Détection automatique de déviations chirurgicales et identification de comportements chirurgicaux par modélisation et analyse des processus chirurgicaux.

Arnaud Huaulmé

▶ **To cite this version:**

Arnaud Huaulmé. Détection automatique de déviations chirurgicales et identification de comportements chirurgicaux par modélisation et analyse des processus chirurgicaux.. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Grenoble - Alpes, 2017. Français. NNT : . tel-01518734

HAL Id: tel-01518734
https://hal.science/tel-01518734

Submitted on 5 May 2017

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

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

Communauté
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE la Communauté UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Modèles, méthodes et algorithmes pour la Biologie, la Santé et l'environnement**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Arnaud HUAULME

Thèse dirigée par **Alexandre MOREAU-GAUDRY**
et encadrée par **Pierre JANNIN et Sandrine VOROS**

préparée au sein du **laboratoire Techniques de l'Ingénierie Médicale et de la Complexité - Informatique, Mathématiques et Applications de Grenoble (TIMC-IMAG)**
et au sein du **Laboratoire Traitement du Signal et de l'Image (LTSI)**
dans **L'École Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l' Environnement (EDISCE)**

Détection automatique de déviations chirurgicales et identification de comportements chirurgicaux par modélisation et analyse des processus chirurgicaux.

Thèse soutenue publiquement le **25 janvier 2017**,
devant le jury composé de :

M. Eric STINDEL
PU-PH, LATIM, Université de Bretagne Occidentale, Brest, Rapporteur, Président

Mme Marie-Christine JAULENT
DR INSERM,LIMICS, Sorbonne Universités, Paris, Rapporteur

M. Jean-Luc FAUCHERON
PU-PH, Hôpital Michallon, UGA, Grenoble, Examinateur

M. Germain FORESTIER
MC, ENSISA, Université de Haute-Alsace, Mulhouse, Examinateur

M. Gwenolé QUELLEC
CR INSERM, LATIM, Université de Bretagne Occidentale, Brest, Examinateur

M. Alexandre MOREAU-GAUDRY
PU-PH, TIMC-IMAG, UGA, Grenoble, Directeur de thèse

M. Pierre JANNIN
DR INSERM, LTSI, Université de Rennes 1, Rennes, Encadrant

Mme Sandrine VOROS
CR INSERM, TIMC-IMAG, UGA, Grenoble, Encadrante

Remerciements

Cette thèse n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et le soutient de nombreuses personnes, c'est pourquoi je tiens à les remercier ici.

Pour commencer, je tiens à remercier mes encadrants, Sandrine Voros et Pierre Jannin, ainsi que mon directeur de thèse Alexandre Moreau-Gaudry, qui m'ont suivi tout au long de ces 3 ans et qui ont su m'encadrer en me fournissant de nombreuses pistes de recherche, tout en me laissant la liberté nécessaire pour mettre en place mes propres idées.

Je souhaite aussi remercier le Labec CAMI, pour le financement de cette thèse et pour la possibilité enrichissante d'effectuer ma thèse pendant 1 an et demi au sein du laboratoire Techniques de l'Ingénierie Médicale et de la Complexité - Informatique, Mathématiques et Applications de Grenoble (TIMC-IMAG) et l'autre moitié du temps au sein du Laboratoire Traitement du Signal et de l'Image (LTSI). Bien que faire sa thèse au sein de deux laboratoires différents entraîne quelques désagréments d'un point de vue personnel, ceci reste une expérience enrichissante permettant d'appréhender des visions de la recherche différentes et d'apprendre auprès d'experts de différents domaines.

Je remercie Madame Christine Jaulent et Monsieur Eric Stindel d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Je remercie également les autres membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail : Professeur Jean-Luc Faucheron, Monsieur Germain Forestier et Monsieur Gwenolé Quellec.

Je voudrais aussi remercier le docteur Fabian Rêche et Bertrand Trilling qui m'ont accordé de nombreuses heures afin de m'aider à comprendre le déroulement opératoire d'une rectopexie et les événements indésirables y étant associés.

Je remercie également les membres du Centre d'Investigation Clinique - Innovation Technologique (CIC-IT) de Grenoble pour leur aide dans la mise en place d'une base de données de santé en respectant l'ensemble des aspects légaux du recueil de données médicales.

Je voudrais remercier l'ensemble de mes collègues autant pour leurs apports d'un point de vue professionnel que personnelle.

Pour finir, je voudrais remercier mes parents, mes sœurs et mes grands-

parents, même ceux nous ayant quittés, pour leur soutien au cours de cette thèse, mais aussi au cours des années précédentes.

Résumé

Les événements indésirables (EIs) sont devenus une vraie préoccupation du monde médical, leur réduction étant recherchée pour assurer la meilleure sécurité possible pour les patients. Les événements indésirables sont, selon la HAS, "des situations qui s'écartent de procédures ou de résultats escomptés dans une situation habituelle et qui sont ou qui seraient potentiellement sources de dommages". Alors que les événements indésirables postopératoires sont étudiés depuis de nombreuses années, ceux ayant lieu au cours des opérations ne le sont que depuis récemment, comme le montre la récente classification des événements indésirables intraopératoires par Kaafarani *et al.* publiée en 2014. Cependant, la classification d'événements indésirables intraopératoires n'est que la première étape pour comprendre les comportements chirurgicaux qui les entraînent.

Dans cette thèse, nous présenterons des méthodes pour détecter l'apparition de déviations dues à l'apparition d'événements indésirables intraopératoires et pour identifier des comportements chirurgicaux à partir de modèle de processus chirurgicaux.

Ce travail a nécessité de concevoir et développer une modélisation formelle de la rectopexie et des événements indésirables qui sont associés à cette procédure chirurgicale grâce à la mise en place d'ontologies. Cette modélisation formelle nous a permis de bien appréhender le principe de cette opération et de fournir un vocabulaire permettant une annotation détaillée de vidéos endoscopiques de rectopexies, afin de créer des modèles de processus chirurgicaux.

Grâce à l'annotation des vidéos chirurgicales basée sur cette modélisation, nous avons développé une méthode de détection automatique des déviations dues à l'apparition d'événements indésirables. Cette méthode est basée sur un alignement temporel non linéaire multidimensionnel, que nous avons développé, suivi d'un modèle semi-Markovien caché que nous avons entraîné pour déterminer s'il existe des déviations par rapport à une chirurgie de référence et si celles-ci sont dues à des événements indésirables.

Cette détection de déviations dues aux événements indésirables est la première étape afin de comprendre les raisons de leurs apparitions. Nous émettons l'hypothèse que leurs apparitions peuvent être expliquées par une succession d'activités, c'est-à-dire un pattern. Pour répondre à cette hypothèse, nous avons mis en place une méthode de découverte de patterns permettant d'identifier les comportements chirurgicaux spécifiques à différents critères. Cette identification de comportements chirurgicaux est réalisée par une classification ascendante hiérarchique avec la mise en place d'une nouvelle métrique basée sur les patterns partagés entre les chirurgies. Afin de valider

notre méthode, nous l'avons comparé à deux études mettant en évidence des différences de comportements chirurgicaux, par exemple entre différents sites chirurgicaux ou entre deux types de procédures de la même opération. Une fois la méthode validée, nous avons utilisé notre méthode afin de montrer s'il existait des comportements chirurgicaux spécifiques à des données préopératoires et à l'apparition d'événements indésirables.

Pour finir, nous revenons sur les contributions les plus importantes de ces travaux à travers une discussion générale et nous proposons différentes pistes pour améliorer nos résultats.

Abstract

Adverse events are an important concern for medical domain, their reduction is searched to allow the best safety for patients. The adverse events are, according to the HAS [1], "situations which divert from procedures or from expected results in a usual situation and which are or which would be potentially sources of damage". Even though postoperative adverse events have been studied for many years, the ones which occur during the operation are recently studied, for example the first classification of intraoperative adverse events is the classification of Kaafarani *et al.* published in 2014. Nevertheless, the classification of intraoperative adverse events is only the first step to understand the surgical behaviors to their sources.

In this thesis, we will present methods to detect the apparition of deviations due to intraoperative adverse events and to identify surgical behaviors thanks to surgical process model.

To allow the development of these methods, the first step was to model the rectopexy and the adverse events related to this surgery thanks to the creation of ontologies. This work has enabled us to understand the principle of this operation and to create a vocabulary. This vocabulary was used to annotate laparoscopic videos of rectopexies, in order to create surgical process models

Thanks to the surgical video annotation based on this modelisation of the rectopexy, we have developed a method to automatically detect deviations due to adverse events. This method is based on a multidimensional non-linear temporal scaling, a homemade alignment of sequences, follows by a hidden semi-Markovian model. This Markovian model was trained to detect deviations from a standard surgical process, a reference, and to determine if these deviations are due to adverse events.

This deviation detection is the first step in order to understand the reason of their apparitions. We hypothesize that their apparitions could be explained by an activities succession, i.e. a pattern. To verify this hypothesis, we develop a pattern discovery method to allow the identification of specific surgical behaviors. This identification of surgical behaviors was done by a hierarchical clustering thanks to a new metric based on shared pattern between surgeries. To validate our method, we make a comparison with two state of the art article highlighting surgical behaviors, for example, surgical behaviors specific to surgical site or to type of procedures. Once our method has been validated, we have used it to identify surgical behavior specific to preoperative data and to adverse events apparitions.

1. Haute Autorité de santé

Finally, we come back to the most important contributions of this work through a general discussion and we propose perspectives to improve our results.

Table des matières

Remerciements . . . iii
Résumé . . . v
Abstract . . . vii
Table des matières . . . ix
Table des figures . . . xv
Liste des tableaux . . . xix
Glossaire . . . xxi

Introduction **1**

1 État de l'art **3**
1.1 Événements indésirables . . . 3
1.1.1 Définitions . . . 6
1.1.1.1 Événements indésirables . . . 6
1.1.1.2 Causes . . . 7
1.1.2 Catégorisation des événements indésirables . . . 9
1.1.2.1 Catégorisation temporelle . . . 9
1.1.2.2 Catégorisation par localisation . . . 10
1.1.2.3 Catégorisation par cause . . . 11
1.1.3 Gestion des risques . . . 12
1.1.3.1 Identification des risques en médecine . . . 12
1.1.3.2 Caractérisation des risques en chirurgie . . . 13
1.1.3.3 Stratégies de gestion des risques en chirurgie . 16
1.1.3.4 Modèle de gestion des risques . . . 16
1.1.4 Discussion . . . 17
1.2 Principe de la modélisation des processus chirurgicaux . . . 20
1.2.1 La modélisation . . . 20
1.2.1.1 Domaine d'étude . . . 20
1.2.1.2 Granularité de modélisation . . . 21
1.2.1.3 Acteurs . . . 22
1.2.1.4 Formalisation . . . 23
1.2.2 L'acquisition des données . . . 24

1.2.2.1 Granularité d'acquisition 24
1.2.2.2 Acteurs à l'origine des données 25
1.2.2.3 Temps chirurgical concerné par l'acquisition des données 25
1.2.2.4 Moyens d'acquisition 26
1.2.3 Construction des modèles de processus chirurgicaux . . 28
1.2.4 Utilisation des modèles de processus chirurgicaux . . . 29
1.2.4.1 Reconnaissance automatique de modèles individuels de processus chirurgicaux 29
1.2.4.2 Comparaison et classification des modèles de processus chirurgicaux 31
1.2.4.3 Nature prédictive des modèles de processus chirurgicaux 33
1.2.5 Applications cliniques visées par les modèles de processus chirurgicaux 34
1.2.5.1 Apprentissage et évaluation de l'expertise . . 34
1.2.5.2 Optimisation du bloc opératoire 35
1.2.5.3 Aide à la chirurgie 35
1.2.5.4 Assistance robotique 36
1.2.5.5 Évaluation des techniques et des systèmes . . 36
1.2.5.6 Qualité chirurgicale 36
1.2.6 Validation des modèles de processus chirurgicaux . . . 36
1.2.6.1 Objectif de validation 37
1.2.6.2 Paramètres d'entrées 37
1.2.6.3 Vérité terrain 37
1.2.6.4 Métriques 38
1.2.7 Évaluation 39
1.2.8 Discussion 39
1.3 Modélisation des processus chirurgicaux, comportements chirurgicaux et événements indésirables 40
1.3.1 Détection d'événements indésirables par modélisation des processus chirurgicaux 40
1.3.2 Comportements chirurgicaux et événements indésirables 42
1.3.3 Problématiques de la thèse 42

2 Modélisation de la rectopexie et des événements indésirables 45
2.1 Modélisation des connaissances 46
2.1.1 Méthodologies de création d'une ontologie 47
2.1.1.1 Méthode de construction de Cyc KB 47
2.1.1.2 Squelette méthodologique 48
2.1.1.3 Méthode de Grüninger & Fox 48

2.1.1.4 Méthode du projet KACTUS 49
2.1.1.5 Méthodologie d'extension de SENSUS 49
2.1.1.6 METHONDOLOGY 49
2.1.1.7 On-To-Knowledge 50
2.1.1.8 Agrégation semi-automatique de concepts . . 50
2.1.1.9 Le cycle de vie d'une ontologie 51
2.1.1.10 Synthèse 51
2.1.2 Analyse des tâches cognitives 52
2.1.2.1 Collecter les connaissances préliminaires . . . 52
2.1.2.2 Représenter les connaissances 53
2.1.2.3 Éliciter les connaissances de l'expert 53
2.1.2.4 Analyser et vérifier les données recueillies . . 54
2.1.2.5 Mise en forme des résultats pour l'application désirée 55
2.2 Méthodologie utilisée 56
2.2.1 Collecte des connaissances préliminaires 56
2.2.2 Représentation des connaissances 56
2.2.3 Élicitation des connaissances des experts 57
2.2.3.1 Élicitation du déroulement de la rectopexie . 57
2.2.3.2 Élicitation des événements indésirables associés à la rectopexie 58
2.2.4 Analyse et vérification des données 59
2.2.5 Mise en forme des résultats pour l'application désirée . 59
2.3 Résultats 60
2.3.1 Modélisation de la rectopexie 60
2.3.1.1 Représentation hiérarchique du déroulement de la rectopexie 60
2.3.1.2 Ontologie de la rectopexie 68
2.3.2 Modélisation des événements indésirables 71
2.3.2.1 Les événements indésirables et la rectopexie . 71
2.3.2.2 Ontologie des événements indésirables chirurgicaux 73
2.4 Discussion 77

3 Détection de déviations dues à l'apparition d'événements indésirables 81
3.1 Détection de déviations 82
3.2 Aspects légaux du recueil de données 83
3.3 Méthode 86
3.3.1 Données 88

3.3.2 Création des modèles individuels de processus chirurgicaux . . . 88
3.3.3 Échantillonnage des modèles individuels de processus chirurgicaux . . . 90
3.3.4 Alignement temporel non-linéaire multi-dimensionnel . 91
3.3.4.1 La déformation temporelle dynamique . . . 91
3.3.4.2 La déformation temporelle dynamique multi-dimensionnelle . . . 93
3.3.4.3 L'alignement temporel non-linéaire . . . 94
3.3.4.4 L'alignement temporel non-linéaire multi-dimensionnel . . . 95
3.3.5 Création de la chirurgie de référence . . . 96
3.3.6 Calcul de la distance entre la chirurgie de référence et une chirurgie de l'ensemble d'apprentissage . . . 97
3.3.7 Modèle semi-Markovien caché . . . 97
3.3.7.1 Modèles de Markov cachés . . . 98
3.3.7.2 Modèles semi-Markoviens cachés . . . 99
3.3.7.3 Apprentissage du modèle semi-Markovien caché dans notre étude . . . 102
3.3.8 Propagation de l'information temporelle . . . 104
3.4 Validation . . . 106
3.4.1 Validation de la création du modèle spécifique de processus chirurgicaux . . . 106
3.4.2 Validation de la méthode de détection de déviations . . 108
3.4.2.1 Méthode de validation . . . 108
3.4.2.2 Études réalisées . . . 110
3.4.2.3 Méthode d'analyse des erreurs de détection . 111
3.4.2.4 Métriques utilisées . . . 112
3.4.2.5 Validation statistique . . . 113
3.4.3 Résultats de la méthode de détection de déviations . . 114
3.4.3.1 Étude 1 : Influence de l'échantillonnage . . . 114
3.4.3.2 Étude 2 : Couplage total entre les deux mains 123
3.4.3.3 Étude 3 : Influence des poids des composants des activités . . . 126
3.4.3.4 Conclusion de la validation . . . 131
3.5 Discussion . . . 135
3.5.1 Création du modèle spécifique de processus chirurgicaux et élicitation des connaissances . . . 135
3.5.2 Étude 1 : Influence de l'échantillonnage . . . 136
3.5.3 Étude 2 : Couplage total entre les deux mains . . . 139
3.5.4 Étude 3 : Influence des poids des composants des activités 140

