par rapport aux infrastructures hospitalières).

Le centre médical d'évacuation (CME) représente une structure de soins, intermédiaire entre plusieurs PMA et les hôpitaux situés en zone arrière. Il correspond à un secteur ou à une zone regroupant plusieurs PMA.

Il fusionne des structures :

- de regroupement et d'hébergement temporaire (en attente d'évacuation)
- de triage et de catégorisation des victimes
- de soins avec contrôle de la mise en condition initiale et poursuite de soins plus complexes (éventuellement gestes chirurgicaux élémentaires)
- de régulation des évacuations par voie routière, voie aérienne, éventuellement par voie ferrée.

Le CME est situé à quelques kilomètres ou dizaine de kilomètres des PMA. Son implantation peut se faire sous des tentes de grandes capacités ou dans des locaux improvisés ; mais également dans un hôpital dont la proximité et les installations rendent possible une telle situation (Noto et *al.*, 1994).

Le CME n'intervient que comme structure « tampon » pour permettre aux hôpitaux « arrières » de s'organiser pour assurer la prise en charge d'un flux massif de victimes (Noto et *al.*, 1994).

Il importe de préciser que le CME peut être installé en cas de catastrophe à effet limité où un hôpital proche joue le rôle d'un CME.

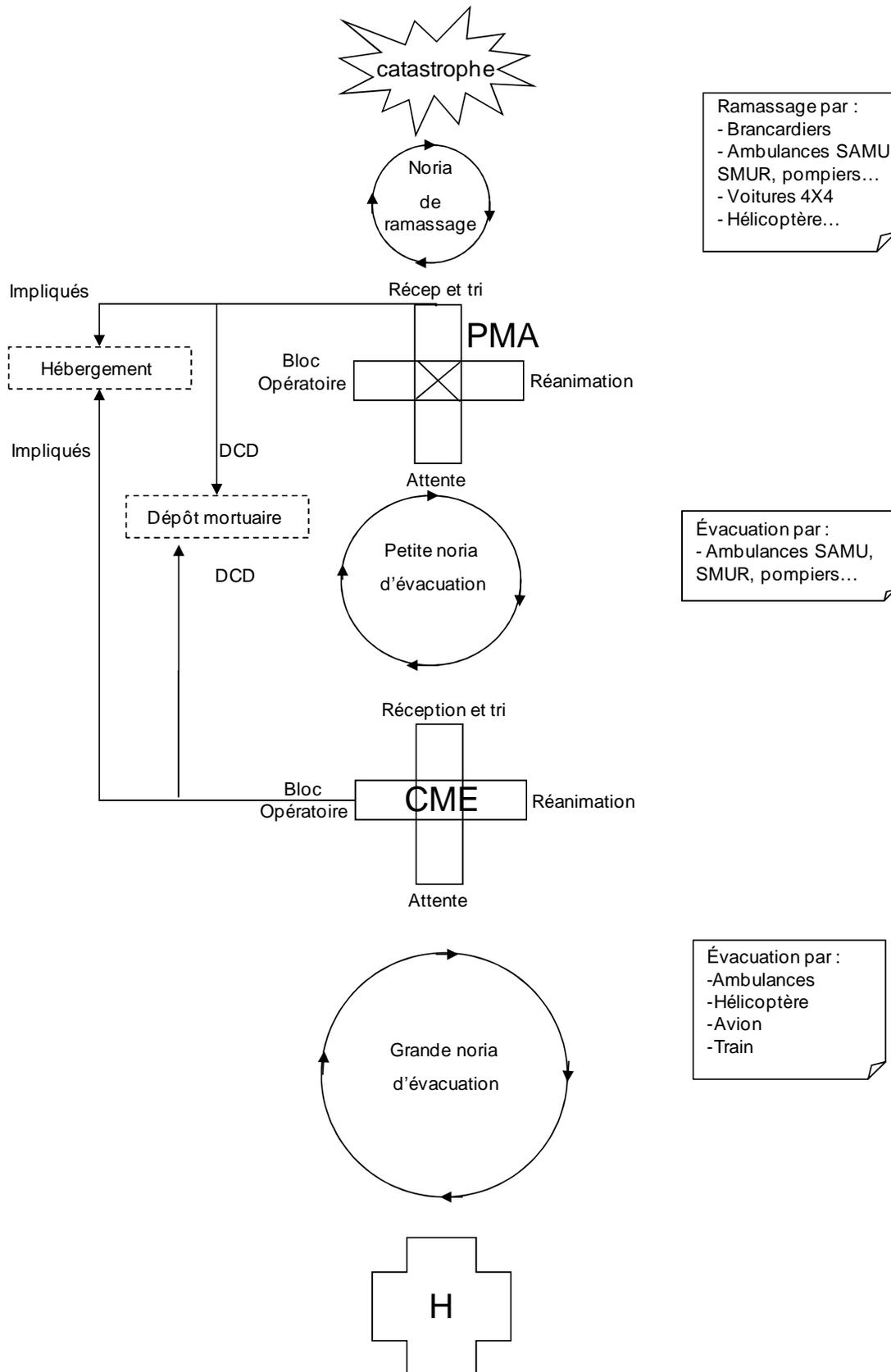


Figure A1.3. Représentation du flux de victimes avec un CME

Annexe 2. La méthode PERT

Le diagramme de PERT est un outil de planification qui permet de visualiser la dépendance des tâches et de procéder à leur ordonnancement. Le terme PERT est l'acronyme de *program evaluation and review technique*, ce qui signifie en français : Technique d'élaboration et de mise à jour de programme.

Pour chaque tâche du diagramme, on indique une date de début et de fin au plus tôt et au plus tard. Ainsi, on peut déterminer le chemin critique qui conditionne la durée minimale du projet.

Le diagramme de PERT est composé par : des tâches, caractérisées par leurs noms et leurs durées, des tâches fictives et des étapes.

Pour une étape donnée, on calcule la date au plus tôt et la date au plus tard. La date au plus tôt est la date pour laquelle la tâche pourra être commencée au plus tôt, en tenant compte du temps nécessaire à l'exécution des tâches précédentes. La date au plus tard est la date à laquelle une tâche doit être terminée sinon l'ensemble du projet sera retardée.

Exemple du diagramme de PERT :

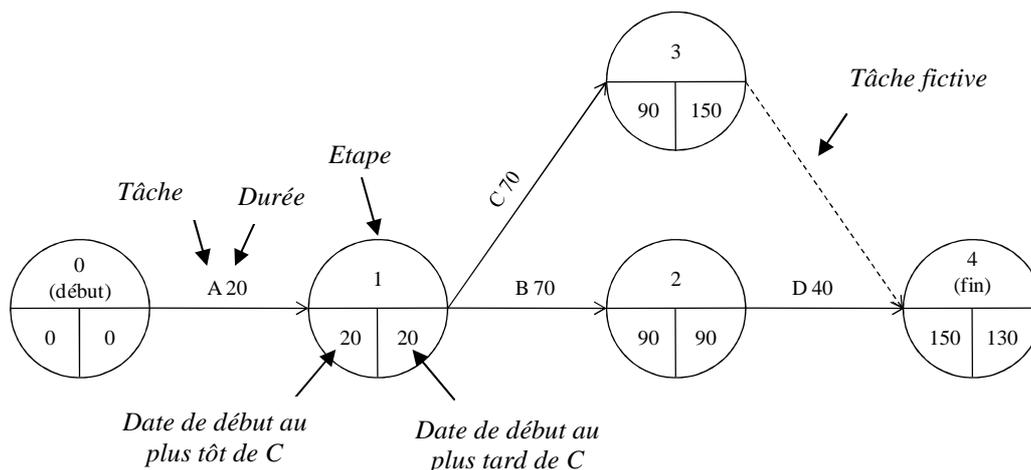


Figure A2.1. Exemple d'un diagramme de PERT.

Pour déterminer la date au plus tôt d'une tâche, il faut parcourir le diagramme de gauche à droite et calculer le temps le plus long des chemins menant du début du projet à cette tâche. Pour déterminer la date au plus tard d'une tâche, il faut parcourir le

diagramme de droite à gauche, et soustraire de la date au plus tard de la tâche suivante la durée de la tâche dont on calcule la date au plus tard.

Une tâche de A vers B est dite critique si la différence entre la date au plus tard de B et la date au plus tôt de A est égale à la durée de la tâche à accomplir.

La marge totale est la différence entre la date au plus tard et la date au plus tôt d'une tâche.