3.5.5 Méthode 141
3.6 Conclusion 143

4 Identification de comportements chirurgicaux spécifiques à l'aide de la découverte de patterns 145
4.1 Découverte de patterns 146
4.1.1 Découverte de patterns dans la littérature 146
4.1.2 Découverte de patterns dans le milieu médical 146
4.1.3 Les différentes méthodes de découverte de patterns . . 147
4.2 Méthodes 148
4.2.1 Découverte des plus longs patterns séquentiels fréquents 149
4.2.1.1 Algorithme principal 149
4.2.1.2 Constitution du vocabulaire des activités fréquentes 151
4.2.1.3 Création des patterns candidats 152
4.2.1.4 Détermination des patterns fréquents de k activités et des plus longs patterns fréquents de k-1 activités 154
4.2.2 Classification ascendante hiérarchique 158
4.3 Validation 160
4.3.1 Comportements chirurgicaux en fonction des sites chirurgicaux, des niveaux d'expertise et des chirurgiens . . 160
4.3.1.1 Données 160
4.3.1.2 Précédente étude 161
4.3.1.3 Résultats 163
4.3.1.4 Comparaison des résultats 166
4.3.2 Comportements chirurgicaux en fonction du type de procédures au sein de la même chirurgie 167
4.3.2.1 Données 167
4.3.2.2 Précédente étude 167
4.3.2.3 Résultats 169
4.3.2.4 Comparaison des résultats 171
4.3.3 Comportements chirurgicaux en fonction de l'historique des patients 171
4.3.3.1 Données 171
4.3.3.2 Résultats 173
4.3.4 Comportements chirurgicaux spécifiques à l'apparition d'événements indésirables 177
4.4 Discussion 180
4.4.1 Comportements chirurgicaux en fonction des sites chirurgicaux, des niveaux d'expertises et des chirurgiens . 180

4.4.2 Comportements chirurgicaux en fonction du type de procédures au sein de la même chirurgie 181
4.4.3 Comportements chirurgicaux en fonction de l'historique des patients 181
4.4.4 Comportements chirurgicaux spécifiques à l'apparition d'événements indésirables 182
4.4.5 Méthode 182
4.5 Conclusion 184

5 Discussion générale **185**
5.1 Modélisation des connaissances 185
5.1.1 Apports de la modélisation des connaissances pour la construction et l'utilisation des modèles de processus chirurgicaux 185
5.1.1.1 Création d'un vocabulaire homogénéisé 185
5.1.1.2 Utilisation des connaissances pour l'amélioration des méthodes d'analyse des modèles de processus chirurgicaux 186
5.1.2 Limites de la modélisation des connaissances 188
5.1.2.1 Modélisation des connaissances dépendante des participants 188
5.1.2.2 Difficulté de capturer les connaissances procédurales 188
5.2 Vers la détection d'événements indésirables 189
5.3 L'identification de comportements chirurgicaux 192

6 Conclusion **195**

Publications **197**

Bibliographie **199**

Annexe **211**
A Définition des composants des activités de la rectopexie. . . . 211
B Liste des activités réalisables. 215
C Formulaire d'information et de non opposition du patient. . . 219

Liste des tableaux

1.1 Nombre d'événements porteurs de risques demandés par les organismes d'accréditation en fonction des spécialités dont ils ont la charge. 5
1.2 Équivalence des termes pour les événements indésirables entre la HAS et l'OMS. 7
1.3 Équivalence des termes pour les causes entre la HAS et l'OMS. 8
1.4 Catégorisation temporelle dans la littérature. 10
1.5 Catégorisation par localisation dans la littérature. 11
1.6 Causes identifiées par Morgan *et al.* 12
1.7 Traduction de la classification de Dindo-Clavien. 14
1.8 Traduction de la classification de Kaafarani *et al.* 15
1.9 Domaines principaux étudiés par les SPMs. 21
1.10 Niveaux de granularité et leurs définitions dans la littérature. . 22
1.11 Répartition des acteurs étudiés dans le contexte de la modélisation dans la littérature. 23
1.12 Différents niveaux de formalisation. 24
1.13 Niveaux de granularité des données dans la littérature. 25
1.14 Acteurs à l'origine des données acquises dans la littérature. . . 25
1.15 Temps chirurgicaux concernés par l'acquisition des données dans la littérature. 26
1.16 Moyens d'enregistrement des données dans la littérature. . . . 28
1.17 Applications dans la littérature. 34
1.18 Paramètres d'entrées utilisés pour la validation. 37

2.1 Objectifs, supports utilisés et résultat des interviews semi-structurées pour l'élicitation du déroulement de la rectopexie. 58
2.2 Composants des activités pour la rectopexie. 65
2.3 Influences des caractéristiques des patients sur le déroulement opératoire. 67
2.4 Catégories et phases d'apparition des événements indésirables intraopératoires pouvant survenir au cours d'une rectopexie. . 72

3.1 Données préopératoires recueillies et raisons justifiant leur recueil. 84
3.2 Données intraopératoires recueillies et raisons justifiant leur recueil. 85
3.3 Données postopératoires recueillies et raisons justifiant leur recueil. 85
3.4 Données préopératoires des femmes non hystérectomisées participant à l'étude de détection de déviations. 89
3.5 Type d'observations appartenant à l'état déviation anatomique et détectées comme déviations événementielles. 116
3.6 Résultats de l'influence de l'échantillonnage sur les échantillons alignés. 120
3.7 Résultats dans le domaine temporel de l'influence de l'échantillonnage. 121
3.8 Résultats dans le domaine temporel avec filtrage d'une seconde de l'influence de l'échantillonnage. 122
3.9 Résultats en fonction de l'échantillonnage de la détection de déviations avec l'ajout d'information de la seconde main. . . . 124
3.10 Type d'observations appartenant à l'état déviation anatomique et détectées comme déviations événementielles dans l'étude avec couplage total entre les deux mains. 125
3.11 Influence du poids du verbe d'action dans la détection de déviation pour 12,5 échantillons par seconde. 132
3.12 Influence du poids de la cible dans la détection de déviation pour 12,5 échantillons par seconde. 133
3.13 Influence du poids de l'instrument chirurgical dans la détection de déviation pour 12,5 échantillons par seconde. 134

4.1 Répartition du nombre de chirurgies et de l'expertise des chirurgiens par site. 161
4.2 Résultats de la découverte de patterns en fonction du seuil min_fr. 163
4.3 Taux de séparabilité pour les sites chirurgicaux, les niveaux d'expertise et les chirurgiens par les deux méthodes. 166
4.4 Type de procédure où sont retrouvés les 11 patterns identifiés pour la chirurgie de la cataracte. 170
4.5 Données préopératoires des patients ayant subi une rectopexie. 172
4.6 Résultats de la découverte de patterns en fonction du seuil min_fr. 174
4.7 Extremums des données préopératoires des clusters identifiés. 175

4.8 Données préopératoires des 14 patterns identifiés pour la rectopexie. 176

A.1 Définition des verbes d'action des activités 211
A.2 Définition des instruments des activités 212
A.3 Définition des cibles des activités 213

Table des figures

1.1 Nombre d'EPRs acceptés par an au sein de la base REX. . . . 4
1.2 Exemple d'EPR déclaré dans la Base REX. 13
1.3 Modèle des plaques de Reason appliqué à la médecine. 17
1.4 Processus de création d'un gSPM. 29
1.5 Connaissance a priori permettant la reconnaissance automatique d'actions dans la chirurgie de la cataracte. 30
1.6 Représentation de 2 gSPMs pour la phase d'excision de la capsule pour la chirurgie de la cataracte en ambulatoire et avec hospitalisation. 32
1.7 Illustration de la différence entre un alignement total et un aliment partiel 33
1.8 Détection de déviations entre un gSPM et un iSPM par Bouarfa & Dankelman. 41

2.1 Rectopexie selon la technique d'Orr-Loygue. 46
2.2 Représentation hiérarchique des phases pour les chirurgies laparoscopiques. 60
2.3 Représentation hiérarchique des phases et des étapes de la rectopexie. 62
2.4 Schémas anatomiques du pelvis chez la femme et de la paroi du rectum. 63
2.5 Représentation graphique des relations entre la phase de dissection et les étapes qui lui sont attachées au sein de OntoRectopexy. 70
2.6 Représentation graphique des relations déterminant les fonctions du crochet monopolaire. 71
2.7 Événements indésirables graves présentés dans OAE pour la chirurgie. 73
2.8 Représentation graphique des relations de OntoSurgicalEvents reliant un événement de gravité de grade III(classification de Dindo-Clavien) au processus de récupération à mettre en place. 75

3.1 Méthode d'apprentissage pour la création du modèle de détection off-line de déviations. 87
3.2 Interface d'annotation de Surge Track pour 3 acteurs différents. 90
3.3 Échantillonnage d'un iSPM continu pour obtenir un iSPM discret. 91
3.4 Calcul de la distance cumulative, grâce à la distance locale entre 2 séquences dans l'algorithme DTW. 92
3.5 Étapes de l'alignement temporel non-linéaire. 94
3.6 Représentation des différents composants d'un HMM à deux états cachés et trois symboles observables. 99
3.7 Représentation de l'influence de la matrice de probabilité de durée de séjour au sein d'un HsMM. 101
3.8 Représentation de la création de la séquence d'états cachés pour la chirurgie S_s^*. 103
3.9 Propagation de l'information temporelle de deux activités dans le processus d'alignement des séquences 104
3.10 Représentation de la séquence d'activités pour un iSPM et pour le sSPM. 107
3.11 Méthode de validation leave-one-out. 109
3.12 Représentation de la séquence obtenue avec un couplage complet entre les deux mains du chirurgien. 111
3.13 Graphes illustrant l'influence de l'échantillonnage 115
3.14 Résultats graphiques des observations mal classifiées pour l'étude 1.a : influence de l'échantillonnage sur les échantillons alignés. 116
3.15 Graphes illustrant de l'influence de l'échantillonnage dans le domaine temporel 118
3.16 Graphes illustrant l'influence de l'échantillonnage dans le domaine temporel avec un filtrage d'une seconde 119
3.17 Graphes illustrant les résultats avec l'ajout des activités de la seconde main. 123
3.18 Résultats graphiques des observations mal classifiées pour l'étude 2 : couplage total entre les deux mains. 125
3.19 Graphes illustrant l'influence du poids du verbe. 127
3.20 Graphes illustrant l'influence du poids de la cible. 128
3.21 Graphes illustrant l'influence du poids de l'instrument chirurgical. 130
3.22 Représentation des différences entre le modèle hiérarchique de la rectopexie obtenu à l'étape de modélisation des connaissances et celui obtenu après la mise à jour suite à la création du modèle spécifique de processus chirurgicaux. 136

3.23 Représentations séquentielles des états cachés réels et détectés par le modèle à partir des échantillons alignés et après le retour temporel avec et sans filtrage 138

4.1 Différence de reconnaissance au sein d'une séquence d'un pattern séquentiel et d'un pattern parallèle. 148
4.2 Illustration des plus longs patterns séquentiels découverts à partir de 2 séquences pour un seuil de 2. 151
4.3 Illustration de la constitution du vocabulaire des activités fréquentes. 151
4.4 Illustration de la création des patterns candidats. 154
4.5 Illustration du déplacement d'une fenêtre le long d'une séquence pour calculer le nombre d'occurrences des candidats. . 155
4.6 Illustration de la détermination des patterns fréquents de k activités et des plus longs patterns fréquents de $k-1$ activités 156
4.7 Représentation des trois méthodes d'agrégations entre trois clusters. 159
4.8 Dendrogramme des résultats de la classification obtenue par Forestier *et al.*. 162
4.9 Dendrogramme des résultats de la classification obtenue par notre méthode pour un seuil de 6. 165
4.10 Représentation des profils de traitement des chirurgiens de la main droite identifiés par Neumuth *et al.*. 168
4.11 Dendrogramme de la classification selon les données préopératoires pour un seuil de 14. 175
4.12 Dendrogramme de la classification selon les événements indésirables pour un seuil de 14. 178
4.13 Dissection du promontoire avant et après l'apparition d'un événement indésirable vasculaire 179

Glossaire

base REX	Base de données de retour d'expérience.
BFO	Basic Formal Ontology.
C.H.U.	Centre Hospitalier Universitaire.
CCTIRS	Comité Consultatif sur le Traitement de l'Information en matière de Recherche dans le domaine de la Santé.
CECIC	Comité d'Éthique des Centres d'Investigation Clinique.
CIC-IT	Centre d'Investigation Clinique - Innovation Technologique.
CNIL	Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés.
CPP	Methode Concepts, Processes and Principles.
CTA	Analyse des tâches cognitives, CTA pour Cognitive Task Analysis.
DA	Déviation due au particularités anatomiques.
DBA	DTW Barycenter Averaging.
DEI	Déviation due à l'apparition d'un événement indésirable.
DTW	Déformation temporelle dynamique, DTW pour Dynamic Time Warping.
DTW$_D$	Déformation temporelle dynamique dépendante.
DTW$_I$	Déformation temporelle dynamique indépendante.
EI	Événement indésirable.
EIG	Événement indésirable grave.
EPR	Événement porteur de risques.

FDA	U.S Food and Drug Administration.
FMA	Foundational Model of Anatomy.
GMCAO	Gestes Médico-Chirurgicaux Assistés par Ordinateur.
gSPM	Modèle générique de processus chirurgicaux, gSPM pour generic Surgical Process Model.
HAS	Haute Autorité de Santé.
HMM	Modèle de Markov caché, HMM pour Hidden Markov Model.
HsMM	Modèle semi-Markovien caché, HsMM pour Hidden semi-Markovien Model.
IMC	Index de Masse Corporelle.
iSPM	Modèle individuel de processus chirurgical, iSPM pour individual Surgical Process Model.
JAM	Journal de l'Accréditation des Médecins.
MD-NLTS	Alignement temporel non-linéraire multi-dimensionnel.
MedDRA	Medical Dictionary for Regulatory Activities.
NLTS	Alignement temporel non-linéraire.
OAE	Ontology of Adverse Events.
OMS	Organisme Mondial de la Santé.
OntoADR	Ontology of Adverse Drug Reactions.
OntoSPM	Ontology of Surgical Process Model.
RCVA	Chirurgie du Rachis Cervical par Voie Antérieure.
SLFSP	Shared Longest Frequent Sequential Pattern.
SNOMED-CT	Systematized Nomenclature of Medicine - Clinical Terms.
SPM	Modèle de processus chirurgicaux, SPM pour Surgical Process Model.

sSPM	Modèle spécifique de processus chirurgicaux, sSPM pour specific Surgical Process Model.
SVM	Machine à vecteur de support, SVM pour Support Vector Machine.
UPGMA	Unweighted pair Group Method with Arithmetic Mean.

Introduction

Cette thèse concerne le développement de méthodes pour la détection automatique de déviations chirurgicales et l'identification de comportements chirurgicaux grâce à la modélisation et à l'analyse des processus chirurgicaux. Elle a été réalisée au sein de l'équipe Gestes Médico-Chirurgicaux Assistés par Ordinateur (GMCAO) du laboratoire Techniques de l'Ingénierie Médicale et de la Complexité - Informatique, Mathématiques et Applications de Grenoble (TIMC-IMAG) et au sein de l'équipe de Modélisation des Connaissances et Procédures Chirurgicales et Interventionnelles pour l'Aide à la Décision (MEDICIS) du Laboratoire Traitement du Signal et de l'Image (LTSI), sous la direction d'Alexandre Moreau-Gaudry (TIMC-IMAG), de Sandrine Voros (TIMC-IMAG) et de Pierre Jannin (LTSI). Cette thèse est soutenue par le labex CAMI (Computer Assisted Medical Interventions).

Les événements indésirables (EIs), c'est-à-dire les modifications du processus chirurgical pouvant entraîner des séquelles pour le patient, préoccupent de plus en plus le milieu médical. En effet, en plus de pouvoir être délétères pour la santé des patients, ces derniers ont un coût considérable pour la société. Les autorités, comme la Haute Autorité de Santé (HAS), ont mis en place des moyens de recensements et d'analyse dans l'objectif de mieux identifier et comprendre les processus mis en jeux lors de l'apparition d'EIs. Cependant, ce recensement est fait de manière manuelle, ce qui en plus de nécessité de nombreuses ressources humaines, peut être source d'erreurs. La mise en place de méthodes de détection et d'analyse automatique des EIs permettrait de limiter ces contraintes, et permettrait de fournir des recommandations aux équipes chirurgicales afin d'éviter l'apparition d'EIs, ou tout du moins d'en limiter l'impact, au sein même du bloc opératoire.

Ce type de méthode entre complètement dans le cadre de la modélisation des processus chirurgicaux dont l'objectif est de formaliser la connaissance chirurgicale afin de mieux comprendre le contexte et le déroulement d'une opération chirurgicale.

Les objectifs de cette thèse sont :

- d'étudier comment les EIs intraopératoires peuvent être détectés grâce à la modélisation des processus chirurgicaux ;
- d'identifier, dans les processus chirurgicaux, des comportements chirurgicaux pouvant être à l'origine des EIs.

Pour ce faire, nous définirons dans le premier chapitre les notions relatives aux EIs, nous présenterons aussi les moyens mis en place par les autorités afin de lutter contre ces EIs. Nous ferons aussi un panorama de la littérature de la modélisation des processus chirurgicaux afin de mieux comprendre comment ceux-ci sont mis en place et comment ils sont actuellement utilisés. Pour finir, nous expliquerons comment la modélisation des processus chirurgicaux peut aider dans la détection et l'analyse des EIs.