La marge libre est le délai de retard maximum que l'on peut apporter à la mise en route d'une tâche, sans pour autant que les tâches suivantes en soient affectées. La marge libre est la différence entre la plus petite date au plus tôt des tâches suivantes, et la date au plus tôt de la tâche dont on calcule la marge à laquelle on rajoute sa durée.

Annexe 3. Les données du problème réactif

P25.4.R_l

scénarios	Nouvelle victime à insérer				scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire	
	rv_i	dl_i	d_i	t_p		i	dl_i	t_p		i	d_i
<i>Sc1</i>	420	660	30	420	<i>Sc21</i>	2	210	60	<i>Sc41</i>	5	150
<i>Sc2</i>	90	600	30	30	<i>Sc22</i>	3	300	120	<i>Sc42</i>	8	120
<i>Sc3</i>	180	360	90	60	<i>Sc23</i>	5	450	300	<i>Sc43</i>	12	180
<i>Sc4</i>	150	600	30	30	<i>Sc24</i>	8	570	450	<i>Sc44</i>	15	150
<i>Sc5</i>	60	180	90	60	<i>Sc25</i>	10	270	210	<i>Sc45</i>	16	90
<i>Sc6</i>	60	420	30	30	<i>Sc26</i>	12	480	270	<i>Sc46</i>	20	90
<i>Sc7</i>	60	150	30	30	<i>Sc27</i>	15	510	330	<i>Sc47</i>	30	120
<i>Sc8</i>	30	540	60	30	<i>Sc28</i>	16	450	120	<i>Sc48</i>	41	120
<i>Sc9</i>	60	600	30	30	<i>Sc29</i>	30	450	60	<i>Sc49</i>	43	120
<i>Sc10</i>	150	480	90	150	<i>Sc30</i>	35	450	120	<i>Sc50</i>	46	150
<i>Sc11</i>	150	330	120	60	<i>Sc31</i>	37	180	30			
<i>Sc12</i>	120	270	150	120	<i>Sc32</i>	39	330	120			
<i>Sc13</i>	60	270	30	30	<i>Sc33</i>	43	300	30			
<i>Sc14</i>	300	420	60	240	<i>Sc34</i>	46	510	90			
<i>Sc15</i>	120	510	90	60	<i>Sc35</i>	48	270	90			
<i>Sc16</i>	420	60	120	330	<i>Sc36</i>	50	330	150			
<i>Sc17</i>	120	600	30	30	<i>Sc37</i>	52	360	240			
<i>Sc18</i>	210	120	90	180	<i>Sc38</i>	54	450	120			
<i>Sc19</i>	150	330	60	30	<i>Sc39</i>	58	270	120			
<i>Sc20</i>	210	270	150	210	<i>Sc40</i>	68	360	90			

Tableau A3.1. Scénarios de l'instance *P25.4.R_l*

P25.6.R₃

scénarios	Nouvelle victime à insérer				scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire	
	rv_i	dl_i	d_i	t_p		i	dl_i	t_p		i	d_i
<i>Sc1</i>	420	660	30	420	<i>Sc21</i>	2	210	60	<i>Sc41</i>	5	150
<i>Sc2</i>	90	600	30	30	<i>Sc22</i>	3	300	120	<i>Sc42</i>	8	120
<i>Sc3</i>	180	360	90	60	<i>Sc23</i>	5	450	300	<i>Sc43</i>	12	180
<i>Sc4</i>	150	600	30	30	<i>Sc24</i>	8	570	450	<i>Sc44</i>	15	150
<i>Sc5</i>	60	180	90	60	<i>Sc25</i>	10	270	210	<i>Sc45</i>	16	90
<i>Sc6</i>	60	420	30	30	<i>Sc26</i>	12	480	270	<i>Sc46</i>	20	90
<i>Sc7</i>	60	150	30	30	<i>Sc27</i>	15	510	330	<i>Sc47</i>	30	120
<i>Sc8</i>	30	540	60	30	<i>Sc28</i>	16	450	120	<i>Sc48</i>	41	120
<i>Sc9</i>	60	600	30	30	<i>Sc29</i>	30	450	60	<i>Sc49</i>	43	120
<i>Sc10</i>	150	480	90	150	<i>Sc30</i>	35	450	120	<i>Sc50</i>	46	150
<i>Sc11</i>	150	330	120	60	<i>Sc31</i>	37	180	30			
<i>Sc12</i>	120	270	150	120	<i>Sc32</i>	39	330	120			
<i>Sc13</i>	60	270	30	30	<i>Sc33</i>	43	300	30			
<i>Sc14</i>	300	420	60	240	<i>Sc34</i>	46	510	90			
<i>Sc15</i>	120	510	90	60	<i>Sc35</i>	48	270	90			
<i>Sc16</i>	420	60	120	330	<i>Sc36</i>	50	330	150			
<i>Sc17</i>	120	600	30	30	<i>Sc37</i>	52	360	240			
<i>Sc18</i>	210	120	90	180	<i>Sc38</i>	54	450	120			
<i>Sc19</i>	150	330	60	30	<i>Sc39</i>	58	270	120			
<i>Sc20</i>	210	270	150	210	<i>Sc40</i>	68	360	90			

Tableau A3.2. Scénarios de l'instance P25.6.R₃

P25.6.R₅

scénarios	Nouvelle victime à insérer				scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			Scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire	
	rv_i	dl_i	d_i	t_p		i	dl_i	t_p		i	d_i
<i>Sc1</i>	420	660	30	420	<i>Sc21</i>	2	210	60	<i>Sc41</i>	5	150
<i>Sc2</i>	90	600	30	30	<i>Sc22</i>	3	300	120	<i>Sc42</i>	8	120
<i>Sc3</i>	180	360	90	60	<i>Sc23</i>	5	450	300	<i>Sc43</i>	12	180
<i>Sc4</i>	150	600	30	30	<i>Sc24</i>	8	570	450	<i>Sc44</i>	15	150
<i>Sc5</i>	60	180	90	60	<i>Sc25</i>	10	270	210	<i>Sc45</i>	16	90
<i>Sc6</i>	60	420	30	30	<i>Sc26</i>	12	480	270	<i>Sc46</i>	20	90
<i>Sc7</i>	60	150	30	30	<i>Sc27</i>	15	510	330	<i>Sc47</i>	30	120
<i>Sc8</i>	30	540	60	30	<i>Sc28</i>	16	450	120	<i>Sc48</i>	41	120
<i>Sc9</i>	60	600	30	30	<i>Sc29</i>	30	450	60	<i>Sc49</i>	43	120
<i>Sc10</i>	150	480	90	150	<i>Sc30</i>	35	450	120	<i>Sc50</i>	46	150
<i>Sc11</i>	150	330	120	60	<i>Sc31</i>	37	180	30			
<i>Sc12</i>	120	270	150	120	<i>Sc32</i>	39	330	120			
<i>Sc13</i>	60	270	30	30	<i>Sc33</i>	43	300	30			
<i>Sc14</i>	300	420	60	240	<i>Sc34</i>	46	510	90			
<i>Sc15</i>	120	510	90	60	<i>Sc35</i>	48	270	90			
<i>Sc16</i>	420	60	120	330	<i>Sc36</i>	50	330	150			
<i>Sc17</i>	120	600	30	30	<i>Sc37</i>	52	360	240			
<i>Sc18</i>	210	120	90	180	<i>Sc38</i>	54	450	120			
<i>Sc19</i>	150	330	60	30	<i>Sc39</i>	58	270	120			
<i>Sc20</i>	210	270	150	210	<i>Sc40</i>	68	360	90			