Dans le second chapitre, nous présenterons la méthode mise en place pour modéliser le déroulement de l'opération choisie, la rectopexie, et les événements indésirables qui y sont associés. L'objectif de ce chapitre est de comprendre le déroulement opératoire et d'identifier les EIs que nous sommes susceptibles de croiser dans ces chirurgies.

Dans le troisième chapitre, nous proposerons une approche combinant :

- une nouvelle méthode d'alignement de séquences chirurgicales, afin de détecter des déviations ;
- des modèles de Markov pour caractériser ces informations en fonction qu'elles soient dues à des particularités anatomiques des patients ou à l'apparition d'EIs.

Nous présenterons, dans le quatrième chapitre, une méthode de découverte de patterns et une nouvelle métrique de similarité permettant la mise en place d'une classification dans l'objectif d'identifier des comportements chirurgicaux spécifiques à l'apparition d'EIs. La méthode et la métrique seront dans un premier temps validées grâce à la comparaison avec deux méthodes de la littérature. Dans un second temps, nous l'appliquerons à nos données afin de mettre en évidence des comportements chirurgicaux spécifiques à des données préopératoires et à l'apparition EIs.

Enfin, nous discuterons des apports et des limites pour la détection et l'analyse des EIs de nos méthodes dans le chapitre 5. Puis nous conclurons, dans le chapitre 6, en présentant comment l'articulation de ces deux méthodes permettrait de mettre en place un outil de prédiction de l'apparition des EIs.

Chapitre 1

État de l'art

Dans ce chapitre, nous présenterons les notions et un panorama de la littérature relatifs aux EIs et à la modélisation des processus chirurgicaux. Pour finir, nous mettrons en évidence les travaux faisant le lien entre la modélisation des processus chirurgicaux et les EIs.

1.1 Événements indésirables

Dans le monde médical, l'identification et la compréhension des événements indésirables (situations pouvant entraîner un risque pour les patients) sont des sujets qui concernent l'ensemble de ses acteurs : patients, professionnels de la santé et services publics.

Pour cela, la HAS a mis en place une base de données de retour d'expérience (base REX). Son objectif est de recenser l'ensemble des événements porteurs de risques (EPRs) étant survenus en France. Un EPR est un événement indésirable ayant été contrôlé avant qu'il n'entraîne des dommages au patient. Ces termes seront définis en section 1.1.1. Dans le rapport d'avril 2016 [1] [1], le nombre d'EPRs déclarés entre 2007 et avril 2016 était d'environ 88 000, soit 8 800 EPRs par an. Cependant, au cours des premières années, très peu d'EPRs ont été déclarés, comme l'illustre la figure 1.1. Ceci est probablement dû au fait que le processus de déclaration était nouveau et qu'il était alors peu connu des praticiens. De plus, les données pour 2016 sont partielles, le rapport ayant été publié en avril 2016. Nous pouvons estimer le nombre d'EPRs par an à 12 000 sur la période 2009 à 2015.

1. Dernier rapport disponible au 20 juillet 2016

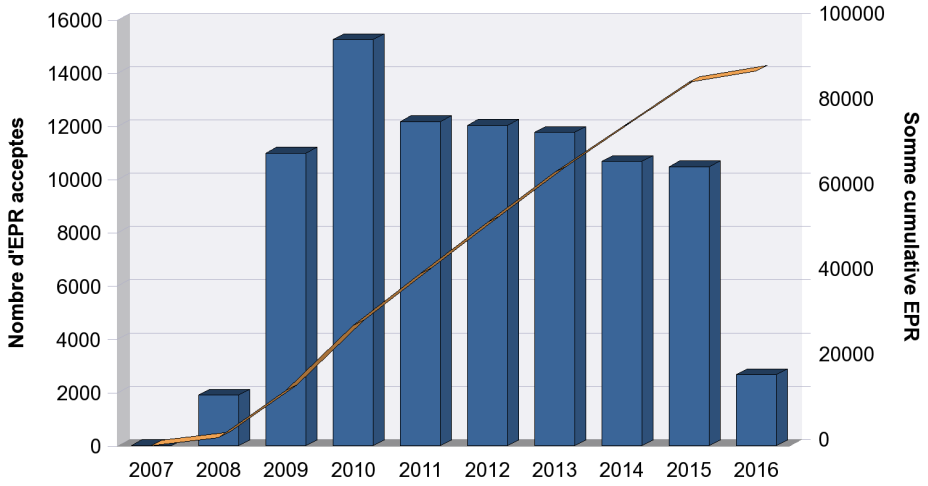


FIGURE 1.1 – Nombre d'EPRs acceptés par an au sein de la base REX.[1]

Les spécialités médicales remontant le plus d'EPRs [1] sont la chirurgie orthopédique et la traumatologie (19 059 EPRs), la chirurgie viscérale et digestive (18 859 EPRs) et la gynécologie obstétrique (18 032 EPRs). Cependant, ces chiffres sont à mettre en regard du nombre de médecins participant au processus de collecte (respectivement 2 438, 1 378 et 2 220 médecins). Le calcul du nombre d'EPRs acceptés rapportés au nombre de médecins montre que les spécialités en remontant le plus d'EPRs sur l'intervalle 2007-2016 sont :

- **la chirurgie viscérale et digestive :** 18 859 EPRs pour 1 378 médecins soit 13,69 EPRs par médecin ;
- **la chirurgie plastique reconstructrice :** 7 826 EPRs pour 691 médecins soit 11,33 EPRs par médecin ;
- **la chirurgie vasculaire :** 5 476 EPRs pour 496 médecins soit 11,04 EPRs par médecin.

Ces résultats ne signifient pas que ces spécialités commettent plus d'EPRs. En effet, afin qu'un médecin obtienne son accréditation, il doit déclarer un nombre minimal d'EPRs par an. Cependant, ce nombre varie en fonction des organismes d'accréditation [2]. Ces organismes sont agréés par la HAS pour l'accréditation et il existe un seul organisme par spécialité concernée par l'accréditation. Le tableau 1.1 montre le nombre d'EPRs que les médecins doivent fournir selon leur spécialité. On remarque que l'organisme gérant les accréditations pour la chirurgie viscérale et digestive demande au médecin de remonter au minimum trois EPRs par an, alors que l'organisme pour la chirurgie orthopédique et la traumatologie en demande au minimum un seul.

Il est donc logique que le nombre d'EPRs par médecin soit plus important pour la chirurgie viscérale et digestive que pour la chirurgie orthopédique et traumatologie.

Spécialité de l'organisme	**Nombre minimal d'EPRs par an demandés**
Anesthésie réanimation	1
Cardiologie interventionnelle	1
Chirurgie infantile	1
Chirurgie maxillo-faciale et stomatologie	2
Chirurgie orthopédique et traumatologie	1
Chirurgie plastique reconstructrice	2
Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire	2
Chirurgie urologique	2
Chirurgie vasculaire	2
Chirurgie viscérale et digestive	3
Échographie obstétricale	2
Gastro-entérologie interventionnelle	1
Gynécologie-obstétrique	2
Neurochirurgie	1
Ophtalmologie	1
ORL, chirurgie de la face et du cou	2
Réanimation médicale	1

TABLE 1.1 – Nombre d'événements porteurs de risques demandés par les organismes d'accréditation en fonction des spécialités dont ils ont la charge.

Ce rapport [1] étudie aussi les facteurs d'apparition d'EPRs, parmi lesquels on trouve les causes profondes : elles sont dues principalement à des facteurs liés à l'équipe (27,09 %), à des facteurs liés aux tâches à accomplir (22,92 %) ou à des facteurs liés au patient (16 %). Certains de ces facteurs peuvent être liés à des EPRs intraopératoires. C'est par exemple le cas des problèmes de communication entre professionnels (facteurs liés à l'équipe), des protocoles non utilisés (facteurs liés aux tâches à accomplir), ou des antécédents des patients (facteurs liés au patient).

Cette partie présentera dans un premier temps quelques définitions, afin d'expliciter les différents termes en rapport avec les EIs. Par la suite, nous verrons comment les EIs sont catégorisés. En troisième partie, nous nous intéresserons à la notion de gestion des risques dans le monde médical. Dans tout ce chapitre, nous mettrons l'accent sur les événements survenant au cours des interventions chirurgicales, puisque nous nous intéresserons exclu-

sivement aux événements intraopératoires dans la suite de la thèse.

1.1.1 Définitions

1.1.1.1 Événements indésirables

La HAS, dans le Journal de l'Accréditation des Médecins (JAM), définit les événements indésirables comme *« des situations qui s'écartent des procédures ou des résultats escomptés dans une situation habituelle et qui sont ou qui seraient potentiellement sources de dommages »* [3]. Il s'agit d'une définition vague, mais qui montre que les EIs peuvent être de nombreux types. Afin de préciser cette définition, les événements indésirables ont été séparés en deux catégories en fonction de leur gravité : on parle d'événements indésirables graves (EIGs) et d'événements porteurs de risques (EPRs).

Ces deux sous-catégories sont, elles aussi, définies par la HAS [4]. Un EIG est un *« incident préjudiciable à un patient hospitalisé survenu lors de la réalisation d'un acte de prévention, d'une investigation ou d'un traitement »*. Cette définition est aussi reprise dans le Décret N 2010-1408 du 12 novembre 2010 [5]. La différence fondamentale entre un EI et un EIG est que le second concerne uniquement les événements qui ont été préjudiciables à un patient. Par exemple, une hémorragie provenant de la section de l'aorte est un EIG.

La définition d'un EPR prend en compte la seconde partie de la définition d'un EI. Il s'agit d'un *« événement n'ayant pas engendré de conséquence grave pour le patient (« presqu'accident »), dont l'analyse méthodique favorisera la compréhension des causes de survenue »*.

Ces notions ne sont pas propres à la France, en effet l'Organisme Mondial de la Santé (OMS) propose des définitions similaires [6] (tableau 1.2). Cependant dans le reste de ce document, nous utiliserons les définitions de la HAS.

Terme OMS	Équivalent HAS
Event : any deviation from usual medical care that causes an injury to the patient or poses a risk of harm. Includes errors, preventable adverse events, and hazards	**Evénement indésirable (EI)** : situation qui s'écarte des procédures ou des résultats escomptés dans une situation habituelle et qui est ou qui serait potentiellement sources de dommages
Adverse event : an injury related to medical management, in contrast to complications of disease. Medical management includes all aspects of care, including diagnosis and treatment, failure to diagnose or treat, and the systems and equipment used to deliver care. Adverse events may be preventable or non-preventable	**Evénement indésirable grave (EIG)** : incident préjudiciable à un patient hospitalisé survenu lors de la réalisation d'un acte de prévention, d'une investigation ou d'un traitement
Potential adverse event : a serious error or mishap that has the potential to cause an adverse event but fails to do so because of chance or because it is intercepted (also called "near miss" or "close call")	**Evénement porteur de risques (EPR)** : événement n'ayant pas engendré de conséquence grave pour le patient (« presqu'accident »), dont l'analyse méthodique favorisera la compréhension des causes de survenue

TABLE 1.2 – Équivalence des termes pour les événements indésirables entre la HAS et l'OMS.

1.1.1.2 Causes

Alà la suite de l'apparition d'un EI, il est important de l'analyser afin de pouvoir en déterminer les causes. La HAS [4] distingue entre deux types de causes : les causes immédiates et les causes profondes.

Une cause immédiate est la *« cause objective la plus immédiatement liée à la survenue de l'événement indésirable, par exemple blessure peropératoire ou chute du patient »*, c'est ce qui entraîne directement la survenue d'un EI.

Il est important d'identifier l'origine des causes immédiates afin de pouvoir éviter l'apparition d'un futur EI. Cette origine est ce que l'on nomme la cause profonde, ou facteur favorisant, c'est-à-dire une *« circonstance, [un] acte ou [un] élément susceptible d'avoir participé à la naissance ou à la survenue d'un incident ou d'avoir accru le risque d'événement indésirable. Les facteurs favorisants peuvent être externes (l'établissement n'en a pas la maîtrise), liés à l'organisation (absence de protocoles acceptés), liés au personnel (problème comportemental d'une personne, absence d'encadrement, manque de collaboration ou communication insuffisante) ou liés au patient (facteur*

problématique) ».

Si nous prenons l'exemple d'une blessure peropératoire, la cause immédiate peut être un geste involontaire du chirurgien, mais une des causes profondes peut être une fatigue importante à la suite d'une garde. L'identification de cette cause, grâce à la gestion des risques, peut permettre d'affiner le temps de repos nécessaire afin d'éviter l'apparition d'une telle blessure. Bien évidemment, il s'agit ici d'un exemple simplifié à l'extrême, mais il montre que sans l'identification de la cause profonde, il est impossible d'apporter des solutions pérennes pour limiter l'apparition des événements indésirables.

Comme pour les événements indésirables, l'OMS définit les causes [6]. Le tableau 1.3 présente ces définitions avec les équivalents de la HAS.

Terme OMS	**Équivalent HAS**
Error : the failure of a planned action to be completed as intended (i.e. error of execution) or the use of a wrong plan to achieve an aim (i.e. error of planning). Errors may be errors of commission or omission, and usually reflect deficiencies in the systems of care	**Cause immédiate** : cause objective la plus immédiatement liée à la survenue de l'événement indésirable, par exemple blessure peropératoire ou chute du patient
Latent error : a defect in the design, organization, training or maintenance in a system that leads to operator errors and whose effects are typically delayed	**Cause profonde** : circonstance, acte ou élément susceptible d'avoir participé à la naissance ou à la survenue d'un incident ou d'avoir accru le risque d'événement indésirable. Les facteurs favorisants peuvent être externes (l'établissement n'en a pas la maîtrise), liés à l'organisation (absence de protocoles acceptés), liés au personnel (problème comportemental d'une personne, absence d'encadrement, manque de collaboration ou communication insuffisante) ou liés au patient (facteur problématique)

TABLE 1.3 – Équivalence des termes pour les causes entre la HAS et l'OMS.

1.1.2 Catégorisation des événements indésirables

Les événements indésirables peuvent être divisés selon leur gravité : EIGs et EPRs. Cependant, dans la littérature, les auteurs utilisent rarement cette catégorisation et préfèrent séparer les événements selon d'autres catégories : le moment d'apparition de l'EI au cours de l'hospitalisation (section 1.1.2.1), ce qui est impacté par l'EI (comme la structure anatomique ou l'équipement, section 1.1.2.2), ou encore autour des causes expliquant l'apparition de l'EI (section 1.1.2.3).

1.1.2.1 Catégorisation temporelle

Un EI peut survenir à tout moment de la prise en charge du patient au sein de l'hôpital. Il est donc pertinent de catégoriser les EIs en fonction de leur moment de survenue. Cette catégorisation peut être globale en se restreignant à l'un des trois différents moments opératoires (préopératoire, intraopératoire ou postopératoire), ou beaucoup plus fine en s'intéressant à un moment précis, par exemple l'installation des trocarts ou la phase de réveil. D'après la review de Rosenthal *et al.* [7], les articles, traitants des EIs, publiés en 2010 dans *Annals of Surgery, JAMA Surgery* et dans *the British Journal of Surgery*, utilisent en majorité une catégorisation temporelle globale.

Certains auteurs combinent une catégorisations globale et une catégorisation fine. C'est le cas de Cardin & Johanet [8] qui différencient dans les EIs intraopératoires ceux ayant lieu dans la phase de création du pneumopéritoine des autres EIs. Ce choix a été fait, car de nombreux EIs intraopératoires interviennent pendant cette phase. Sur les 4 007 chirurgies de plusieurs spécialités différentes, 23 EIs intraopératoires ont été relevés lors de la création du pneumopéritoine, alors que 30 EIs intraopératoires ont été identifiés pour le reste de l'opération. En postopératoire, ils ont relevé plus de 200 EIs.

Le tableau 1.4 montre les différents types de catégorisation temporelle dans les articles que nous avons étudiés. Cette thèse s'intéressant aux EIs intraopératoires, la recherche bibliographique a été axée sur ce point, ce qui explique que la majorité des références citées se concentre sur ceux-ci. Cependant, dans la littérature les EIs postopératoires sont beaucoup plus étudiés.

Référence	Catégorisation globale		Catégorisation fine	
	Intra	Post	Intra	Post
Cardin et Johanet [8]	x	x	x	
Chung *et al.* [9]	x	x		
Faucheron *et al.* [10]		x		
Greenstein *et al.* [11]	x			
Kaafarani *et al.* [12]	x			
Kambakamba *et al.* [13]	x			
Kheterpal *et al.* [14]		x		
Kirchhoff *et al.* [15]	x	x		
Mavros *et al.* [16]	x		x	
Morgan *et al.* [17]	x			
Nathan *et al.* [18]	x			
Rampersaud *et al.* [19]	x	x		
Samaranayake *et al.* [20]		x		

TABLE 1.4 – Catégorisation temporelle dans la littérature (Intra pour intraopératoire et Post pour postopératoire).

1.1.2.2 Catégorisation par localisation

Les EIs sont aussi souvent catégorisés en fonction de ce qu'ils impactent. Cette catégorisation peut être globale, les catégories représentent alors de grands systèmes de l'organisme. Par exemple, Kirchhoff *et al.* [15] catégorisent les EIs en lésions vasculaires, viscérales, urétrales. Cette catégorisation globale peut aussi prendre en compte des problèmes d'anesthésies ou des problèmes d'équipements, comme c'est le cas pour Greenstein *et al.* [11].

La catégorisation par localisation peut être beaucoup plus précise, allant jusqu'à spécifier exactement quelle structure anatomique est concernée et les conséquences de l'EI sur la structure. Par exemple, Faucheron *et al.* [10] ou Samaranayake *et al.* [20] font une catégorisation précise de la localisation des EIs. Ainsi, ils parlent, entre autres, d'urinomes iliaques (kystes contenants de l'urine) ou de parésies (paralysies partielles) du plexus brachial. La catégorisation par localisation est présente dans les termes décrivant l'EI, comme iliaques ou plexus brachial.

Le tableau 1.5 présente la catégorisation par localisation utilisée dans les articles précédemment cités. Certains auteurs n'utilisent pas cette catégorisation [12, 14, 17] et se contentent des autres types de catégorisation.

Référence	Catégorisation globale	Catégorisation précise
Cardin et Johanet [8]	x	x
Chung *et al.* [9]	x	x
Faucheron *et al.* [10]		x
Greenstein *et al.* [11]	x	
Kambakamba *et al.* [13]	x	x
Kirchhoff *et al.* [15]	x	
Mavros *et al.* [16]	x	
Nathan *et al.* [18]	x	
Rampersaud *et al.* [19]	x	
Samaranayake *et al.* [20]		x

TABLE 1.5 – Catégorisation par localisation dans la littérature.

1.1.2.3 Catégorisation par cause

Ce type de catégorisation qui met l'accent sur l'origine des EIs permet de connaître rapidement leurs causes immédiates ou profondes (si une analyse des causes a été faite). Cela peut aider à la mise en place de stratégies adaptées pour éviter que des EIs apparaissent à nouveau.

Cependant, très peu d'articles s'intéressent à ce type de catégorisation. Seuls Morgan *et al.* [17] l'utilisent, mais sans faire de séparations claires entre causes immédiates et causes profondes. Les auteurs ont identifié différents facteurs pouvant entraîner l'apparition d'EIs, par exemple un problème de communication, de design d'équipement ou encore de maintenance d'équipement. Le tableau 1.6 reprend les causes que Morgan *et al.* ont identifiées.

Pour nous, cette catégorisation par cause est la plus intéressante. En effet, les catégorisations temporelles et par localisation permettent de caractériser les événements indésirables, elles ne fournissent que peu d'informations pour aider à la mise en place de solutions adaptées pour limiter leur future apparition. Pour nous, savoir qu'il y a un risque d'événement indésirable concernant une structure particulière à un moment particulier de l'opération est important, mais il nous semble irréaliste de se contenter de cette information pour limiter le risque d'apparition d'un événement indésirable. En revanche, si on arrive à capturer les causes qui ont provoqué cet EI, on comprendra mieux les processus mis en jeu et ainsi, apporter une solution adaptée grâce à la gestion des risques.

Cause	Définition
Absence	Absence d'un personnel au sein de la salle d'opération
Communication	Difficulté de communication entre les membres de l'équipe opératoire
Dérapage	Erreur psychomotrice
Design d'équipement	Problème découlant de la conception de l'équipement
Distraction	Toute chose causant une distraction vis-à-vis de la tâche
Entraînement	Répétition ou attente avant d'effectuer une tâche
Environnement	Aspect de l'environnement de travail causant des difficultés
Espace de travail	Problème lié à l'espace de travail
Maintenance	Équipement défectueux ou mal entretenu
Planning et préparation	Risque qui aurait pu être évité avec un planning et une préparation appropriée
Relié au patient	Problème en relation avec le statut physiologique du patient
Santé et sécurité	Risque physique pour le personnel

TABLE 1.6 – Causes identifiées par Morgan *et al.* [17]

1.1.3 Gestion des risques

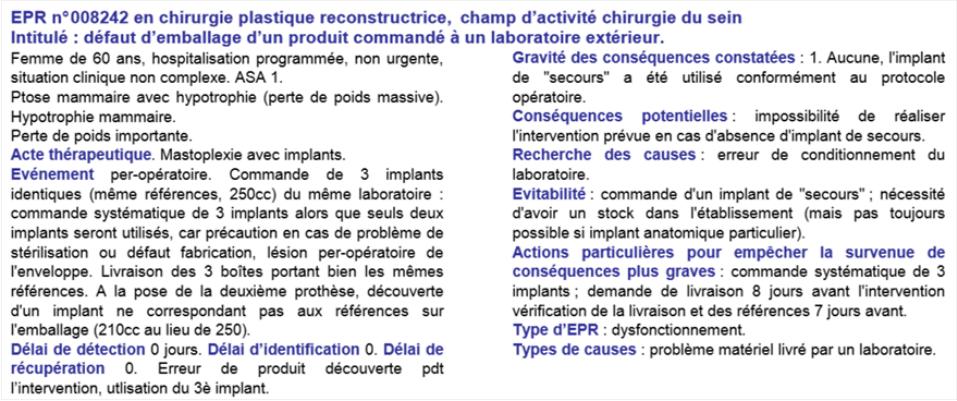
La gestion des risques a pour but d'identifier et de caractériser l'ensemble des risques relatifs aux activités d'une organisation. Elle tente, par l'analyse et par la mise en place de stratégies de gestion des risques, de minimiser l'apparition de situations présentant des risques matériels ou humains.

1.1.3.1 Identification des risques en médecine

L'identification des risques en médecine peut s'effectuer de plusieurs manières. En effet, il existe en France un grand nombre de systèmes de déclaration : les systèmes de biovigilance, de cosmétovigilance, de pharmacovigilance et de matériovigilance. Dans le cadre des EPRs, le système de déclaration est la base de données de retour d'expérience (base REX), d'où est tiré le rapport de la HAS [1] présenté en début de section 1.1. La figure 1.2 présente un exemple d'EPR ayant été déclaré dans cette base pour une chirurgie plastique.

De nombreuses études médicales montrent l'intérêt de la communauté pour l'identification des risques en médecine [10, 19, 20]. Cependant, une grande majorité de ces études se contente de répertorier les différents incidents afin de montrer la faible mortalité ou morbidité de la (ou des) technique(s) étudiée(s). Savoir qu'une technique donne de meilleurs résultats

qu'une autre est essentielle pour les différents acteurs du monde médical, cependant comprendre d'où proviennent les EIs l'est tout autant. Cette compréhension permettrait d'apporter des solutions concrètes à l'apparition de ces EIs. Ainsi, il est nécessaire de caractériser les risques afin de mieux les comprendre.



EPR n°008242 en chirurgie plastique reconstructrice, champ d'activité chirurgie du sein
Intitulé : défaut d'emballage d'un produit commandé à un laboratoire extérieur.

Femme de 60 ans, hospitalisation programmée, non urgente, situation clinique non complexe. ASA 1.
Ptose mammaire avec hypotrophie (perte de poids massive). Hypotrophie mammaire.
Perte de poids importante.
Acte thérapeutique. Mastoplexie avec implants.
Evénement per-opératoire. Commande de 3 implants identiques (même références, 250cc) du même laboratoire : commande systématique de 3 implants alors que seuls deux implants seront utilisés, car précaution en cas de problème de stérilisation ou défaut fabrication, lésion per-opératoire de l'enveloppe. Livraison des 3 boîtes portant bien les mêmes références. A la pose de la deuxième prothèse, découverte d'un implant ne correspondant pas aux références sur l'emballage (210cc au lieu de 250).
Délai de détection 0 jours. **Délai d'identification** 0. **Délai de récupération** 0. Erreur de produit découverte pdt l'intervention, utlisation du 3è implant.

Gravité des conséquences constatées : 1. Aucune, l'implant de "secours" a été utilisé conformément au protocole opératoire.
Conséquences potentielles : impossibilité de réaliser l'intervention prévue en cas d'absence d'implant de secours.
Recherche des causes : erreur de conditionnement du laboratoire.
Evitabilité : commande d'un implant de "secours" ; nécessité d'avoir un stock dans l'établissement (mais pas toujours possible si implant anatomique particulier).
Actions particulières pour empêcher la survenue de conséquences plus graves : commande systématique de 3 implants ; demande de livraison 8 jours avant l'intervention vérification de la livraison et des références 7 jours avant.
Type d'EPR : dysfonctionnement.
Types de causes : problème matériel livré par un laboratoire.

FIGURE 1.2 – Exemple d'EPR déclaré dans la Base REX.[3]

1.1.3.2 Caractérisation des risques en chirurgie

La review de Rosenthal *et al.* [7] a montré qu'il existe plusieurs classifications pour caractériser les risques en chirurgie. La grande majorité des études classifiant les EIs (24 cas sur 29) utilise la sévérité des événements comme critère. Certaines études utilisent une classification qui leur est propre ou extraite d'autres études. Cependant, 8 d'entre elles utilisent la classification de Dindo-Clavien [21, 22] (tableau 1.7). Cette classification permet de caractériser un EI en fonction du geste nécessaire à sa correction. Cette classification initialement mise en place pour la chirurgie par laparotomie a prouvé qu'elle pouvait aussi être utilisée en laparoscopie [8].

Pour résumer cette classification, il existe 5 grades de gravité. Le grade I correspond à un EI qui ne nécessite aucune intervention de la part du corps médical. Le grade II correspond aux EIs nécessitant la prescription d'agents pharmacologiques. Le grade III nécessite une nouvelle opération. Le grade IV correspond à des complications qui engagent le pronostic vital et nécessitent des soins intensifs. Et pour finir, le grade V correspond au décès du patient.

Grade	Définition
Grade I	Toute déviation du déroulement postopératoire normal sans nécessité de traitement pharmacologique ou d'interventions chirurgicales, endoscopiques ou radiologiques. Les régimes thérapeutiques permis sont les médicaments comme les antiémétiques, antipyrétiques, analgésiques, diurétiques, électrolytes et la physiothérapie. Ce grade comprend aussi les infections des plaies ouvertes au lit.
Grade II	Requiers un traitement pharmacologique avec des médicaments autres que ceux permis pour les complications de grade I. Les transfusions sanguines et une nutrition parentérale totale (c'est-à-dire l'alimentation par voie intraveineuse uniquement) sont aussi incluses.
Grade III	Nécessite une intervention chirurgicale, endoscopique ou radiologique.
Grade IIIa	Nécessite une Intervention sans anesthésie générale.
Grade IIIb	Nécessite une Intervention sous anesthésie générale.
Grade IV	Complication mettant en jeu le pronostic vital (incluant les complications du système nerveux central) [a] nécessitant une prise en charge par l'unité de soins intermédiaires ou intensifs.
Grade IVa	Dysfonctionnement d'un seul organe (incluant dialyse).
Grade IVb	Dysfonctionnement de plusieurs organes.
Grade V	Décès du patient.
Suffixe "d"	Si le patient souffre de la complication lors de sa sortie, le suffixe "d" (pour "disability") est ajouté au grade de la complication. Ce label indique la nécessité d'un suivi pour évaluer la complication.

a. Hémorragie cérébrale, accident vasculaire cérébral ischémique, saignement sous-arachnoïdien mais excluant les attaques ischémiques transitoires.

TABLE 1.7 – Traduction de la classification de Dindo-Clavien [21]. *Cette classification permet de caractériser les événements indésirables postopératoires en fonction du geste nécessaire pour les corriger.*

Parmi les 8 études utilisant la classification de Dindo-Clavien, une seule étude l'emploie pour les EIs intraopératoires alors que cette classification a été à l'origine créée pour caractériser les EIs postopératoires. Pour nous, l'utilisation de la classification de Dindo-Clavien n'est pas adaptée aux EIs intraopératoires, en effet les critères, permettant de classifier l'événement, se

réfèrent majoritairement à des gestes qui ne sont réalisables qu'après la fin de l'opération (par exemple la nutrition parentérale, une nouvelle opération ou la prise en charge par l'unité de soins intensifs).

Rosenthal *et al.* [7] affirment qu'il n'existe aucune classification pour caractériser les EIs intraopératoires. Cependant au même moment Kaafarani *et al.* [12] ont proposé une classification de ces EIs intraopératoires en adaptant la classification de Dindo-Clavien. Le tableau 1.8 présente cette classification.

Grade	**Définition**
Grade I	Blessure nécessitant des gestes chirurgicaux simples n'entraînant pas de modification de la procédure (e.g. : cautérisation, ligature de petits vaisseaux).
Grade II	Blessure nécessitant une réparation chirurgicale, sans retrait d'organe ou de changement de la procédure initialement prévue (e.g. : suture).
Grade III	Blessure nécessitant le retrait d'un tissu ou d'un organe, mais permettant l'accomplissement de la procédure initialement prévue.
Grade IV	Blessure nécessitant un changement significatif [a] et/ou l'arrêt de la procédure initialement prévue.
Grade V	Blessure intraopératoire non traitée et nécessitant une nouvelle intervention dans les 7 jours.
Grade VI	Décès intraopératoire du patient.
Suffixe T	Ajouter si la blessure nécessite une transfusion sanguine supérieure à 2 unités de sang.

a. Excepté la conversion d'une chirurgie laparoscopique en une laparotomie (chirurgie ouverte)

TABLE 1.8 – Traduction de la classification de Kaafarani *et al.* [12]. *Cette classification permet de caractériser les événements indésirables intraopératoires en fonction du geste nécessaire pour les corriger.*

Cette classification étant récente, il est encore trop tôt pour dire si elle s'imposera comme un standard, à l'instar de la classification de Dindo-Clavien [22], d'autant plus que les grades I et II semblent très proches et que le cas de la conversion d'une chirurgie laparoscopique en une laparotomie (chirurgie ouverte) n'est pas traité. Cependant grâce à sa similarité avec la classification (de Dindo-Clavien) de référence et à sa spécificité pour l'intraopératoire, il semble réaliste de penser qu'elle pourrait prendre de l'importance.

1.1.3.3 Stratégies de gestion des risques en chirurgie

La gestion des risques, quel que soit le domaine, met en place des stratégies pour limiter l'apparition ou les conséquences des risques [23]. La définition de ces stratégies est possible grâce à l'identification et à la caractérisation des risques. Plusieurs stratégies peuvent être adoptées :

- **la prévention :** des actions sont mises en place afin que le risque ne puisse pas survenir. En chirurgie, il existe de nombreux exemples de l'application de cette stratégie, c'est par exemple le cas de check-list avant une opération chirurgicale afin de s'assurer que le patient est le bon, que l'opération à effectuer est la bonne, etc. ;
- **l'acceptation :** le risque est accepté du fait des bénéfices que peut apporter cette prise de risque. C'est le propre de toute opération chirurgicale, qui par les bénéfices qu'elle peut apporter au patient est réalisée malgré les risques associés ;
- **la correction :** des actions sont mises en place afin de permettre la correction d'une erreur. C'est ce qui est réalisé lorsqu'un EI apparaît au cours de l'opération. Par exemple suite à un saignement, le chirurgien va effectuer une coagulation ;
- **le transfert :** l'organisme n'étant pas compétent pour gérer le risque, la gestion de celui-ci est transférée à une autre entité. C'est par exemple le cas lorsqu'un patient est transféré dans un autre établissement afin qu'il soit pris en charge dans les meilleures conditions possible.

Grâce à l'identification et à la caractérisation des risques en chirurgie, il a été possible de mettre en place les stratégies les mieux adaptées aux différents risques. Cependant, malgré la mise en place de stratégies adaptées, il est toujours possible que des EIs apparaissent, et il est nécessaire de les analyser pour déterminer s'ils peuvent être minimisés et/ou évités en modifiant les stratégies de gestion mises en place.

1.1.3.4 Modèle de gestion des risques

L'objectif d'un modèle de gestion des risques est de représenter les éléments mis en place pour minimiser l'apparition de situations présentant des risques matériels ou humains. Il existe différents modèles de gestion des risques. L'un des plus connus, et s'appliquant au domaine médical, est celui des plaques (ou du « fromage suisse ») mis en place par Reason [24].

Ce modèle, appliqué à la chirurgie, fait intervenir un nombre important d'acteurs comme les chirurgiens, les anesthésistes, les infirmiers et des éléments technologiques. Plus le nombre d'acteurs est important, plus il existe

des sources potentielles de risques. Cependant, ces acteurs et les stratégies de gestion de risque, présentées en section 1.1.3.3, sont à l'origine de barrières de sécurité limitant les probabilités qu'un événement indésirable survienne.

La figure 1.3 présente ce principe sous forme de plaques (c'est-à-dire les barrières de sécurité mises en place par les acteurs et les stratégies de gestion de risque) ou les trous représentent des failles dans ces plaques. Pour qu'un événement indésirable survienne, il faut que l'ensemble des failles soit aligné.