Tableau A3.3. Scénarios de l'instance P25.6.R₅

P50.4.R₁

scénarios	Nouvelle victime à insérer				scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire	
	rv_i	dl_i	d_i	t_p		i	dl_i	t_p		i	d_i
<i>Sc1</i>	420	660	30	420	<i>Sc21</i>	3	300	120	<i>Sc41</i>	15	150
<i>Sc2</i>	90	600	30	30	<i>Sc22</i>	8	570	450	<i>Sc42</i>	30	120
<i>Sc3</i>	180	360	90	60	<i>Sc23</i>	15	510	330	<i>Sc43</i>	37	150
<i>Sc4</i>	150	600	30	30	<i>Sc24</i>	30	450	60	<i>Sc44</i>	27	120
<i>Sc5</i>	60	180	90	60	<i>Sc25</i>	37	180	30	<i>Sc45</i>	29	180
<i>Sc6</i>	60	420	30	30	<i>Sc26</i>	39	330	120	<i>Sc46</i>	44	120
<i>Sc7</i>	60	150	30	30	<i>Sc27</i>	48	270	90	<i>Sc47</i>	49	150
<i>Sc8</i>	30	540	60	30	<i>Sc28</i>	54	450	120	<i>Sc48</i>	56	180
<i>Sc9</i>	60	600	30	30	<i>Sc29</i>	58	270	120	<i>Sc49</i>	60	180
<i>Sc10</i>	150	480	90	150	<i>Sc30</i>	27	420	90	<i>Sc50</i>	64	90
<i>Sc11</i>	150	330	120	60	<i>Sc31</i>	41	450	420			
<i>Sc12</i>	120	270	150	120	<i>Sc32</i>	36	240	210			
<i>Sc13</i>	60	270	30	30	<i>Sc33</i>	44	600	510			
<i>Sc14</i>	300	420	60	240	<i>Sc34</i>	49	510	300			
<i>Sc15</i>	120	510	90	60	<i>Sc35</i>	51	450	420			
<i>Sc16</i>	420	60	120	330	<i>Sc36</i>	55	330	210			
<i>Sc17</i>	120	600	30	30	<i>Sc37</i>	56	120	60			
<i>Sc18</i>	210	120	90	180	<i>Sc38</i>	60	180	60			
<i>Sc19</i>	150	330	60	30	<i>Sc39</i>	64	90	30			
<i>Sc20</i>	210	270	150	210	<i>Sc40</i>	69	270	210			

Tableau A3.4. Scénarios de l'instance *P50.4.R₁*

P50.6.R₃

scénarios	Nouvelle victime à insérer				scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			Scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire	
	rv_i	dl_i	d_i	t_p		i	dl_i	t_p		i	d_i
<i>Sc1</i>	420	660	30	420	<i>Sc21</i>	3	300	120	<i>Sc41</i>	15	150
<i>Sc2</i>	90	600	30	30	<i>Sc22</i>	8	570	450	<i>Sc42</i>	30	120
<i>Sc3</i>	180	360	90	60	<i>Sc23</i>	15	510	330	<i>Sc43</i>	37	150
<i>Sc4</i>	150	600	30	30	<i>Sc24</i>	30	450	60	<i>Sc44</i>	27	120
<i>Sc5</i>	60	180	90	60	<i>Sc25</i>	37	180	30	<i>Sc45</i>	29	180
<i>Sc6</i>	60	420	30	30	<i>Sc26</i>	39	330	120	<i>Sc46</i>	44	120
<i>Sc7</i>	60	150	30	30	<i>Sc27</i>	48	270	90	<i>Sc47</i>	49	150
<i>Sc8</i>	30	540	60	30	<i>Sc28</i>	54	450	120	<i>Sc48</i>	56	180
<i>Sc9</i>	60	600	30	30	<i>Sc29</i>	58	270	120	<i>Sc49</i>	60	180
<i>Sc10</i>	150	480	90	150	<i>Sc30</i>	27	420	90	<i>Sc50</i>	64	90
<i>Sc11</i>	150	330	120	60	<i>Sc31</i>	41	450	420			
<i>Sc12</i>	120	270	150	120	<i>Sc32</i>	36	240	210			
<i>Sc13</i>	60	270	30	30	<i>Sc33</i>	44	600	510			
<i>Sc14</i>	300	420	60	240	<i>Sc34</i>	49	510	300			
<i>Sc15</i>	120	510	90	60	<i>Sc35</i>	51	450	420			
<i>Sc16</i>	420	60	120	330	<i>Sc36</i>	55	330	210			
<i>Sc17</i>	120	600	30	30	<i>Sc37</i>	56	120	60			
<i>Sc18</i>	210	120	90	180	<i>Sc38</i>	60	180	60			
<i>Sc19</i>	150	330	60	30	<i>Sc39</i>	64	90	30			
<i>Sc20</i>	210	270	150	210	<i>Sc40</i>	69	270	210			

Tableau A3.5. Scénarios de l'instance P50.6.R₃

P50.8.R₃

scénarios	Nouvelle victime à insérer				scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			Scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire	
	rv_i	dl_i	d_i	t_p		i	dl_i	t_p		i	d_i
<i>Sc1</i>	420	660	30	420	<i>Sc21</i>	3	300	120	<i>Sc41</i>	15	150
<i>Sc2</i>	90	600	30	30	<i>Sc22</i>	8	570	450	<i>Sc42</i>	30	120
<i>Sc3</i>	180	360	90	60	<i>Sc23</i>	15	510	330	<i>Sc43</i>	37	150
<i>Sc4</i>	150	600	30	30	<i>Sc24</i>	30	450	60	<i>Sc44</i>	27	120
<i>Sc5</i>	60	180	90	60	<i>Sc25</i>	37	180	30	<i>Sc45</i>	29	180
<i>Sc6</i>	60	420	30	30	<i>Sc26</i>	39	330	120	<i>Sc46</i>	44	120
<i>Sc7</i>	60	150	30	30	<i>Sc27</i>	48	270	90	<i>Sc47</i>	49	150
<i>Sc8</i>	30	540	60	30	<i>Sc28</i>	54	450	120	<i>Sc48</i>	56	180
<i>Sc9</i>	60	600	30	30	<i>Sc29</i>	58	270	120	<i>Sc49</i>	60	180
<i>Sc10</i>	150	480	90	150	<i>Sc30</i>	27	420	90	<i>Sc50</i>	64	90
<i>Sc11</i>	150	330	120	60	<i>Sc31</i>	41	450	420			
<i>Sc12</i>	120	270	150	120	<i>Sc32</i>	36	240	210			
<i>Sc13</i>	60	270	30	30	<i>Sc33</i>	44	600	510			
<i>Sc14</i>	300	420	60	240	<i>Sc34</i>	49	510	300			
<i>Sc15</i>	120	510	90	60	<i>Sc35</i>	51	450	420			
<i>Sc16</i>	420	60	120	330	<i>Sc36</i>	55	330	210			
<i>Sc17</i>	120	600	30	30	<i>Sc37</i>	56	120	60			
<i>Sc18</i>	210	120	90	180	<i>Sc38</i>	60	180	60			
<i>Sc19</i>	150	330	60	30	<i>Sc39</i>	64	90	30			
<i>Sc20</i>	210	270	150	210	<i>Sc40</i>	69	270	210			

Tableau A3.6. Scénarios de l'instance P50.8.R₃

P70.4.R₁

scénarios	Nouvelle victimes à insérer				scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire	
	rv_i	dl_i	d_i	t_p		i	dl_i	t_p		i	d_i
<i>Sc1</i>	420	660	30	420	<i>Sc21</i>	2	120	60	<i>Sc41</i>	12	180
<i>Sc2</i>	90	600	30	30	<i>Sc22</i>	8	570	450	<i>Sc42</i>	30	90
<i>Sc3</i>	180	360	90	60	<i>Sc23</i>	12	480	420	<i>Sc43</i>	50	90
<i>Sc4</i>	150	600	30	30	<i>Sc24</i>	30	450	60	<i>Sc44</i>	54	120
<i>Sc5</i>	60	180	90	60	<i>Sc25</i>	41	450	420	<i>Sc45</i>	44	180
<i>Sc6</i>	60	420	30	30	<i>Sc26</i>	50	300	240	<i>Sc46</i>	55	90
<i>Sc7</i>	60	150	30	30	<i>Sc27</i>	54	600	480	<i>Sc47</i>	68	120
<i>Sc8</i>	30	540	60	30	<i>Sc28</i>	27	480	330	<i>Sc48</i>	64	120
<i>Sc9</i>	60	600	30	30	<i>Sc29</i>	36	240	210	<i>Sc49</i>	22	180
<i>Sc10</i>	150	480	90	150	<i>Sc30</i>	44	600	510	<i>Sc50</i>	70	90
<i>Sc11</i>	150	330	120	60	<i>Sc31</i>	55	330	120			
<i>Sc12</i>	120	270	150	120	<i>Sc32</i>	56	120	60			
<i>Sc13</i>	60	270	30	30	<i>Sc33</i>	68	360	330			
<i>Sc14</i>	300	420	60	240	<i>Sc34</i>	64	90	30			
<i>Sc15</i>	120	510	90	60	<i>Sc35</i>	19	510	450			
<i>Sc16</i>	420	60	120	330	<i>Sc36</i>	6	630	570			
<i>Sc17</i>	120	600	30	30	<i>Sc37</i>	13	480	300			
<i>Sc18</i>	210	120	90	180	<i>Sc38</i>	22	210	180			
<i>Sc19</i>	150	330	60	30	<i>Sc39</i>	42	420	360			
<i>Sc20</i>	210	270	150	210	<i>Sc40</i>	70	210	180			