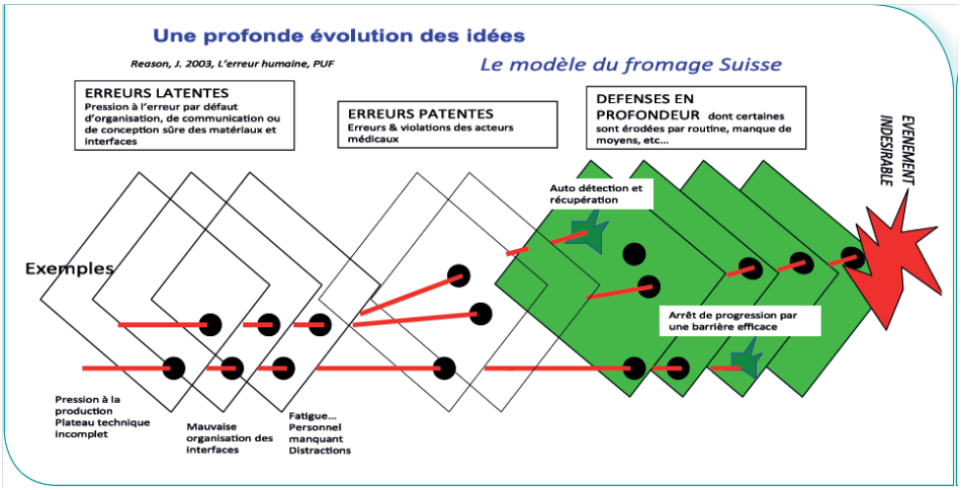


FIGURE 1.3 – Modèle des plaques de Reason appliqué à la médecine. Source HAS [4].

Le modèle de Reason se compose de 3 types de plaques. Dans le cadre de la chirurgie, celles-ci font référence :

- **aux acteurs relatifs au management, à l'organisation et à la conception** qui peuvent être à l'origine d'erreurs ne touchant pas directement le patient, mais qui facilitent les erreurs des acteurs en contact avec le patient. On parle d'erreurs latentes ;
- **aux acteurs au contact du patient** qui peuvent être à l'origine d'erreurs affectant le patient. On parle d'erreurs patentes ;
- **aux défenses en profondeur** qui ont pour rôle de bloquer, récupérer ou atténuer les effets des erreurs patentes. C'est à ce niveau que se situent les stratégies de gestion de risques.

1.1.4 Discussion

Dans cette partie, nous avons présenté différents concepts autour des EIs. La HAS et l'OMS accordent une grande importance à ces concepts et différencient ceux étant préjudiciables aux patients (EIGs) et ceux dont les

conséquences sont mineures (EPRs). De plus, ces deux institutions ont défini les notions de causes immédiates, qui expliquent le plus immédiatement l'apparition d'un événement indésirable, et de causes profondes, qui expliquent ce qui a entraîné les causes immédiates.

Dans la littérature, la distinction entre les deux types d'événements indésirables n'est pas évidente à faire, en effet les auteurs préfèrent catégoriser les événements indésirables en fonction de leur moment d'apparition ou de leur localisation. Lorsqu'un événement indésirable apparaît pendant l'opération, ils parlent d'événement indésirable intraopératoire, et d'événement indésirable postopératoire lorsqu'il apparaît après l'opération. Parmi les 13 études que nous avons retenues, seule celle de Morgan *et al.* [17] utilise une catégorisation en fonction des causes, ce qui nous permet de mieux appréhender les origines des événements indésirables.

Savoir quand et où a eu lieu un événement indésirable nous semble important, mais savoir pourquoi il est apparu nous semble plus pertinent pour en comprendre les origines et mettre en place des moyens pour en limiter les apparitions futures. Et seule une catégorisation en fonction des causes semble être apte à aider à la mise en place de tels moyens.

Afin de limiter l'apparition d'EIs et leurs conséquences, il est nécessaire de les étudier. Actuellement, ceci est réalisé manuellement par la gestion des risques qui permet de les analyser grâce à l'identification et à la caractérisation des risques. Il existe de nombreux systèmes d'identification, dont la base de retour d'expérience pour les événements porteurs de risques. La caractérisation des risques est principalement effectuée grâce à la classification de Dindo-Clavien [21] dans le cas d'événements indésirables postopératoires. Dans le cadre des événements indésirables intraopératoires, aucune classification ne s'est imposée comme une référence, cependant la classification de Kaafarani *et al.* [12], similaire à celle de Dindo-Clavien, nous semble adaptée pour caractériser les événements indésirables intraopératoires. L'analyse des risques permet de mettre en place des stratégies de gestion des risques adaptés : la prévention, l'acceptation, la correction et le transfert. Ces stratégies associées aux différents acteurs du monde médical forment un ensemble de barrières qui permet de limiter l'apparition, ou de limiter les conséquences, des événements indésirables.

Les outils, mis en place pour permettre l'identification et la caractérisation des événements indésirables, apportent un cadre pour permettre une analyse des risques. Cependant, à notre connaissance, l'ensemble de ces éléments (l'identification, la caractérisation et l'analyse) est uniquement réalisé manuellement. Ce qui, en plus d'être coûteux en temps, peut entraîner des

erreurs. Par exemple, l'identification des événements indésirable peut être sous-estimée, comme l'affirme l'article de Forster *et al.* [25]. Cet article annonce que le nombre de décès suite à un événement indésirable, estimé entre 44 000 et 98 000 par l'Institute of Medecine, est sous-estimé.

Afin de permettre une meilleure gestion des risques, il nous semble important de développer des outils qui ont la capacité d'apporter leur aide dans l'analyse et la compréhension des événements indésirables. Ces outils doivent permettre de détecter de manière automatique l'apparition des événements indésirables, mais aussi de comprendre les comportements chirurgicaux étant à leurs origines. Ceci permettrait une meilleure identification des événements indésirables et de leurs causes.

1.2 Principe de la modélisation des processus chirurgicaux

Pour permettre la mise en place d'outil de détection automatique d'événements indésirables et des causes étant à leur origine, il est nécessaire de créer un modèle qui représente les chirurgies. La modélisation des processus chirurgicaux apporte les outils nécessaires pour mettre en place un tel modèle.

Chaque procédure chirurgicale est unique, du fait des particularités anatomiques du patient, des habitudes et de l'expérience de l'équipe chirurgicale. Malgré ce caractère unique, il est possible de créer un modèle représentant un ensemble de chirurgie. C'est ce que l'on nomme les modèles de processus chirurgicaux (SPMs pour Surgical Process Models).

L'objectif de ces SPMs est de formaliser la connaissance chirurgicale afin de mieux comprendre le contexte et le déroulement d'une chirurgie. Ceci permet, entre autres, d'évaluer les compétences chirurgicales et d'assister les chirurgiens par une meilleure incorporation des systèmes de Gestes Médico-Chirurgicaux Assistés par Ordinateur (GMCAO) dans le bloc opératoire.

La review de Lalys & Jannin [26] propose une bonne vision du principe de modélisation des processus chirurgicaux. Pour mettre en place cette section, nous nous sommes donc principalement basés sur cette review, en y apportant des informations complémentaires. Sept éléments permettent la création et l'utilisation des SPMs : la modélisation, l'acquisition de données, la construction des modèles, leur utilisation, l'application finale qu'ils visent, la validation et l'évaluation. Nous détaillerons chacun de ces éléments dans les sous-parties suivantes, en commençant par la modélisation.

1.2.1 La modélisation

L'objectif de modélisation est de formaliser, à un niveau de granularité particulier, le domaine d'étude et les acteurs mis en jeu.

1.2.1.1 Domaine d'étude

La modélisation se concentre bien évidemment sur une chirurgie, mais celle-ci concerne-t-elle l'ensemble de la chirurgie, c'est-à-dire aussi bien le préopératoire que le peropératoire et le postopératoire ? Ou simplement, ce qui se déroule au sein du bloc opératoire ? Concerne-t-elle l'ensemble des chirurgies, ou bien une spécialité particulière, ou une chirurgie particulière au sein de cette spécialité ? Concerne-t-elle une technique particulière ou plusieurs techniques ? C'est à tout cela que doit répondre le choix du domaine

d'étude. Les choix sont multiples, mais il est nécessaire de les faire en fonction de l'objectif de la modélisation. En effet si l'objectif est de mettre en évidence des différences entre deux procédures chirurgicales, il ne semble pas pertinent de modéliser l'ensemble des chirurgies faites par une spécialité.

En pratique, les SPMs présents dans la littérature s'intéressent à une ou deux opérations au sein d'une spécialité chirurgicale. Le tableau 1.9 donne un aperçu des spécialités ayant fait l'objet d'une modélisation.

Domaine	**Exemples**
Chirurgie oculaire	[27–30]
Traumatologie	[31, 32]
Laparoscopie	[33–49]
Neurochirurgie	[27, 29, 50–53]

TABLE 1.9 – Domaines principaux étudiés par les SPMs.

De nombreuses publications concernent la chirurgie laparoscopique, ceci s'explique par le fait que celles-ci sont filmées, donc les données sont plus facilement accessibles aux chercheurs. Les chirurgies laparoscopiques sont aussi de plus en plus pratiquées, car elles présentent de nombreux avantages pour le patient : meilleur rétablissement postopératoire, douleurs moindres, avantages cosmétiques.

1.2.1.2 Granularité de modélisation

Il s'agit de déterminer le niveau de complexité utilisé lors de la modélisation. S'agit-il d'une étude globale ayant pour but de décrire le passage d'un patient entre les différents services hospitaliers de son entrée jusqu'à sa sortie ? Ou bien de décrire de manière plus précise les gestes physiques effectués par le chirurgien pendant l'opération ?

Cette notion de granularité a été apportée par l'équipe de MacKenzie au cours d'une série de publications [37, 41, 47]. Dans laquelle ils ont décomposé la procédure en différents niveaux : la procédure, l'étape, la sous-étape, la tâche, la sous-tâche et le mouvement. Chaque niveau peut être décomposé en un ensemble du niveau inférieur.

Cette première décomposition a été étoffée au fur et à mesure des publications. Pour notre part, nous utiliserons la granularité définie par Jannin *et al.* [51, 52] étendue par la suite par la mise en place d'une ontologie [54]. Les différents niveaux de granularité sont : la procédure, la phase, l'étape et l'activité. La procédure correspond à l'ensemble de la chirurgie. Les phases, aussi nommées temps chirurgicaux, représentent un ensemble d'étapes effectuées dans un but précis. Les étapes sont un niveau décrivant l'essence d'un

ensemble d'actions élémentaires qui visent à réaliser un objectif qui a un sens fonctionnel. Les activités sont les actions élémentaires décrivant le geste physique réalisé et sont décrites par une action qui est effectuée sur une cible à l'aide d'un instrument.

Cette notion d'activité est actuellement en train d'évoluer afin de permettre l'intégration de la notion de gestes dans une ontologie. Ces gestes, nommés surgemes [40, 48], ont une notion sémantique, par exemple "attraper l'aiguille" et sont composés de dexemes. Un dexeme [55] est une représentation numérique ne possédant aucun objectif et aucune sémantique. Un dexeme peut être "aller tout droit" ou bien "tourner à gauche".

Le tableau 1.10 présente les niveaux de granularité utilisés dans la littérature à partir des définitions précédemment présentées. Dans le cas des activités, bien que la définition soit en train d'évoluer, nous avons conservé la définition de l'ontologie [54] utilisée au début de cette thèse.

Granularité	**Définition**	**Exemples**
Dexeme	Représentation numérique ne possédant aucun objectif ni sémantique	[48]
Surgeme	Geste chirurgical avec une notion sémantique	[40]
Activité	Action élémentaire décrivant le geste physique réalisé	[27–29, 31, 37, 42, 45, 47, 50, 56, 57]
Etape	Ensemble d'activités visant à réaliser un but qui a un sens fonctionnel	[30, 35, 36, 38, 39, 51–53]
Phase	Ensemble d'étapes effectuées dans un but précis	[33, 44, 49]
Procédure	Chirurgie dans son ensemble	[32, 46, 58]

TABLE 1.10 – Niveaux de granularité (du plus fin au plus général) et leurs définitions dans la littérature.

Dans ce tableau, nous avons rattaché chaque article à la granularité la plus fine utilisée pour la modélisation, mais certaines publications s'intéressent à différents niveaux de granularité. C'est par exemple le cas de [47] qui s'intéresse à la fois aux activités et aux étapes, ou encore de [29, 37] qui s'intéressent aux phases, étapes et activités.

1.2.1.3 Acteurs

Les acteurs sont les personnes ou les instruments (un robot par exemple) qui sont à l'origine de ce que l'on étudie. Par exemple lorsqu'on modélise des

activités, nous pouvons choisir de modéliser celles effectuées par le chirurgien ou par d'autres membres du corps médical comme les infirmiers ou les anesthésistes.

Le tableau 1.11 présente les différents acteurs étudiés dans la littérature.

Acteurs	**Exemples**
Patient	[31, 53, 58]
Outil	[41]
Chirurgien	[27–31, 33–45, 47–52, 56, 57]
Personnel médical	[32, 46, 58]

TABLE 1.11 – Répartition des acteurs étudiés dans le contexte de la modélisation dans la littérature.

1.2.1.4 Formalisation

Une fois ces connaissances explicitées, il est nécessaire de représenter ces informations. C'est là qu'intervient la notion de formalisation. La représentation peut être plus ou moins formelle selon les cas, allant de la simple liste non séquentielle à l'ontologie en passant par différents degrés de formalisme. Le tableau 1.12 présente ces différents niveaux de formalisation du plus informel, au plus formel, avec des exemples non exhaustifs de publications.

Formalisation	Explication	Exemples
Liste non séquentielle	Liste des différents événements, sans relations entre eux.	[40, 43]
Liste séquentielle	Liste décrivant de manière séquentielle différents événements, mais sans prendre en compte les conditions de passage d'un événement à un autre, ni les cardinalités pouvant exister.	[30, 33, 46, 58]
Graphe d'état	Représentation faisant le lien entre différents états avec prise en compte des conditions pour passe d'un état à l'autre.	[35, 44]
Décomposition hiérarchique	Décomposition de la procédure en différents concepts. Chaque concept est de nouveau décomposé.	[29, 41, 50]
Diagrammes UML	Représentation graphique des relations entre différentes entités. Il existe différents types de diagrammes (de classe, de communication, cas d'utilisation) permettant de représenter différents aspects.	[28, 42, 51, 52]
Ontologie	C'est un ensemble structuré de concepts représentant un domaine de connaissances. Il existe de nombreuses contraintes et des inférences au sein d'une ontologie.	[54, 57]

TABLE 1.12 – Différents niveaux de formalisation (du moins formel, au plus formel).*Les définitions sont extraites de Lalys & Jannin [26]*

1.2.2 L'acquisition des données

Il s'agit de la collecte des données permettant l'utilisation du modèle. Ces données peuvent aussi être utilisées lors de la validation du modèle. Cette acquisition est caractérisée par quatre éléments centraux : la granularité des données recueillies, la source à partir de laquelle elles sont collectées, le moment où elles sont enregistrées, ainsi que les moyens pour les enregistrer.

1.2.2.1 Granularité d'acquisition

Il s'agit ici du niveau de complexité dans lequel les données sont enregistrées. Pour l'acquisition, on retrouve les mêmes niveaux de granularité, que pour la modélisation : activité, étape, phase et procédure. Dans ce cas, les données sont labélisées. Cependant, une majorité de la littérature concerne des données avec un niveau beaucoup plus élémentaire comme les vidéos, des

images, des trajectoires ou encore la présence ou l'absence d'un instrument. C'est-à-dire des données basées signal. Le tableau 1.13 présente les différents niveaux de granularité des données utilisées dans la littérature.

Granularité		**Exemples**
Labellisation	Procédure	[46]
	Phase	[41, 45]
	Étape	[41]
	Activité	[27, 28, 41, 42, 50, 56, 57]
Signal	Vidéo/image	[29, 30, 32, 35, 38, 44, 45, 47, 49, 51, 52, 58]
	Trajectoire	[34, 37, 38, 40, 43, 48]
	Présence/absence d'instrument	[31, 33, 36, 44, 45]

TABLE 1.13 – Niveaux de granularité des données (du plus global au plus précis) dans la littérature.

1.2.2.2 Acteurs à l'origine des données

Chaque acteur intervenant au cours d'une intervention peut être à l'origine de données. Pour une utilisation particulière, il n'est pas forcément nécessaire d'acquérir les données de l'ensemble des acteurs dont le processus a été modélisé. Le tableau 1.14 présente les différentes sources de données utilisées dans la littérature.

Source	**Exemples**
Patient	[31, 51–53, 58]
Personnel médical	[31, 32, 46, 58]
Chirurgien	[27, 28, 30, 34, 35, 37, 38, 41–43, 48–50, 56]

TABLE 1.14 – Acteurs à l'origine des données acquises dans la littérature.

1.2.2.3 Temps chirurgical concerné par l'acquisition des données

Le temps chirurgical pendant lequel les données sont acquises est lui aussi important, car certaines informations ne peuvent être recueillies qu'à des instants précis d'une opération. Par exemple, il est impossible de connaître les résultats à long terme d'une chirurgie avant que celle-ci ne soit finie. L'acquisition peut concerner des données :

préopératoire : les informations consistent alors en l'état de santé du patient avant l'opération, sur l'état de fatigue et de stress du personnel médical ;

intraopératoire : les informations recueillies se concentrent sur le déroulement de l'opération. C'est le plus courant dans la littérature ;

postopératoire : les informations portent sur les résultats à court ou long terme de la chirurgie ;

périopératoire : les informations recueillies concernent l'ensemble de la chirurgie, c'est-à-dire autant ce qui se déroule avant, que pendant et après l'opération.

Le tableau 1.15 présente les différents cas dans la littérature.

Temps chirurgical	**Exemples**
Préopératoire	[51–53, 56]
Intraopératoire	[27–30, 32, 34–40, 42, 44, 45, 47, 49, 50, 57, 58]
Postopératoire	[41, 43]
Periopératoire	[31, 46]

TABLE 1.15 – Temps chirurgicaux concernés par l'acquisition des données dans la littérature.

1.2.2.4 Moyens d'acquisition

On trouve dans la littérature deux façons d'acquérir les données, manuellement grâce à l'intervention d'un observateur humain, ou automatiquement grâce à des capteurs.

Acquisition manuelle par observateur

L'acquisition manuelle par observateur peut soit se faire pendant l'opération directement dans la salle d'opération, soit a posteriori grâce à l'utilisation de vidéos. Les deux solutions ont leurs avantages et leurs inconvénients.

L'acquisition a posteriori permet de prendre du recul vis-à-vis de ce qui s'est déroulé pendant la chirurgie, principalement grâce à la connaissance du volet postopératoire. La précision d'annotation est aussi meilleure, car le déroulement opératoire peut être interrompu ou visionné plusieurs fois. Elle permet aussi, principalement pour les études sur la laparoscopie, de prendre en compte exactement le champ opératoire vu par le chirurgien pendant l'intervention. Cependant, une vidéo ne permet pas forcément de prendre en

compte l'ensemble des paramètres. Par exemple, il est très compliqué avec une vidéo de déterminer l'état émotionnel de l'équipe chirurgicale, ou tout simplement de prendre en compte ce qui ne se déroule pas dans le champ de vision de la caméra.

L'acquisition par observateur directement en salle d'opération permet en partie de compenser les problèmes de l'enregistrement a posteriori, en donnant la possibilité à l'observateur d'interpréter l'ensemble des éléments survenant dans le bloc opératoire, en autorisant un repositionnement de l'observateur en cas de champ de vision occlus par un membre de l'équipe chirurgicale. Cette solution offre aussi la possibilité à l'observateur d'interagir avec le personnel médical, ce qui peut lui permettre de mieux appréhender les éventuels événements qu'il rencontre pour la première fois. Cependant, cette solution présente aussi des désavantages, la marge de manoeuvre de l'observateur étant contrainte par des préoccupations d'asepsie. L'observateur peut aussi être distrait par un événement autre que ceux qui l'intéressent, par exemple un appel téléphonique reçu au bloc. La précision temporelle est aussi moins bonne, puisqu'il est impossible d'interrompre le déroulement opératoire pour raffiner ou corriger l'annotation. De plus, la présence d'une tierce personne peut altérer la procédure normale.

Les inconvénients principaux de la méthode par observateur, que ce soit a posteriori ou en direct, sont que celui-ci doit posséder une bonne connaissance clinique et que l'acquisition des données est soumise à sa subjectivité. De plus lorsqu'il y a de nombreux acteurs dont on désire prendre en compte les informations, par exemple l'ensemble du personnel médical, l'enregistrement est impossible en direct et reste compliqué à partir de vidéos.

Neumuth *et al.* [42] ont comparé ces deux types d'enregistrements par observateurs. Bien que les différences ne soient pas significatives, ils recommandent l'utilisation de l'enregistrement a posteriori en cas de besoin d'une bonne précision de la capture des différents événements. S'il est nécessaire d'avoir de meilleures flexibilité et efficacité, ils recommandent l'enregistrement en direct.

Acquisition automatique par capteurs

Les capteurs permettent d'extraire l'information directement de la salle opératoire, sans faire appel à la subjectivité personnelle. Dans la littérature, de nombreux capteurs sont utilisés : des accéléromètres, des systèmes de monitoring du patient pour obtenir des informations sur les signes vitaux, des informations provenant directement d'un assistant robotique, etc.

L'inconvénient majeur de ces capteurs réside dans l'altération potentielle de la procédure chirurgicale pour les utiliser. C'est par exemple le cas pour

les systèmes d'eye-tracking qui nécessitent que le chirurgien porte un casque soutenant le système, ou bien l'ajout d'un émetteur-récepteur posé en face du chirurgien.

Le tableau 1.16 présente les différents moyens d'enregistrement utilisés dans la littérature.

Moyen d'enregistrement		**Exemple**
Observateurs	Direct	[27, 28, 42, 50, 58]
	A posteriori	[29, 33, 34, 36, 37, 41, 42, 44, 45, 47, 49, 51–53, 56]
Capteurs	Accéléromètre	[34]
	Eye-tracking	[37, 38]
	Monitoring du patient	[46, 58]
	RFID	[59]
	Robot	[39, 40, 48]

TABLE 1.16 – Moyens d'enregistrement des données dans la littérature.

1.2.3 Construction des modèles de processus chirurgicaux

Les SPMs sont divisés en deux types, chacun permettant des analyses différentes :

- **les modèles individuels de processus chirurgicaux (iSPMs) :** un iSPM décrit le déroulement chirurgical mis en place par les acteurs pour une chirurgie donnée, il s'agit de la représentation obtenue suite à l'acquisition des données. Il n'existe pas deux iSPMs identiques ;
- **les modèles génériques de processus chirurgicaux (gSPMs) :** un gSPM représente l'ensemble des chemins théoriquement possibles pour atteindre un but en s'affranchissant des particularités dues aux patients et aux équipes chirurgicales. Au contraire d'un iSPM, un gSPM ne représente donc pas une opération réelle.

Pour construire un gSPM, la première étape consiste à construire un iSPM pour chacune des chirurgies, à partir des données brutes (vidéo ou signaux de capteurs) et d'un vocabulaire. Ces iSPMs sont alors agrégés entre eux pour former un gSPM. Pour cette agrégation, il est possible d'utiliser différentes techniques comme des modèles de Markov [60], les techniques de déformation temporelle dynamique (DTW pour Dynamic Time Warping) [61], ou encore des méthodes de recherche de patterns.

Un gSPM est représenté sous la forme d'un graphe, où à partir d'un état plusieurs chemins sont possibles.

La figure 1.4 montre le processus pour créer un gSPM. Dans cet exemple, nous pouvons voir que l'ensemble des chirurgies commence par l'état A. Cet état est suivi dans deux cas par l'état B et dans un cas par l'état C, et ainsi de suite. Il est alors possible de connaître les probabilités de passer d'un état à un autre.

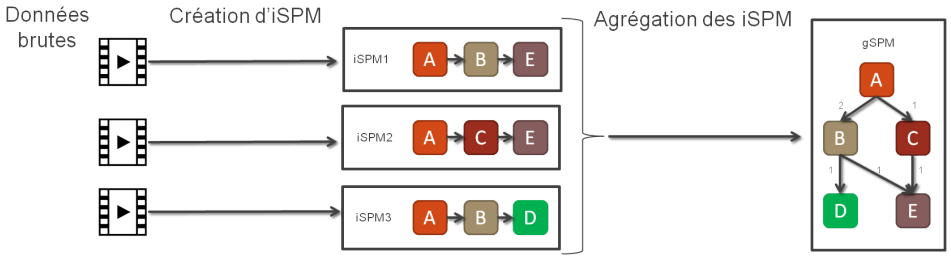


FIGURE 1.4 – Processus de création d'un gSPM.

1.2.4 Utilisation des modèles de processus chirurgicaux

Les SPMs peuvent être utilisés pour différents objectifs : la reconnaissance automatique de nouvelles chirurgies (section 1.2.4.1), la comparaison et la classification (section 1.2.4.2) et la prédiction (section 1.2.4.3).

1.2.4.1 Reconnaissance automatique de modèles individuels de processus chirurgicaux

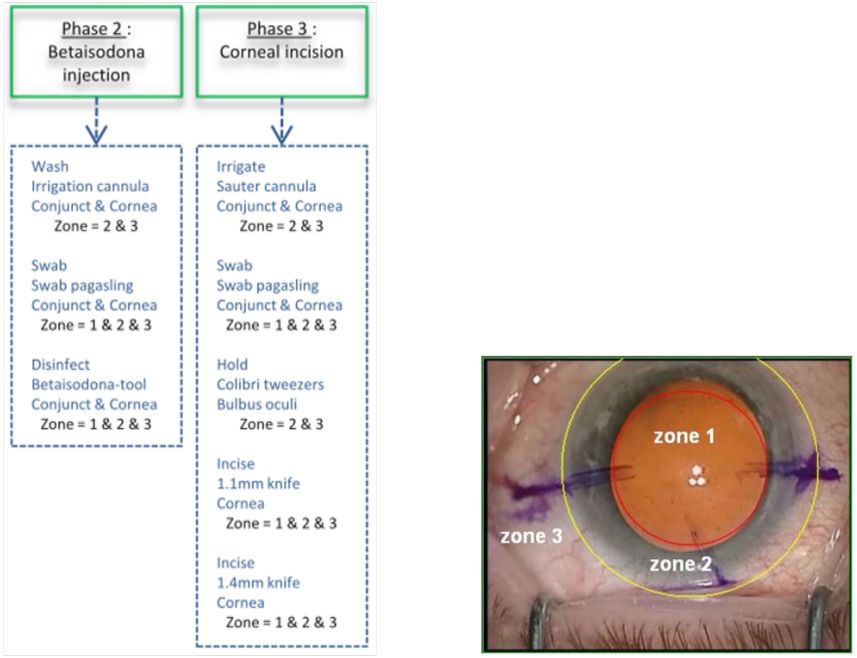
Ces méthodes ont pour objectif de reconnaître automatiquement les phases, étapes, actions ou surgemes d'un nouvel iSPM grâce à un gSPM précédemment créé. Il s'agit du type d'utilisation la plus courante, parmi les 28 publications retenues traitant des SPMs, 16 ont cette utilisation [29, 30, 32–36, 38–40, 43–45, 48, 49, 57].

À titre d'exemple, Lalys *et al.* [29] utilisent un gSPM pour reconnaître automatiquement les activités d'une chirurgie de la cataracte. Dans un premier temps, une base d'apprentissage a été constituée grâce à l'annotation manuelle de l'ensemble des vidéos à leur disposition au niveau de granularité des activités (composé du triplet <verbe d'action, outil, structure anatomique>). Grâce à cette annotation, ils ont créé un gSPMs. Ce gSPMs a mis en évidence que la majorité des activités étaient spécifiques à une ou deux phases (figure 1.5a). Cette constatation a permis d'insuffler des connaissances a priori dans le modèle de reconnaissance en contraignant les choix d'activités

possibles à chaque phase. Afin de permettre la reconnaissance des activités, ils se sont basés sur la reconnaissance automatique du type d'outil présent et de la structure anatomique subissant l'action. Ils n'ont pas pris en compte le verbe d'action du fait de la difficulté de l'identifier et de le classifier.

Les outils ont été détectés en considérant que ces derniers avaient une couleur différente du fond. Pour ce faire, un masque binaire, dont les deux plus grandes composantes 8-connexes représentent les outils, a été obtenu en appliquant différents opérateurs morphologiques. Pour classifier les instruments, les auteurs ont utilisé une méthode de sac de mots visuel.

Les structures anatomiques ont été détectées par utilisation de la couleur et de connaissances a priori. En effet, la pupille est un rond de couleur jaune-orangé entouré par l'iris qui a une couleur grise et le reste de l'image est principalement blanc. Ces trois zones sont très visibles sur la figure 1.5b.



(a) Extrait des relations entre phases et actions.

(b) Représentation des zones anatomiques de l'œil. Zone 1 : pupille, zone 2 : iris, zone 3 : fond de l'image.

FIGURE 1.5 – Connaissance a priori permettant la reconnaissance automatique d'actions dans la chirurgie de la cataracte. Figures extraites de Lalys *et al.* [29]

Afin d'identifier les actions, une machine à vecteur de support (SVM) a été utilisée. Les auteurs obtiennent un taux de reconnaissance image par

image de 64,5 %. Ceci peut sembler faible, mais il faut bien prendre en compte que seulement deux des trois composants d'une activité ont été utilisés.

1.2.4.2 Comparaison et classification des modèles de processus chirurgicaux

La seconde utilisation la plus courante des modèles de processus chirurgicaux est la comparaison et la classification.

Comparaison et classification de modèles génériques de processus chirurgicaux

L'objectif de la comparaison et de la classification à partir de gSPM est de mettre en évidence des différences entre des techniques chirurgicales ou des populations (de chirurgiens ou de patients). L'intérêt d'utiliser des gSPMs est de ne pas prendre en compte les spécificités propres à une opération particulière [28, 37, 46].

Neumuth *et al.* [28] comparent, en utilisant le temps et la probabilité de transition comme métriques, deux gSPMs de la chirurgie de la cataracte selon qu'elle est réalisée en ambulatoire, c'est-à-dire que la sortie du patient a lieu le jour même de l'opération, ou avec hospitalisation. La création des gSPMs a été réalisée grâce à 49 iSPMs de chirurgies ambulatoires et 53 iSPMs de chirurgies avec hospitalisation.

La figure 1.6 représente le gSPM pour la phase d'excision de la capsule pour la chirurgie ambulatoire (à gauche) et avec hospitalisation (à droite). Seules les transitions présentes dans plus de 5 % des cas sont représentées. Graphiquement, nous pouvons clairement voir une différence entre ces deux gSPMs. La chirurgie ambulatoire semble être plus linéaire que celle avec hospitalisation. Les auteurs ont aussi montré que le temps de réalisation de la phase d'excision est significativement plus court pour la chirurgie ambulatoire ($1min28 \pm 0min28$ vs. $2min48 \pm 1min11$; $p<0.001$).

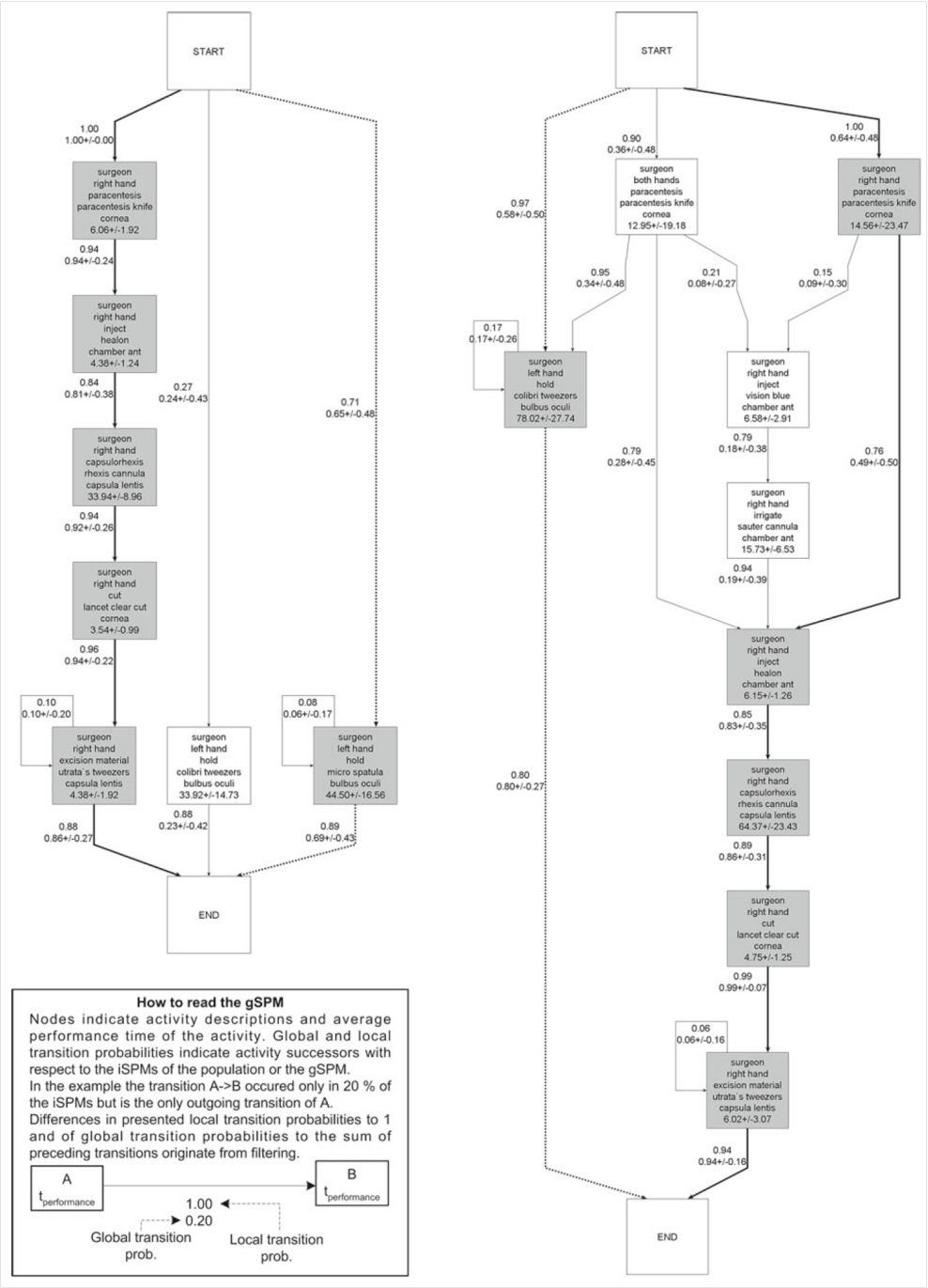


FIGURE 1.6 – Représentation de 2 gSPMs pour la phase d'excision de la capsule pour la chirurgie de la cataracte en ambulatoire (gauche) et avec hospitalisation (droite).[28]

Comparaison et classification de modèles individuels de processus chirurgicaux

Des comparaisons et des classifications peuvent aussi être faites à partir d'iSPM. Dans ce cas, l'objectif est de mettre en évidence des comportements chirurgicaux spécifiques à des populations.