Tableau A3.7. Scénarios de l'instance *P70.4.R₁*

P70.6.R₃

scénarios	Nouvelle victimes à insérer				scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			Scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire	
	rv_i	dl_i	d_i	t_p		i	dl_i	t_p		i	d_i
<i>Sc1</i>	420	660	30	420	<i>Sc21</i>	2	120	60	<i>Sc41</i>	12	180
<i>Sc2</i>	90	600	30	30	<i>Sc22</i>	8	570	450	<i>Sc42</i>	30	90
<i>Sc3</i>	180	360	90	60	<i>Sc23</i>	12	480	420	<i>Sc43</i>	50	90
<i>Sc4</i>	150	600	30	30	<i>Sc24</i>	30	450	60	<i>Sc44</i>	54	120
<i>Sc5</i>	60	180	90	60	<i>Sc25</i>	41	450	420	<i>Sc45</i>	44	180
<i>Sc6</i>	60	420	30	30	<i>Sc26</i>	50	300	240	<i>Sc46</i>	55	90
<i>Sc7</i>	60	150	30	30	<i>Sc27</i>	54	600	480	<i>Sc47</i>	68	120
<i>Sc8</i>	30	540	60	30	<i>Sc28</i>	27	480	330	<i>Sc48</i>	64	120
<i>Sc9</i>	60	600	30	30	<i>Sc29</i>	36	240	210	<i>Sc49</i>	22	180
<i>Sc10</i>	150	480	90	150	<i>Sc30</i>	44	600	510	<i>Sc50</i>	70	90
<i>Sc11</i>	150	330	120	60	<i>Sc31</i>	55	330	120			
<i>Sc12</i>	120	270	150	120	<i>Sc32</i>	56	120	60			
<i>Sc13</i>	60	270	30	30	<i>Sc33</i>	68	360	330			
<i>Sc14</i>	300	420	60	240	<i>Sc34</i>	64	90	30			
<i>Sc15</i>	120	510	90	60	<i>Sc35</i>	19	510	450			
<i>Sc16</i>	420	60	120	330	<i>Sc36</i>	6	630	570			
<i>Sc17</i>	120	600	30	30	<i>Sc37</i>	13	480	300			
<i>Sc18</i>	210	120	90	180	<i>Sc38</i>	22	210	180			
<i>Sc19</i>	150	330	60	30	<i>Sc39</i>	42	420	360			
<i>Sc20</i>	210	270	150	210	<i>Sc40</i>	70	210	180			

Tableau A3.8. Scénarios de l'instance P70.6.R₃

P70.10.R₃

scénarios	Nouvelle victimes à insérer				scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			Scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire	
	rv_i	dl_i	d_i	t_p		i	dl_i	t_p		i	d_i
<i>Sc1</i>	420	660	30	420	<i>Sc21</i>	2	120	60	<i>Sc41</i>	12	180
<i>Sc2</i>	90	600	30	30	<i>Sc22</i>	8	570	450	<i>Sc42</i>	30	90
<i>Sc3</i>	180	360	90	60	<i>Sc23</i>	12	480	420	<i>Sc43</i>	50	90
<i>Sc4</i>	150	600	30	30	<i>Sc24</i>	30	450	60	<i>Sc44</i>	54	120
<i>Sc5</i>	60	180	90	60	<i>Sc25</i>	41	450	420	<i>Sc45</i>	44	180
<i>Sc6</i>	60	420	30	30	<i>Sc26</i>	50	300	240	<i>Sc46</i>	55	90
<i>Sc7</i>	60	150	30	30	<i>Sc27</i>	54	600	480	<i>Sc47</i>	68	120
<i>Sc8</i>	30	540	60	30	<i>Sc28</i>	27	480	330	<i>Sc48</i>	64	120
<i>Sc9</i>	60	600	30	30	<i>Sc29</i>	36	240	210	<i>Sc49</i>	22	180
<i>Sc10</i>	150	480	90	150	<i>Sc30</i>	44	600	510	<i>Sc50</i>	70	90
<i>Sc11</i>	150	330	120	60	<i>Sc31</i>	55	330	120			
<i>Sc12</i>	120	270	150	120	<i>Sc32</i>	56	120	60			
<i>Sc13</i>	60	270	30	30	<i>Sc33</i>	68	360	330			
<i>Sc14</i>	300	420	60	240	<i>Sc34</i>	64	90	30			
<i>Sc15</i>	120	510	90	60	<i>Sc35</i>	19	510	450			
<i>Sc16</i>	420	60	120	330	<i>Sc36</i>	6	630	570			
<i>Sc17</i>	120	600	30	30	<i>Sc37</i>	13	480	300			
<i>Sc18</i>	210	120	90	180	<i>Sc38</i>	22	210	180			
<i>Sc19</i>	150	330	60	30	<i>Sc39</i>	42	420	360			
<i>Sc20</i>	210	270	150	210	<i>Sc40</i>	70	210	180			

Tableau A3.9. Scénarios de l'instance *P70.10.R₃*

Annexe 4. Les résultats du problème réactif

P25.4.R₁

scénarios	Insertion d'une nouvelle victime			scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire		
	% d'affectation	Programme de résolution	CPU (s)		% de traitement	Programme de résolution	CPU (s)		% victimes traitées	Programme de résolution	CPU (s)
<i>Sc1</i>	0	-	-	<i>Sc21</i>	100	<i>P₃</i>	84	<i>Sc41</i>	100	<i>P₆</i>	214
<i>Sc2</i>	0	-	-	<i>Sc22</i>	100	<i>P₃</i>	41	<i>Sc42</i>	92	<i>P₇</i>	785
<i>Sc3</i>	0	-	-	<i>Sc23</i>	100	<i>P₄</i>	342	<i>Sc43</i>	100	<i>P₆</i>	325
<i>Sc4</i>	0	-	-	<i>Sc24</i>	100	<i>P₄</i>	573	<i>Sc44</i>	100	<i>P₇</i>	471
<i>Sc5</i>	0	-	-	<i>Sc25</i>	0	-	-	<i>Sc45</i>	96	<i>P₇</i>	516
<i>Sc6</i>	100	<i>P₃</i>	72	<i>Sc26</i>	100	<i>P₄</i>	364	<i>Sc46</i>	100	<i>P₇</i>	487
<i>Sc7</i>	0	-	-	<i>Sc27</i>	0	-	-	<i>Sc47</i>	96	<i>P₇</i>	719
<i>Sc8</i>	100	<i>P₄</i>	185	<i>Sc28</i>	100	<i>P₄</i>	452	<i>Sc48</i>	100	<i>P₇</i>	758
<i>Sc9</i>	100	<i>P₁</i>	26	<i>Sc29</i>	100	<i>P₄</i>	513	<i>Sc49</i>	92	<i>P₇</i>	621
<i>Sc10</i>	0	-	-	<i>Sc30</i>	100	<i>P₄</i>	278	<i>Sc50</i>	100	<i>P₆</i>	384
<i>Sc11</i>	0	-	-	<i>Sc31</i>	0	-	-				
<i>Sc12</i>	0	-	-	<i>Sc32</i>	100	<i>P₄</i>	427				
<i>Sc13</i>	100	<i>P₄</i>	295	<i>Sc33</i>	0	-	-				
<i>Sc14</i>	0	-	-	<i>Sc34</i>	100	<i>P₃</i>	216				
<i>Sc15</i>	0	-	-	<i>Sc35</i>	0	-	-				
<i>Sc16</i>	0	-	-	<i>Sc36</i>	0	-	-				
<i>Sc17</i>	100	<i>P₃</i>	92	<i>Sc37</i>	100	<i>P₄</i>	752				
<i>Sc18</i>	0	-	-	<i>Sc38</i>	0	-	-				
<i>Sc19</i>	0	-	-	<i>Sc39</i>	0	-	-				
<i>Sc20</i>	0	-	-	<i>Sc40</i>	100	<i>P₄</i>	331				