C'est le cas de l'étude de Forestier *et al.* [50], où les auteurs utilisent une distance DTW comme critère pour permettre la classification de 41 chirurgies du rachis par voie antérieure réalisées par plusieurs chirurgiens de trois sites. Les auteurs ont réussi à classifier ces chirurgies en fonction du site chirurgical, de l'expertise et du chirurgien. Nous reviendrons en détail sur cette étude dans le chapitre 4.

1.2.4.3 Nature prédictive des modèles de processus chirurgicaux

Grâce à un gSPM ou à un ensemble d'iSPMs, il est possible de prédire la prochaine activité [62], ou la meilleure approche chirurgicale [52].

Forestier *et al.* [62] proposent une méthode, dérivée de l'algorithme DTW, afin de permettre un alignement partiel d'une chirurgie en cours sur une chirurgie dont on connaît l'ensemble des activités. L'alignement entre deux chirurgies consiste à les synchroniser en modifiant la durée des activités pour que les chirurgies aient toutes deux la même durée totale, ce qui permettra de les comparer. La Figure 1.7, extraite de Forestier *et al.* [62], représente la différence entre un alignement total et un alignement partiel. À la différence de l'alignement total, l'alignement partiel permet de définir la position optimale d'alignement, notée l' sur la figure 1.7, ce qui permet d'obtenir de comparer le processus en en cours à une partie similaire du processus de référence et non à la totalité de ce dernier. La position optimale d'alignement est déterminée par la distance DTW.

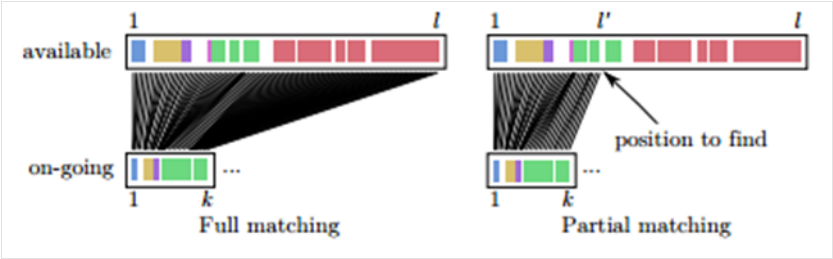


FIGURE 1.7 – Illustration de la différence entre un alignement total (gauche) et un aliment partiel (droite). Source :Forestier *et al.* [62].

Cet alignement partiel est fait entre une chirurgie en cours de réalisation et un ensemble d'iSPMs pour lesquels toutes les activités sont connues. La prochaine activité est déterminée grâce à la prochaine activité des iSPMs. Une prédiction n'est réalisée que si au moins 50 % des iSPMs ont la même activité. Avec cette méthode, les auteurs arrivent à prédire les activités dans 85 % des cas avec une bonne prédiction dans 95 % d'entre eux.

1.2.5 Applications cliniques visées par les modèles de processus chirurgicaux

Les SPMs peuvent enrichir diverses applications cliniques en fournissant des informations sur l'activité (ou la phase, ou l'étape) en cours. On trouve des exemples dans les domaines de : l'apprentissage, l'évaluation de l'expertise, l'optimisation du bloc opératoire, l'aide à la chirurgie, l'assistance robotique et l'évaluation des techniques et des systèmes.

Ces différentes applications sont détaillées dans les sous-sections suivantes et le tableau 1.17 fait un lien entre les applications et la littérature.

Application	**Exemple**
Apprentissage et évaluation de l'expertise	[40, 47, 50]
Optimisation du bloc opératoire	[32, 44, 46, 58]
Aide à la chirurgie	[29, 31, 33–36, 38, 45, 51–53, 57]
Assistance robotique	[39, 43]
Evaluation de techniques et de systèmes	[27, 28, 37, 41, 42, 56]
Qualité chirurgicale	[63]

TABLE 1.17 – Applications dans la littérature.

1.2.5.1 Apprentissage et évaluation de l'expertise

L'apprentissage chirurgical, se basant principalement sur le principe du compagnonnage [64], est long et nécessite de la pratique. Cependant, du fait de la dangerosité d'une grande partie des gestes, il est impossible pour les novices de s'exercer directement sur un patient. C'est pourquoi des simulateurs ont été mis en place. Afin que l'apprentissage soit le plus efficace possible, il est nécessaire que les simulateurs soient aux plus proches de la réalité. Ainsi, les SPMs, de par leur description du déroulement opératoire, peuvent permettre à ces simulateurs de s'appuyer sur de vraies opérations afin de fournir

des scénarios déjà rencontrés ou plausibles. C'est ce que propose le projet S3PM [65].

De la même manière que pour l'apprentissage, l'évaluation de l'expertise est importante. Cette évaluation peut marquer la fin de la phase d'apprentissage ou bien les progrès au cours de celle-ci. Un simulateur peut permettre l'évaluation d'une expertise en proposant au chirurgien un scénario à résoudre. L'évaluation peut aussi être faite en comparant les résultats d'une opération à une pratique générique. Dans les applications d'évaluation de l'expertise, les SPMs peuvent mettre en évidence des comportements chirurgicaux différents en fonction du niveau d'expertise [50].

Les articles proposant d'utiliser les SPMs pour ce type d'application sont : [40, 47, 50]

1.2.5.2 Optimisation du bloc opératoire

L'objectif dans ce type d'applications est de maximiser l'utilisation des ressources qu'elles soient humaines ou matérielles, afin de permettre de les assigner au moment précis où elles sont nécessaires pendant les opérations. Cette application voit son utilité dans un contexte médico-économique où le personnel médical est de plus en plus restreint et la population de plus en plus vieillissante. Les SPMs, grâce à des méthodes de reconnaissance automatique de procédure chirurgicale (section 1.2.4.1) peuvent aider à déterminer à quel moment un système est utile à l'intervention, ainsi leur utilisation peut permettre une meilleure gestion des ressources et donc des coûts.

Les SPMs peuvent aussi permettre de comparer différentes techniques chirurgicales ou méthodes de management des ressources. Par exemple, Sandberg *et al.* [46] comparent, en utilisant des SPMs, la durée moyenne des opérations réalisées dans le cadre de l'utilisation d'une salle opératoire standard et celle dans le cadre de la salle opératoire du futur, qui associant une salle d'opération, une salle d'induction (salle où a lieu la préparation d'un patient) et une salle de réveil temporaire. Ils ont mis en évidence que la durée totale de l'opération dans salle opératoire du futur était réduite, passant de 156 min à 118 min. En combinant une telle salle avec la reconnaissance des SPMs, il est envisageable de préparer le patient suivant dans la salle d'induction avant que l'opération en cours soit entièrement finie.

1.2.5.3 Aide à la chirurgie

Le principe des systèmes d'aide à la chirurgie est d'aider le chirurgien à effectuer un geste. Par exemple, il existe des systèmes de réalité augmentée pouvant être utilisés dans le bloc opératoire [66] permettant de superposer de

l'information sur les images réelles. Les SPMs, grâce à reconnaissance automatique (section 1.2.4.1), peuvent fournir de l'information sur le déroulement de l'opération à de tels systèmes afin que l'aide qu'ils apportent soit adaptée à la situation courante. De nombreux articles proposent ce type d'application pour leur méthode de reconnaissance d'iSPMs [29, 31, 33–36, 38, 45, 51–53, 57], cependant il n'existe pas d'application réelle de cette interaction entre SPMs et système de GMCAOs.

1.2.5.4 Assistance robotique

L'assistance robotique a pris un véritable essor au cours des dernières années, du fait du gain de temps et de précision que les systèmes robotiques peuvent apporter. L'utilisation des SPMs peut contribuer à rendre ces assistances robotiques plus performantes. Ko *et al.* [39] utilisent un SPM afin de faciliter le contrôle vocal d'un assistant robotique. Nõmm *et al.* utilisent les SPMs afin de déterminer les activités du chirurgien afin qu'un infirmier robotique fournisse au chirurgien l'instrument dont le chirurgien a besoin.

1.2.5.5 Évaluation des techniques et des systèmes

L'évaluation des techniques et des systèmes est essentielle afin de déterminer quels sont ceux qui permettent le meilleur bénéfice médical. Les SPMs peuvent fournir un contexte standardisé afin de comparer deux systèmes différents. Cette comparaison grâce aux SPMs peut permettre de comparer les techniques selon le déroulement et la durée de l'opération. Les articles proposant d'utiliser les SPMs pour ce type d'application sont : [27, 28, 37, 41, 42, 56]

1.2.5.6 Qualité chirurgicale

Les SPMs peuvent aussi participer à l'amélioration de la qualité chirurgicale en fournissant de l'information sur les déviations au sein d'un processus. C'est par exemple le cas de l'article de Bouarfa & Dankelman [63]. Nous reviendrons en détail sur ce type d'application dans la section 1.3.

1.2.6 Validation des modèles de processus chirurgicaux

La validation est une étape importante dans l'ensemble des points précédents : elle permet de vérifier que la méthode mise en place conduit aux résultats escomptés. La validation nécessite différents modules en commençant par une définition de l'objectif de validation, la définition des paramètres d'entrées, la mise en place d'une vérité terrain et la définition de métriques.

1.2.6.1 Objectif de validation

En théorie, tous les éléments cités précédemment peuvent faire l'objet de validation. En pratique, c'est principalement l'utilisation des SPMs qui est validée, bien que la littérature montre que la phase d'acquisition peut aussi être soumise à la validation [42].

1.2.6.2 Paramètres d'entrées

Afin de faire une validation, il est nécessaire de définir sur quel type de données elle sera réalisée. Celles-ci peuvent être de trois types :

- **la simulation de données :** les données sont créées de toute pièce à partir de simulation [36, 46]. Elles peuvent être plus ou moins proches de la réalité, tout dépend de la qualité du simulateur. L'avantage est qu'elles sont faciles à générer ;
- **l'utilisation de fantômes :** les données sont recueillies sur une représentation physique plus ou moins réaliste [31, 40, 48]. Les données ainsi obtenues sont proches de la réalité, à condition que le fantôme soit lui aussi proche de la réalité (ce qui n'est pas toujours facile à obtenir) ;
- **les données réelles :** les données proviennent directement de données cliniques. Ces données ont l'avantage d'être réalistes, mais elles peuvent être compliquées à obtenir. De plus, il est nécessaire d'effectuer les démarches nécessaires auprès des autorités comme la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL) (voir section 3.2 pour plus de détails). Comme le montre la littérature, c'est le type de données le plus souvent utilisé [28, 29, 32–35, 37, 38, 42–45, 49–53, 56–58].

Le tableau 1.18 résume les différents types de paramètres d'entrées utilisés dans la littérature.

Paramètre d'entrée	**Exemple**
Données réelles	[28, 29, 32–35, 37, 38, 42–45, 49–53, 56–58]
Fantôme	[31, 40, 48]
Simulation de donnée	[36, 46]

TABLE 1.18 – Paramètres d'entrées utilisés pour la validation.

1.2.6.3 Vérité terrain

Il s'agit de la référence qui permettra par comparaison d'effectuer la validation. Celle-ci est souvent difficile à obtenir dans le domaine des SPMs,

ainsi la vérité terrain est souvent construite à partir des données. Il est donc important de garder à l'esprit qu'il peut exister un biais.

Par exemple dans le cadre de la reconnaissance automatique d'étapes ou de phases, la vérité terrain provient d'une annotation manuelle. Les phases et les étapes ont une durée, il est donc possible que l'annotation manuelle entraîne de légères erreurs en ce qui concerne les limites temporelles des phases et des étapes.

1.2.6.4 Métriques

Les métriques les plus utilisées pour comparer un modèle à la vérité terrain sont : le taux de reconnaissance, la reproductibilité, la spécificité, la sensibilité, le rappel ainsi que le temps d'exécution. Cependant, ces métriques sont généralement trop restrictives en comparaison des besoins nécessaires dans des applications. Par exemple, nous avons vu que la méthode de reconnaissance d'activité de Lalys *et al.* [29] avait un taux de reconnaissance image par image de 64,5 % (section 1.2.4.1). Or dans le cadre d'une application, un délai peut être autorisé avant que le modèle fournisse un résultat, c'est ce que l'on nomme la tolérance autorisée. L'étude de Dergachyova *et al.* [49] met en évidence l'influence de cette tolérance. Dans la méthode de reconnaissance de phase de Dergachyova *et al.*, basée uniquement sur des informations visuelles, le taux de reconnaissance passe de 71,65 %, pour une tolérance de 15 secondes, à 77,96 % pour une tolérance d'une minute.

De plus, Dergachyova *et al.* [49] ont proposé trois nouvelles métriques, afin d'être moins restrictifs dans les résultats :

1. Le délai moyen de transition : mesure le temps de réaction du système, il correspond au temps moyen entre le moment de transition entre deux états dans la vérité terrain et dans la séquence prédite ;
2. Le niveau de bruit : mesure le pourcentage d'échantillons mal classifiés n'appartenant pas à un délai de transition, cette métrique met en avant les transitions, dans une séquence prédite, qui ne sont pas présentes dans la vérité terrain ;
3. Le coefficient de moments de transition : mesure le ratio entre le nombre de transitions dans la séquence prédite et le nombre de transitions dans la vérité terrain, cette métrique met en avant la robustesse de la méthode.

Ces métriques, celles de Dergachyova *et al.* [49] et les métriques classiques, concernent uniquement les iSPMs, en effet les gSPMs n'ayant pas de réalité physique aucune de ces métriques ne peut s'appliquer. Dans les travaux sur les gSPMs, les métriques utilisées sont extraites des iSPMs. Par exemple, dans

l'étude de Neumuth *et al.* [28], les auteurs comparent la durée des phases entre la chirurgie ambulatoire et la chirurgie avec hospitalisation. Cette durée est une durée moyenne extraite des iSPMs et non des gSPMs créés.

1.2.7 Évaluation

Alors que la validation permet de vérifier que la méthode mise en place conduit aux résultats escomptés, l'évaluation consiste à déterminer la valeur ajoutée de cette méthode, c'est-à-dire ce qu'elle apporte à la connaissance. L'évaluation présente les mêmes composantes que la validation.

En pratique, peu d'études portent sur l'évaluation, dans les publications déjà citées, seule celle de Ko *et al.* [39] propose une évaluation de son système d'interaction robot/chirurgien en utilisant des données issues de cholécystectomie de porc. La métrique qu'il utilise est le nombre de commandes vocales. Il montre que son système permet de réduire le nombre de commandes vocales données à l'assistant robotique.

1.2.8 Discussion

Dans cette partie, nous avons montré les éléments permettant la création de SPMs ainsi que leur utilisation dans la littérature. De nombreuses études présentent des méthodes de reconnaissance automatique de phases, d'étapes ou d'activités. Cette utilisation des SPMs est importante afin d'avoir une application utilisable dans une salle d'opératoire, puisqu'une acquisition automatique des SPMs est préférable à une acquisition manuelle.

Cependant, la modélisation des processus chirurgicaux peut aussi aider à la comparaison de comportements chirurgicaux ou encore à la prédiction de déroulement opératoire. Actuellement, ce type d'utilisation est principalement réalisé sur les activités composant les SPMs, mais les SPMs pourraient être utilisés afin de mieux comprendre les événements indésirables.

1.3 Modélisation des processus chirurgicaux, comportements chirurgicaux et événements indésirables

1.3.1 Détection d'événements indésirables par modélisation des processus chirurgicaux

En conclusion de leur article comparant la procédure ambulatoire avec la procédure avec hospitalisation, Neumuth *et al.* [28] émettent l'idée que comparer un iSPM à un gSPM pourrait permettre d'identifier les déviations entre une procédure particulière et la procédure générique . En effet, la création du gSPM réduit l'impact de toute succession d'activités qui s'écarte de la "norme", en limitant l'impact des particularités anatomiques des patients et de l'expérience chirurgicale. Or, les EIs étant des événements exceptionnels, les activités en découlant s'écartent de cette "norme". La comparaison entre gSPM et iSPM pourrait donc permettre de détecter les déviations dues à l'apparition d'un événement indésirable.