Tableau A4.1. Résultats numériques de l'instance *P25.4.R₁*

P25.6.R₃

scénarios	Insertion d'une nouvelle victime			scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire		
	% d'affectation	Programme de résolution	CPU (s)		% de traitement	Programme de résolution	CPU (s)		% victimes traitées	Programme de résolution	CPU (s)
Sc1	100	P ₂	151	Sc21	100	P ₃	225	Sc41	100	P ₆	175
Sc2	100	P ₁	68	Sc22	100	P ₃	340	Sc42	100	P ₆	207
Sc3	100	P ₄	327	Sc23	100	P ₄	425	Sc43	100	P ₆	324
Sc4	100	P ₃	215	Sc24	100	P ₁	104	Sc44	100	P ₆	90
Sc5	100	P ₄	294	Sc25	100	P ₃	67	Sc45	100	P ₇	163
Sc6	100	P ₃	182	Sc26	100	P ₃	122	Sc46	100	P ₆	149
Sc7	0	-	-	Sc27	100	P ₃	75	Sc47	100	P ₇	173
Sc8	100	P ₄	352	Sc28	100	P ₃	110	Sc48	100	P ₇	82
Sc9	100	P ₁	47	Sc29	100	P ₃	126	Sc49	100	P ₇	71
Sc10	100	P ₃	197	Sc30	100	P ₃	91	Sc50	100	P ₆	132
Sc11	100	P ₄	310	Sc31	100	P ₄	56				
Sc12	100	P ₄	217	Sc32	100	P ₄	160				
Sc13	100	P ₄	309	Sc33	100	P ₄	239				
Sc14	100	P ₃	124	Sc34	100	P ₃	174				
Sc15	100	P ₃	221	Sc35	100	P ₄	261				
Sc16	0	-	-	Sc36	100	P ₄	162				
Sc17	100	P ₃	194	Sc37	100	P ₄	175				
Sc18	0	-	-	Sc38	100	P ₄	124				
Sc19	100	P ₃	173	Sc39	100	P ₄	180				
Sc20	100	P ₃	208	Sc40	100	P ₄	192				

Tableau A4.2. Résultats numériques de l'instance P25.6.R₃

P25.6.R₅

scénarios	Insertion d'une nouvelle victime			scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire		
	% d'affectation	Programme de résolution	CPU (s)		% de traitement	Programme de résolution	CPU (s)		% victimes traitées	Programme de résolution	CPU (s)
Sc1	100	P ₂	74	Sc21	100	P ₃	139	Sc41	100	P ₆	228
Sc2	100	P ₁	51	Sc22	100	P ₃	171	Sc42	100	P ₆	146
Sc3	100	P ₄	196	Sc23	100	P ₄	486	Sc43	100	P ₆	182
Sc4	100	P ₃	103	Sc24	100	P ₁	652	Sc44	100	P ₆	174
Sc5	0	-	-	Sc25	100	P ₃	786	Sc45	100	P ₇	196
Sc6	100	P ₃	152	Sc26	100	P ₃	116	Sc46	100	P ₆	175
Sc7	0	-	-	Sc27	100	P ₃	241	Sc47	100	P ₇	245
Sc8	100	P ₄	145	Sc28	100	P ₃	185	Sc48	100	P ₇	117
Sc9	100	P ₁	43	Sc29	100	P ₃	162	Sc49	100	P ₇	219
Sc10	100	P ₃	207	Sc30	100	P ₃	154	Sc50	100	P ₆	179
Sc11	100	P ₄	281	Sc31	100	P ₄	198				
Sc12	100	P ₄	150	Sc32	100	P ₄	520				
Sc13	100	P ₄	163	Sc33	100	P ₄	291				
Sc14	100	P ₃	174	Sc34	100	P ₃	144				
Sc15	100	P ₃	164	Sc35	100	P ₄	273				
Sc16	0	-	-	Sc36	100	P ₄	391				
Sc17	100	P ₃	130	Sc37	100	P ₄	475				
Sc18	0	-	-	Sc38	100	P ₄	374				
Sc19	100	P ₃	184	Sc39	100	P ₄	259				
Sc20	100	P ₃	172	Sc40	100	P ₄	176				

Tableau A4.3. Résultats numériques de l'instance P25.6.R₅

P50.4.R₁

scénarios	Insertion d'une nouvelle victime			scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire		
	% d'affectation	Programme de résolution	CPU (s)		% de traitement	Programme de résolution	CPU (s)		% victimes traitées	Programme de résolution	CPU (s)
Sc1	0	-	-	Sc21	100	P ₃	305	Sc41	92	P ₇	578
Sc2	0	-	-	Sc22	0	-	-	Sc42	95	P ₇	724
Sc3	0	-	-	Sc23	100	P ₄	751	Sc43	100	P ₆	321
Sc4	100	P ₄	682	Sc24	0	-	-	Sc44	100	P ₇	563
Sc5	0	-	-	Sc25	0	-	-	Sc45	92	P ₇	650
Sc6	0	-	-	Sc26	100	P ₄	583	Sc46	90	P ₇	601
Sc7	0	-	-	Sc27	0	-	-	Sc47	100	P ₆	309
Sc8	0	-	-	Sc28	0	-	-	Sc48	100	P ₇	583
Sc9	0	-	-	Sc29	100	P ₄	410	Sc49	97	P ₇	543
Sc10	0	-	-	Sc30	100	P ₄	556	Sc50	100	P ₇	796
Sc11	0	-	-	Sc31	0	-	-				
Sc12	0	-	-	Sc32	100	P ₄	851				
Sc13	100	P ₄	524	Sc33	0	-	-				
Sc14	0	-	-	Sc34	100	P ₃	204				
Sc15	0	-	-	Sc35	0	-	-				
Sc16	0	-	-	Sc36	100	P ₄	469				
Sc17	0	-	-	Sc37	100	P ₄	513				
Sc18	0	-	-	Sc38	0	-	-				
Sc19	0	-	-	Sc39	0	-	-				
Sc20	0	-	-	Sc40	0	-	-				

Tableau A4.4. Résultats numériques de l'instance P50.4.R₁

P50.6.R₃

scénarios	Insertion d'une nouvelle victime			scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire		
	% d'affectation	Programme de résolution	CPU (s)		% de traitement	Programme de résolution	CPU (s)		% victimes traitées	Programme de résolution	CPU (s)
Sc1	0	-	-	Sc21	100	P ₃	427	Sc41	100	P ₇	570
Sc2	100	P ₄	720	Sc22	0	-	-	Sc42	98	P ₇	609
Sc3	0	-	-	Sc23	100	P ₄	619	Sc43	100	P ₆	461
Sc4	100	P ₄	609	Sc24	0	-	-	Sc44	94	P ₇	749
Sc5	0	-	-	Sc25	100	P ₄	854	Sc45	100	P ₇	782
Sc6	0	-	-	Sc26	100	P ₄	403	Sc46	98	P ₇	526
Sc7	0	-	-	Sc27	0	-	-	Sc47	100	P ₆	475
Sc8	0	-	-	Sc28	0	-	-	Sc48	100	P ₆	312
Sc9	0	-	-	Sc29	100	P ₃	324	Sc49	98	P ₇	560
Sc10	0	-	-	Sc30	0	-	-	Sc50	96	P ₇	579
Sc11	100	P ₄	715	Sc31	0	-	-				
Sc12	0	-	-	Sc32	100	P ₄	769				
Sc13	100	P ₄	698	Sc33	0	-	-				
Sc14	0	-	-	Sc34	100	P ₃	475				
Sc15	0	-	-	Sc35	0	-	-				
Sc16	0	-	-	Sc36	0	-	-				
Sc17	100	P ₄	752	Sc37	100	P ₄	847				
Sc18	0	-	-	Sc38	0	-	-				
Sc19	0	-	-	Sc39	0	-	-				
Sc20	0	-	-	Sc40	0	-	-				

Tableau A4.5. Résultats numériques de l'instance P50.6.R₃

P50.8.R₃

scénarios	Insertion d'une nouvelle victime			scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire		
	% d'affectation	Programme de résolution	CPU (s)		% de traitement	Programme de résolution	CPU (s)		% victimes traitées	Programme de résolution	CPU (s)
Sc1	100	P ₂	101	Sc21	100	P ₃	175	Sc41	100	P ₆	82
Sc2	100	P ₁	43	Sc22	100	P ₃	109	Sc42	100	P ₇	231
Sc3	100	P ₄	350	Sc23	100	P ₄	223	Sc43	100	P ₆	97
Sc4	100	P ₃	272	Sc24	100	P ₃	181	Sc44	100	P ₇	243
Sc5	0	-	-	Sc25	0	-	-	Sc45	100	P ₆	93
Sc6	100	P ₁	68	Sc26	100	P ₃	142	Sc46	98	P ₇	127
Sc7	100	P ₃	130	Sc27	0	-	-	Sc47	100	P ₆	110
Sc8	100	P ₃	248	Sc28	100	P ₄	212	Sc48	100	P ₆	102
Sc9	100	P ₁	76	Sc29	100	P ₃	185	Sc49	100	P ₇	241
Sc10	100	P ₃	149	Sc30	100	P ₄	212	Sc50	98	P ₇	159
Sc11	100	P ₃	160	Sc31	100	P ₄	190				
Sc12	100	P ₄	274	Sc32	100	P ₄	293				
Sc13	100	P ₄	309	Sc33	100	P ₄	264				
Sc14	100	P ₃	141	Sc34	100	P ₃	156				
Sc15	100	P ₃	97	Sc35	100	P ₄	249				
Sc16	0	-	-	Sc36	100	P ₄	275				
Sc17	100	P ₂	61	Sc37	100	P ₄	198				
Sc18	100	P ₄	119	Sc38	0	-	-				
Sc19	100	P ₃	173	Sc39	100	P ₄	179				
Sc20	100	P ₄	193	Sc40	100	P ₃	107				

Tableau A4.6. Résultats numériques de l'instance P50.8.R₃

P70.4.R₁

scénarios	Insertion d'une nouvelle victime			scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire		
	% d'affectation	Programme de résolution	CPU (s)		% de traitement	Programme de résolution	CPU (s)		% victimes traitées	Programme de résolution	CPU (s)
Sc1	0	-	-	Sc21	100	P ₃	773	Sc41	95	P ₇	724
Sc2	0	-	-	Sc22	0	-	-	Sc42	100	P ₇	681
Sc3	0	-	-	Sc23	100	P ₄	1023	Sc43	93	P ₇	691
Sc4	0	-	-	Sc24	100	P ₄	816	Sc44	100	P ₆	539
Sc5	0	-	-	Sc25	0	-	-	Sc45	98	P ₇	675
Sc6	0	-	-	Sc26	100	P ₄	915	Sc46	98	P ₇	984
Sc7	0	-	-	Sc27	100	P ₄	827	Sc47	100	P ₆	576
Sc8	100	P ₄	973	Sc28	100	P ₄	994	Sc48	98	P ₇	629
Sc9	0	-	-	Sc29	100	P ₄	1158	Sc49	95	P ₇	831
Sc10	0	-	-	Sc30	100	P ₃	690	Sc50	100	P ₇	753
Sc11	0	-	-	Sc31	0	-	-				
Sc12	0	-	-	Sc32	100	P ₄	973				
Sc13	0	-	-	Sc33	0	-	-				
Sc14	0	-	-	Sc34	100	P ₃	881				
Sc15	100	P ₄	869	Sc35	0	-	-				
Sc16	0	-	-	Sc36	0	-	-				
Sc17	100	P ₄	954	Sc37	100	P ₄	921				
Sc18	0	-	-	Sc38	0	-	-				
Sc19	0	-	-	Sc39	0	-	-				
Sc20	0	-	-	Sc40	100	P ₃	780				

Tableau A4.7. Résultats numériques de l'instance P70.4.R₁

P70.6.R₃

scénarios	Insertion d'une nouvelle victime			scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire		
	% d'affectation	Programme de résolution	CPU (s)		% de traitement	Programme de résolution	CPU (s)		% victimes traitées	Programme de résolution	CPU (s)
Sc1	0	-	-	Sc21	100	P ₃	876	Sc41	98	P ₇	824
Sc2	100	P ₃	826	Sc22	0	-	-	Sc42	100	P ₇	1019
Sc3	0	-	-	Sc23	100	P ₄	1267	Sc43	98	P ₇	973
Sc4	0	-	-	Sc24	100	P ₄	1180	Sc44	100	P ₆	571
Sc5	100	P ₄	1239	Sc25	0	-	-	Sc45	100	P ₇	962
Sc6	100	P ₄	1183	Sc26	100	P ₄	1156	Sc46	96	P ₇	1033
Sc7	0	-	-	Sc27	100	P ₄	980	Sc47	100	P ₆	857
Sc8	100	P ₄	975	Sc28	0	-	-	Sc48	100	P ₇	871
Sc9	0	-	-	Sc29	100	P ₃	769	Sc49	98	P ₇	982
Sc10	0	-	-	Sc30	100	P ₃	573	Sc50	100	P ₇	1127
Sc11	0	-	-	Sc31	100	P ₄	1039				
Sc12	0	-	-	Sc32	100	P ₄	963				
Sc13	0	-	-	Sc33	0	-	-				
Sc14	0	-	-	Sc34	0	-	-				
Sc15	100	P ₄	961	Sc35	100	P ₄	872				
Sc16	0	-	-	Sc36	100	P ₄	1067				
Sc17	100	P ₄	1017	Sc37	100	P ₄	1139				
Sc18	0	-	-	Sc38	0	-	-				
Sc19	100	P ₄	914	Sc39	0	-	-				
Sc20	0	-	-	Sc40	100	P ₃	462				

Tableau A4.8. Résultats numériques de l'instance P70.6.R₃

P70.10.R₃

scénarios	Insertion d'une nouvelle victime			scénarios	Evolution d'un degré d'urgence			scénarios	Sous estimation d'une durée opératoire		
	% d'affectation	Programme de résolution	CPU (s)		% de traitement	Programme de résolution	CPU (s)		% victimes traitées	Programme de résolution	CPU (s)
Sc1	100	P ₃	692	Sc21	100	P ₃	471	Sc41	100	P ₆	482
Sc2	100	P ₃	943	Sc22	100	P ₄	991	Sc42	100	P ₆	570
Sc3	0	-	-	Sc23	100	P ₃	439	Sc43	100	P ₇	719
Sc4	100	P ₄	852	Sc24	100	P ₁	179	Sc44	100	P ₆	439
Sc5	100	P ₄	974	Sc25	0	-	-	Sc45	100	P ₆	650
Sc6	100	P ₁	176	Sc26	100	P ₄	1109	Sc46	98	P ₇	890
Sc7	100	P ₄	774	Sc27	100	P ₄	1143	Sc47	100	P ₆	516
Sc8	0	-	-	Sc28	100	P ₃	526	Sc48	100	P ₇	823
Sc9	0	-	-	Sc29	100	P ₃	579	Sc49	100	P ₇	681
Sc10	100	P ₄	1055	Sc30	100	P ₃	591	Sc50	100	P ₆	454
Sc11	0	-	-	Sc31	0	-	-				
Sc12	100	P ₃	715	Sc32	100	P ₄	859				
Sc13	100	P ₄	769	Sc33	0	-	-				
Sc14	100	P ₃	856	Sc34	100	P ₄	1059				
Sc15	0	-	-	Sc35	100	P ₃	416				
Sc16	100	P ₄	973	Sc36	100	P ₃	458				
Sc17	100	P ₄	854	Sc37	100	P ₄	978				
Sc18	100	P ₃	461	Sc38	100	P ₄	919				
Sc19	0	-	-	Sc39	100	P ₄	1006				
Sc20	100	P ₄	1120	Sc40	100	P ₃	575				

Tableau A4.9. Résultats numériques de l'instance P70.10.R₃

Références Bibliographiques

Adnet, F. Maistre, J.P. Lapandry, Cupa, C. M. Lapostolle, F. (2003) « Organisation des secours médicaux lors de catastrophes à effet limités en milieu urbain ». Annales françaises d'anesthésie et de réanimation, Vol. 22, pp 5-11.

Aleksy B. et Chabroul M., (2006) « Le projet de modélisation et de simulation des flux du nouvel hôpital Estaing : Aide à la décision versus management du changement », 6^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation-MOSIM'06.

Al-Turki U.M., Mittenthal J. et Ragavachari M., (1996) « A dominant subset of V-shaped sequences for a class of single machine sequencing problem », European Journal of Operational Research, Vol.88, pp.345-347.

Aloui S., Collomp R., Chapurlat V., Penalva J-M., Mousnier A. Staccini P. et Quaranta J-F., (2006) « Modélisation de système hospitalier pour le management du risque », 3^{ème} Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2006.

Artiba A., Briquet M., Colin J., Dontaine A., Gourc D., Pourcel C. et Stock R., (2004) « Modélisation d'établissement de santé », 2^{ème} Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2004.

Augusto, V., Xie, X., Perdomo, V., (2009) « Operating theatre scheduling with patient recovery in both operating rooms and recovery beds ». Computers and Industrial Engineering.

Ballou, R.H. (1992) « Business Logistics Management », Englewood Cliffs, N-J, Prentice Hall.

Balin S. et Giard V. (2006) « Problèmes méthodologiques posés par la simulation de processus de production de services - l'exemple d'un service d'urgence », 3^{ème} Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2006.

Beliëm, J., Demeulemeester, E., (2008) « A Branch and Price approach for integrating nurse and surgery scheduling ». European Journal of Operational Research. Vol. 189, pp. 652-668.

Blake J.T, Dexter F. et Donald J. (2002 a), « Operating room managers' use of integer programming for assigning block time to surgical groups: A case study », *International Anesthesia Research Society*, pp.143-148.

Blake J.T., Michael W. Carter, (2002 b) « A goal programming approach to strategic resource allocation in acute care hospitals », *European Journal of Operational Research*, ed. Elsevier Sciences, Vol. 140, pp 541-561.

Bonfill A., Espuna A. et Puigjaner L. (2007) « Proactive approach to address the uncertainty in short-term scheduling », *Computers and Chemical Engineering*, doi : 10.1016/j.compchemeng.2007.08.014.

Bounekkar A., Brémond M., Clot D., Kabachi N., Lamure M. et Robert D., (2004) « Analyse des trajectoires patients au sein d'un établissement hospitalier », 2ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2004.

Chaabane S., Meskens N., Guinet A., Laurent M., (2006) « Comparaison des performances des politiques de programmation opératoire », 3ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2006.

Chaabane, S.et Guinet, A., (2003) « La gestion industrielle et la gestion des blocs opératoires ». *Annales françaises d'anesthésie et de réanimation*, Vol. 22, Issue 10, pp. 904-908.

Chunfu J., (2001), « Stochastic single machine scheduling with an exponentially distributed due date », *Operations Research Letters*, Vol.28, pp.199-203.

Cochran J.K. and Roche K.T. (2009) « A multi-class queuing network analysis methodology for improving hospital emergency department performance ». *Computers and Operations Research*, Vol. 36, pp. 1497 – 1512.

Dexter F., Macario A., Ledolter J., (2007), « Identification of systematic underestimation (bias) of case durations during case scheduling would not markedly reduce overutilized operating room time », *Journal of Clinical Anesthesia* Vol.19, pp.198–203.

Dexter F. and Traub RD., (2002) « How to schedule surgical cases into specific operating rooms to maximize the efficiency of use of operating room time ». *Anesthesia & Analgesia*, Vol. 94, pp.933-942.

Dexter F., Blake JT., Penning DH., Sloan B., Chung P. and Lubarsky DA., (2002) « Use of linear programming to estimate impact of changes in a hospital room time allocation on perioperative variables costs ». *Anesthesiology*. Vol 96, pp 718-724.

Dexter F., Penning D. and Traub RD., (2001) « Statistical Analysis by Monte-Carlo Simulation of the impact of Administrative and Medical Delays in discharge from the Postanesthesia Care Unit on Total Patient Care Hours », *Anesthesia & Analgesia*, Vol. 92, pp.1222-1225.

Dexter F., Marcario A. et O'Neill L., (2000), « Scheduling surgical cases into overflow block time computer simulation of the effects of the scheduling strategies on operating room labor costs, » *Anesthesia and Analgesia*, Vol.90, pp.980-988.

Dexter F., Marcario A. et Traub RD., (1999), « which algorithm for scheduling add-on elective cases to maximizes operating room utilization ? Use of bin packing algorithms and fuzzy constraints in operating room management », *Anesthesiology*, Vol.91, pp.1491-1500.

Dhahri, M.A., (1999). « Organisation des secours médicaux dans les situations d'exception en Tunisie ». D.E.S.S de médecine d'urgence et de catastrophe, Département d'Anesthésie et de réanimation, Hôpital Militaire de Tunis.

Dumas M.B. (1984) « Simulation modelling of hospital bed planning ». *Simulation*, Vol. 43, pp. 69-78.

Dussauchoy A., Combes C., Gouin F. and Botti G. (2003) « Simulation de l'activité d'un bloc opératoire en utilisant des données recueillies au niveau d'un département d'anesthésie », 3ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers GISEH, Lyon, France.

Fédération internationale des sociétés de la croix-rouge et du croissant-rouge (2006). « Rapport annuel 2006 ».

Fei, H., Meskens, N. et Chu, C. (2009 a) « A planning and scheduling problem for an operating theatre using an open scheduling strategy ». *Computers and Industrial Engineering*.

Fei, H., Meskens N., Combes, C. et Chu, Ch., (2009 b) « The endoscopy scheduling problem : a case study with two specialised operating rooms ». *Int. J. Production Economies*. Vol. 120, pp. 452-462.

Fei H., Duvivier D., Meskens N. et Chu C., (2006), « Ordonnancement journalier dans un bloc opératoire dans le cadre d'une stratégie « open scheduling » », 3ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2006.

Fei H., Chu C. et Meskens N. (2004) « Planification des salles opératoires : résolution par la génération de colonnes et la programmation dynamique », 2ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2004.

Glaa, B. (2008) « Contribution à la conception et l'optimisation d'un système d'aide à la gestion des urgences ». Thèse de doctorat. L'Ecole Centrale de Lille.

Gentilello LM, Pierson DJ. (2001) « Trauma critical care ». *Am J Respir Crit Care Med* Vol.163, pp.604–607.

Guinet A., Chaabane S. et Lin J., (2006), « Ordonnancement des interventions d'un bloc opératoire avec contraintes des chirurgiens nomades », 3ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2006.

Guinet A. et Chaabane S. (2003) « operating theatre planning », *International Journal of Production Economics*, Vol.85, pp.69-81.

Guinet, A., (2002) « Gestion des ressources humaines dans un service de santé » Journées de Travail du Groupe de Recherche en Productique GRP, Grenoble, France.

Chaabane S., Guinet A., Smolski N., Guiraud M., Luquet B., Marcon E. et Viale J.-P. (2003) « La gestion industrielle et la gestion des blocs opératoires », *Annales Françaises d'Anesthésie et de réanimation*, Vol.22 (10), pp.904-908.

Gorunescu, F., McClean, S. et Millard, P.H. (2002) « A queuing model for bed-occupancy management and planning of hospitals ». *Journal of the operational Research society*, Vol.53, pp. 19-24.

Hammami S., Ladet P., Hadj Alouane A. et Ruiz A., (2006), « Une approche robuste pour la construction des plages horaires dans un bloc opératoire », 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation-MOSIM'06.

Hammami, S. (2004) « Aide a la décision dans le pilotage des flux matériels et patients d'un plateau médico-technique ». Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble.

Hammami, S. (2002). « Comment gérer l'urgence dans les services de soins ». DEA de Génie Industriel, Institut polytechnique de Grenoble, Juillet.

Hancock, W.M. et Walter, P.F. (1984). « The use of admissions simulation to stabilize ancillary workloads ». *Simulation*, Vol. 43, N 2, August, pp.88-94.

Hans E., Wullink G., Houdenhoven M. et Kazemier G., (2007) Robust surgery loading, *European Journal of Operational Research*, Vol.185, pp.1038–1050.

Harper P.R., Shahani A.K. (2002) « Modelling for the planning and management of bed capacities in hospitals ». *Journal of the operational Research society*, Vol. 53, pp. 11-18.

HRP2, (2004). « Analyse de la bibliographie des travaux réalisés sur la modélisation et la simulation de flux ainsi que sur la gestion des ressources pour l'aide à la décision en dimensionnement et ré-ingénierie des plateaux techniques ». Rapport de recherche sur le projet HRP2. D6.1 Etat de l'art bibliographie Modélisation/Simulation.

Huguenard, P. et Emmanuelli, X. (1996) « Catastrophes de la stratégie d'intervention à la prise en charge médicale » *Encyclopédie Médico Chirurgicale*.

Huguenard, P. (1996) « De la stratégie d'intervention à la prise en charge ». Paris Elsevier.

Jebali A., Hadj Hadj Alouane A. et Ladet P., (2005) « Operating rooms scheduling », *International Journal of Production Economics* , Vol.99, pp.52-62.

Jebali A., Ladet P. et Hadj Alouane A., (2004) « Planification du bloc opératoire : une approche par processus », 2ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2004.

Jebali Aïda, (2004), Vers un outil d'aide à la planification et à l'ordonnancement des ressources dans les services de soins, Thèse de doctorat de l'INPG, France.

Johnson S.M., (1954), « Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included », *Nav. Res. Log. Q.*, vol.1, n° 1, pp.61-68.

Kao, E.P.C., et Tung, G. (1981) « Bed allocation in a public health care hospital delivery system ». *Management science*, Vol.27, pp. 507-520.

Kao E.P.C. (1974) « Modelling the movement of coronary patients within a hospital by a semi-markov processes », *Operations Research*, Vol. 22, pp.683-699.

Kao, E.P.C (1973). «A Semi-Markovien Population Model with application to Hospital Planning ». IEEE Transaction on systems, man and cybernetics, Vol. SMC-3, N 4, Juillet, pp. 327-336.

Kharraja S. (2004), Outils d'aide à la planification et l'ordonnancement dans les plateaux médico-technique, Thèse de doctorat, université jean-Monnet, France.

Kharraja S., Marcon E., « Construction automatique du plan directeur d'allocation des plages horaires », Proceedings de GISEH'03, Lyon, France, 17-18 janvier 2003.

Kharraja S., Chabaane S. et Marcon E., (2002) « Evaluation de performances pour deux stratégies de programmation opératoire de bloc », Proceedings de CIFA'02, Nantes, France.

Kim, S.C. et Horowitz, I. (2002) « Scheduling hospital services : the efficacy of elective-surgery quotes », Omega The International Journal of Management Science Vol 30, pp.335-346.

Kim S.C., Horowitz I., Young K.K. and Buckley T.A. (2000) « Flexible bed allocation and performance in the intensive care unit », Journal of operation management, Vol. 18, pp. 427-443.

Kusters, R.J. et Groot P.M.A. (1996) « Modelling resources availability in general hospitals. Design and implementation of a decision support model », European Journal Operational Research, Vol.88, pp. 428-445.

Kuo P.C., Schroeder R.A, Mahaffey S. et Bollinger R. (2003) « Optimization of operating room allocation using linear programming techniques », The American College of Surgeons, Elsevier.

Lamiri M., Xie X., Dolgui A. et Grimaud F., (2006) « A stochastic model for operating room planning with elective and emergency demand for surgery », European Journal of Operational Research, Vol. 185, pp. 1026-1037.

Lapierre S.D, Goldsman D., Cochran R. and DuBow J. (1999) « Bed allocation techniques based on census data ». Socio Economic Planning Sciences, Vol.33, pp. 25-38.

Mackay M. (2001) « Practical experience with bed occupancy management and planning systems: an Australian view ». Health care management science, Vol.4, pp. 47-56.

Marcon.E., (2004), « Influence de l'ordonnancement des interventions dans les salles opératoires sur le fonctionnement de la Salle de Soins Post-Interventionnels (SSPI) », 2ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2004.

Marcon E., Kharraja S., Simonnet G., (2003) « The Operating Theatre Scheduling: an Approach Centered on the Follow-up of the Risk of No Realization of the Planning ». Special issue of International Journal of Production Economics (IJPE), ed. ELSEVIER. 85 83-90.

Ministère de la santé et de la solidarité, France (2006). « Plan blanc et gestion de crise ». Edition 2006, annexe à la circulaire n°DHOS / CGR / 2006 / 401.

Ministère de la santé, de la famille et des personnes handicapées, France (2002). « Explosion de l'usine AZF de Toulouse le 21 septembre 2001. Rapport de mission, Enseignements et propositions sur l'organisation de soins ».

Ministère de la santé publique (2002), « Guide de mise en place d'une stratégie d'accueil dans les hôpitaux en cas d'afflux massif des victimes », Circulaire 2002/50, Tunisie.

Miller M. J., Ferrin D. M. and Messer M. G. (2004) « Fixing the emergency department: a transformation journey with EDsim », Winter Sim. Conference.

Murray C.J. (2005) « A note on bed allocation technique based on census data ». Socio Economic Planning Sciences, Vol.39, pp. 183-192.

Noto, R. Huguenard, P. et Larcen, A. (1994) « Médecine de catastrophe ». 2^{ème} édition-Masson 1994.

Nouaouri, I., Hajri-Gabouj, S., Dridi, N., Nicolas, J.Ch., Jolly, D. et Dr.Gabouj, M., (2008) « Programmation des interventions de stabilisation dans les salles opératoires : cas d'une catastrophe à effet limité », 7ème Conférence Internationale de MODélisation et de SIMulation MOSIM'08.

Nouaouri, I., Nicolas, J.Ch., Jolly, D., Hajri-Gabouj S., Dridi, N., (2008) « La programmation opératoire en situation d'exception avec chirurgiens nomades et interventions multi-actes chirurgicaux », 4ème Conférence Internationale en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers GISEH-2008, Lausanne, Suisse.

Ozkarahan I., (2000), « Allocation of surgeries to operating rooms by goal programming », Journal of Medical Systems, Vol 24, pp. 339-378.

Persson, M., A. Persson J., (2009). « Health economic modeling to support surgery manangement at Swedish hospital », *Omega*, Vol. 37, pp 853-863.

Pinedo M., (2002), « Scheduling theory algorithms and systems », Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.

Ridge J.C., Jones S.K., Nielsen M.S. and Shahani A.K. (1998) « Capacity planning for intensive care units ». *European journal of operational research*, Vol. 105, pp.346-355.

Roland B., Martinelly C.Di, Riane F., Pochet Y., (2009 a) « Scheduling an operating theatre under human resources constraints ». *Computers and Industrial Engineering*.

Roland, B., Cordier, J-P., Tancrez, J-S., Riane, F. (2009 b), « Recovery beds and blocking in stochastic operating theatres » *Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, Montreal, Canada.

Strum D.P., Vargas LG. et May JH, (1999), « Surgical subspecialty block utilization and capacity planning: minimal cost analysis model », *Anesthesiology*, Vol.90, p.1176-85.

Sun J. et Xue D., (2001) « A dynamic reactive scheduling mechanism or responding to changes of production orders and manufacturing resources », *Computers in industry*, vol.46, pp.189-207.

Tadeuz Sawik (2007) « Integer programming approach to reactive scheduling in make-to-order manufacturing », *Mathematical and Computer Modeling*, vol. 46, pp. 1373-1387.

Tancrez J-S. ; Roland B. ; Cordier J-P ; Riane F. « Étude de la perturbation par les urgences du planning opératoire », 4ème Conférence Internationale en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers GISEH-2008, Lausanne, Suisse.

Tao W. et Guinet A., (2006) « Modélisation et simulation du processus de passage des patients aux urgences à l'aide d'ARIS : Etude de cas au SAU du centre hospitalier Saint Joseph et Saint Luc », 3ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2006.

Teow K. L. and Tan W. S. (2007) « Hospital beds reallocation using mathematical programming ». *Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, Beijing, China.

Trilling L., Guinet A. et Chomel P-Y, (2004), « Comparaison de méthodes et outils d'analyse : Etude d'un plateau Médico-Technique regroupé avec le cadre de modélisation ARIS », 2ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes hospitaliers GISEH-2004.

Vissers J.M.H. (1998) « Patients flow-based allocation of hospital resources: A case study ». *European journal of operational research*, Vol.105, pp. 356-370.

Vissers J.M.H. (1994) « Patients flow-based allocation of hospital resource ». These Eindhoven university of technology, Eindhoven, Holland.

Van de Vonder S., Ballestin F., Demeulemeester E., et Herroelen W. (2007) « Heuristic procedures for reactive project scheduling », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 52, pp.11-28.

Vermeulen, I., Bothe, S., Elkhuisen, G., Lameris, H., Bakker, J.M., La Poutré, H., (2009) « Adoptive resource allocation for efficient patient scheduling », *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 46, Issue 1, pp. 67-80.

Venkataraman, R., Brusco, M.J. (1996) « An integrated Analysis of Nurse and Scheduling Policies ». *OMEGA International Journal of Management Science*, Vol. 24, pp. 57-71.

Wang Q. , 2004, « Modeling and analysis of high risk patient queues », *European Journal of Operational Research*, pp.502-515.

Wang T., Belaidi A., Guinet A. et Besombes B. (2007) « Modeling and simulation of emergency services with ARIS and ARENA », *Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, Beijing, China.