Dans la littérature, nous avons relevé un seul article proposant une méthode pour détecter les déviations au sein de processus chirurgicaux : l'article de Bouarfa & Dankelman [63]. À partir d'iSPMs composés uniquement des instruments utilisés, les auteurs ont créé un gSPM par une méthode d'alignement de séquences empruntée à la biologie. Les déviations d'un iSPM par rapport à ce gSPM sont détectées grâce à une méthode d'alignement global par paire. La figure 1.8, extraite de Bouarfa & Dankelman [63], illustre la détection de déviations dans une cholécystectomie (résection de la vésicule biliaire). Les déviations sont mises en avant par l'absence de correspondance entre l'iSPM (séquence du bas) et le gSPM (séquence du haut).

Dans la figure 1.8, les auteurs identifient deux déviations, entourées en bleu sur l'iSPM. La première déviation (AAARCCRCRYY) est constituée de 3 utilisations de l'instrument permettant de poser des clips (AAA), suivies d'une utilisation des ciseaux (R), de deux utilisations de la pince de dissection (CC), de nouveau de l'utilisation des ciseaux entrecoupée par l'utilisation de la pince de dissection (RCR) et pour finir de la manipulation a deux reprises de l'endobag (YY), sac utilisé pour retirer la partie anatomique sectionnée. La seconde déviation consiste en l'utilisation de la pince de préhension (T).

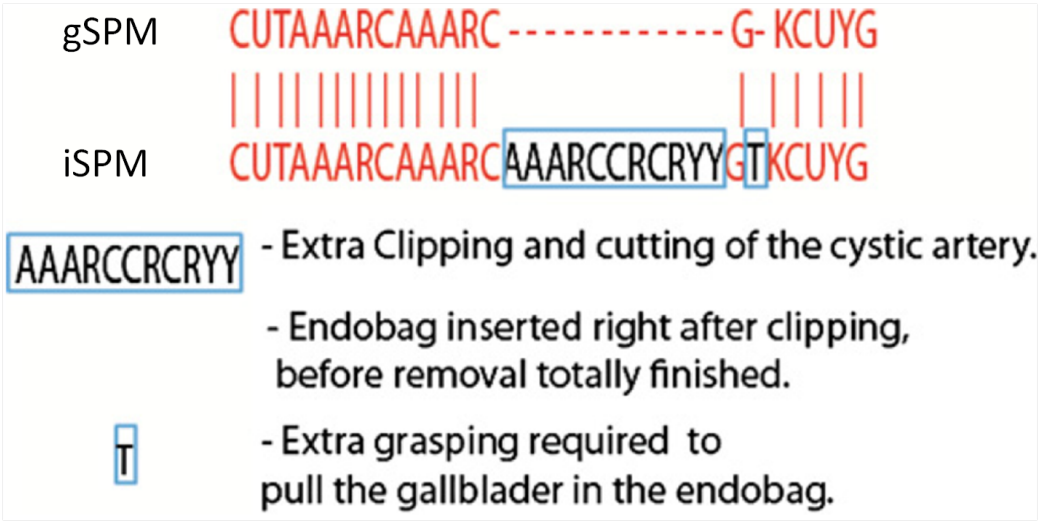


FIGURE 1.8 – Détection de déviations entre un gSPM (en haut) et un iSPM (en bas) par Bouarfa & Dankelman [63]. *Les déviations sont entourées en bleu et correspondent à l'absence de correspondance entre l'iSPM et le gSPM. Chaque lettre des séquences représente l'utilisation d'un outil : A pour l'instrument permettant de poser des clips, C pour une pince de dissection, G pour un crochet diathermique, T pour une pince de préhension, U pour une pince fenêtrée, R pour des ciseaux, Y pour l'endobag et K pour un instrument de succion.*

Les auteurs interprètent la première déviation comme la succession d'un clipping (action de poser un clip sur un vaisseau afin d'empêcher l'écoulement du sang), de la section de l'artère cystique et de l'insertion prématurée de l'endobag. La seconde déviation est interprétée par les auteurs comme l'utilisation d'une pince de préhension afin de mettre la vésicule biliaire dans l'endobag.

Cependant, le modèle étant basé uniquement sur l'identification de l'outil ne permet pas de savoir quelle structure est concernée par l'utilisation de cette pince de préhension. Nous pouvons en effet interpréter les deux déviations d'une manière différente. Les premiers clips ont pu être mal positionnés et l'un d'entre eux a pu tomber dans la cavité abdominale alors que le chirurgien commençait la section de l'artère cystique (succession des outils AAARC sur l'iSPM avant la première déviation). Ainsi, le chirurgien a dû replacer des clips pour sectionner correctement cette artère. Afin de ne pas oublier le clip étant tombé, il l'a placé dans l'endobag. Dans un tel scénario, nous avons toujours une déviation, mais dont l'origine est la mise en place d'un processus de récupération afin que l'EPR (la chute du clip) n'apporte pas de

complications supplémentaires. Ainsi, avec l'ajout d'informations, le scénario peut être interprété de manière totalement différente de celle donnée par les auteurs.

Cet exemple illustre clairement que même si cet article met en évidence des déviations, il ne fait aucune différence entre les déviations dues à une particularité anatomique, à l'expérience de l'équipe chirurgicale, ou à l'apparition d'un événement indésirable. De plus, bien que l'identification de l'outil soit actuellement le plus simple à obtenir de manière automatique, cette seule information semble insuffisante pour permettre une caractérisation des déviations. En effet, avec uniquement cette information, on ne peut savoir quelles actions ont été réalisées par le chirurgien.

1.3.2 Comportements chirurgicaux et événements indésirables

Tout comme il est possible de mettre en évidence des comportements chirurgicaux différents entre les sites opératoires ou l'expertise [50], il est envisageable que des comportements chirurgicaux soient spécifiques à l'apparition des événements indésirables et des processus de récupération qui y sont associés. Cependant, à notre connaissance, il n'existe aucune étude utilisant les SPMs pour mettre en avant de tels comportements chirurgicaux.

1.3.3 Problématiques de la thèse

Les liens entre SPMs et EIs n'ont pas encore été beaucoup étudiés dans la littérature. Or, mettre en évidence ce lien pourrait présenter de nombreux intérêts pour les applications suivantes :

- **apprentissage et évaluation :** le lien SPMs-EIs permettrait de faire un retour d'informations sur la qualité de la chirurgie. En général, les critères utilisés pour ce type d'application sont le temps et la gestion des mouvements. Ces critères permettent de faire la différence entre un expert et un novice, mais il est impossible de dire si la réalisation a eu lieu sans risques, ni d'identifier les processus de récupération mis en place ;
- **aide à la chirurgie :** le lien SPMs-EIs permettrait d'avoir un système qui identifie les risques probables et informe le praticien sur la manière adéquate de les éviter ces risques ou de les corriger lorsque l'événement est apparu ;
- **optimisation de la salle opératoire :** le lien SPMs-EIs permettrait d'anticiper la mise à disposition des ressources matérielles et humaines en

cas de survenue d'un EI, ou de risque important de survenue d'un EI particulier.

C'est dans ce contexte, à l'intersection entre modélisation de processus chirurgicaux et étude des événements indésirables, que se situe cette thèse. Notre problématique est d'étudier la faisabilité de la détection automatique des déviations dues à des événements indésirables intraopératoires au sein d'une chirurgie laparoscopique et de mettre en évidence des comportements chirurgicaux spécifiques à ces événements afin d'en comprendre les causes.

Pour répondre à cette problématique,

1. nous nous sommes intéressés à la chirurgie de la rectopexie que nous avons modélisée sous forme de représentation hiérarchique et d'une ontologie préliminaire en incluent les concepts d'événements indésirables dans nos modèles (chapitre 2).
2. En nous concentrant sur les phases présentant le plus de risques, nous avons ensuite mis en place une méthode de détection de déviation permettant de distinguer celles dues à des événements indésirables de celles dues aux particularités anatomiques du patient (chapitre 3).
3. Enfin, nous avons mis en évidence des comportements chirurgicaux spécifiques à l'aide d'une méthode de découverte de patterns (chapitre 4).

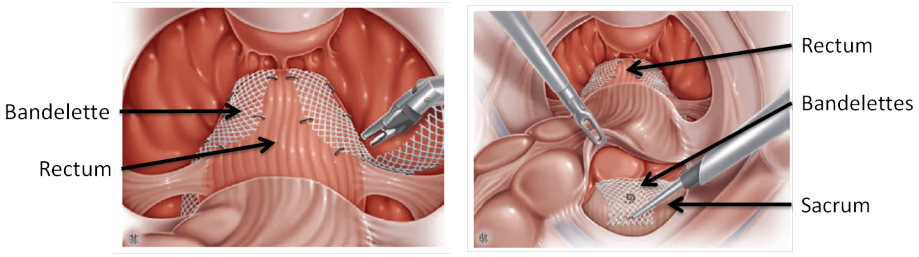
Chapitre 2

Modélisation de la rectopexie et des événements indésirables

Afin de pouvoir mettre en place une méthode de détection de déviations et d'identification de comportements chirurgicaux en relation avec des événements indésirables, il est essentiel de comprendre le déroulement de l'opération choisie, la rectopexie, et quels sont les événements indésirables qui y sont associés.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés à la rectopexie par laparoscopie selon la technique d'Orr-Loygue [67] effectuée au sein de l'hôpital Michallon de Grenoble. La rectopexie est un traitement chirurgical pour corriger le prolapsus rectal, c'est-à-dire l'extériorisation d'une partie du rectum à travers l'anus. Ce prolapsus est dû à une anomalie de fixation du rectum et touche principalement les femmes âgées multiparturientes, c'est-à-dire ayant accouché à plusieurs reprises. Dans la technique d'Orr-Loygue, la correction de ce prolapsus est réalisée par la fixation de deux bandelettes entre le rectum et le sacrum (figure 2.1). Nous avons choisi cette opération pour les raisons suivantes :

1. la rectopexie est une chirurgie relativement standardisée ;
2. la rectopexie est une chirurgie souvent réalisée à l'hôpital Michallon de Grenoble (plus de 20 par an) ;
3. des experts sont disponibles pour nous accompagner ;
4. ces experts sont intéressés par l'apport attendu de la modélisation de la rectopexie.



(a) Fixation de deux bandelettes sur les faces antérolatérales du rectum.

(b) Fixation des deux bandelettes sur le sacrum.

FIGURE 2.1 – Rectopexie selon la technique d'Orr-Loygue. *La fixation de bandelettes entre le rectum (a) et le sacrum (b) permet de corriger le prolapsus rectal. Source [68].*

Les objectifs de ce chapitre sont de mettre en place un vocabulaire spécifique de la rectopexie, de décrire le déroulement normal de cette opération et les événements indésirables de manière formelle. L'enjeu de cette description est de permettre un partage des connaissances et la mise en place de modèles de processus chirurgicaux. Pour cela, nous présenterons les différentes méthodologies de modélisation des connaissances existantes. Ensuite, nous détaillerons la méthodologie que nous avons suivie et les modèles (représentation hiérarchique et ontologie préliminaire) que nous avons développés pour décrire non seulement cette opération, mais aussi les événements indésirables associés aux opérations laparoscopiques. Nous avons choisi de développer un modèle pour l'ensemble des EIs aux opérations laparoscopiques, et non uniquement à la rectopexie, car les EIs ne sont pas spécifiques à cette opération. Pour finir, nous aborderons les limites et perspectives des modèles développés.

2.1 Modélisation des connaissances

La manière la plus formelle de modéliser des connaissances est sous forme d'ontologies (voir tableau 1.12, page 24, pour la définition). Il existe plusieurs ontologies spécifiques au monde médical, celles qui se rapprochent le plus de nos travaux sont :

- FMA (Foundational Model of Anatomy) [69] : dédiée aux structures anatomiques humaines ;
- OntoSPM (Ontology of Surgical Process Model) [54] : dédiée aux modèles de processus chirurgicaux (SPMs) ;

- OAE (Ontology of Adverse Events) [70] : dédiée aux événements indésirables graves dans l'ensemble de la médecine ;
- OntoADR (Ontology of Adverse Drug Reactions) [71, 72] : dédiée aux effets indésirables des médicaments.

Il existe de nombreuses méthodologies dédiées spécifiquement à la création d'ontologies (section 2.1.1), mais il existe également des méthodes plus généralistes qui permettent de modéliser les connaissances avec différents niveaux de formalismes, dont l'analyse des tâches cognitives (section 2.1.2).

2.1.1 Méthodologies de création d'une ontologie

Au sein des méthodologies pour concevoir des ontologies, nous nous sommes principalement intéressés aux suivantes :

1. méthode de construction de Cyc KB (pour Cyc Knowledge Base) [73] ;
2. squelette méthodologique de Uschold & King [74] ;
3. méthode de Grüninger & Fox [75] ;
4. méthode du projet KACTUS [76] ;
5. méthodologie d'extension de SENSUS[77] ;
6. METHONDOLOGY [78] ;
7. méthodologie On-To-Knowledge [79] ;
8. l'agrégation semi-automatique de concepts [71] ;
9. le cycle de vie d'une ontologie [80].

2.1.1.1 Méthode de construction de Cyc KB

La méthode de construction de la base de connaissances Cyc [73] est constituée de 3 étapes essentielles. Dans un premier temps, une codification manuelle est faite à partir des connaissances déjà présentes dans la littérature. Au cours des deux étapes suivantes, cette connaissance est enrichie grâce à l'acquisition de nouvelles connaissances par l'échange entre protagonistes (seconde étape) et par l'utilisation d'outils d'apprentissage automatique (troisième étape).

Cette méthode a permis de mettre en place une ontologie et une base de connaissances qui ont pour but de représenter le monde afin que des systèmes d'intelligences artificielles aient la capacité de raisonner comme un être humain. Une base de connaissances correspond à l'ontologie plus des individus décrivant les concepts. La base de connaissances Cyc est propriétaire, mais

une version open source est disponible sous le nom OpenCyc. La dernière version open source, disponible depuis 2012, regroupe environ 240 000 concepts et plus de 2 millions de relations entre ces concepts.

2.1.1.2 Squelette méthodologique

Le squelette méthodologique proposé par Uschold & King [74] se décompose en 4 étapes. La première consiste à définir l'objectif, c'est-à-dire dans quel but l'ontologie est créée. La seconde étape constitue la création de l'ontologie. La troisième étape de la méthodologie consiste à l'évaluer afin de s'assurer de la validité de l'ontologie produite. Pour finir, il est nécessaire de documenter l'ontologie afin qu'elle puisse être utilisée.

Pour la seconde étape, les auteurs ont identifié 3 sous-étapes : (1) identifier et définir les concepts et les relations clés ; (2) représenter l'ontologie de manière formelle ; (3) intégrer des ontologies existantes. De plus, ils ont mis en avant trois approches pour identifier et définir les concepts et les relations clés :

- **approche Top-Down :** à partir des concepts les plus abstraits, la recherche devient de plus en plus spécifique ;
- **approche Bottom-up :** à partir des concepts les plus spécifiques, la recherche se concentre sur des concepts de plus en plus abstraits ;
- **approche Middle-out :** les concepts les plus importants sont les premiers qui sont exprimés, puis il y a une généralisation et une spécification de ces concepts afin de trouver les autres concepts.

2.1.1.3 Méthode de Grüninger & Fox

La méthode de Grüninger & Fox [75] est constituée de 3 étapes. Dans un premier temps, il faut identifier les scénarios pouvant survenir dans le domaine étudié. Ces scénarios correspondent aux applications possibles de l'ontologie. Grâce à ces scénarios, des questions de compétences, c'est-à-dire des questions auxquelles l'ontologie doit pouvoir répondre, sont créées afin de déterminer le cadre de l'ontologie. Pour finir, ces questions et leurs réponses sont utilisées pour définir les concepts et les relations.

Le grand avantage de cette méthode est la spécificité qu'elle apporte vis-à-vis des scénarios qui ont permis sa création. Cependant, le risque est d'avoir une ontologie difficile à généraliser.

2.1.1.4 Méthode du projet KACTUS

La méthode du projet KACTUS [76] repose sur une approche de type Bottom-Up. Le principe de cette méthode est de construire dans un premier temps une base de connaissances spécifique à une application. Par la suite, lorsqu'une autre application similaire est nécessaire, la première base de connaissances est généralisée en une ontologie adaptée aux deux applications. Ainsi à chaque itération l'ontologie devient de plus en plus générale.

Comme pour la méthode de Grüninger & Fox [75], il peut être difficile d'étendre l'ontologie après plusieurs itérations.

2.1.1.5 Méthodologie d'extension de SENSUS

La méthodologie d'extension de SENSUS [77] consiste à identifier les termes pertinents présents dans une ontologie de haut niveau (dans ce cas, l'ontologie SENSUS), c'est-à-dire une ontologie qui apporte les concepts de base à la nouvelle ontologie, et ensuite, par une approche top-down à construire sa propre ontologie.

L'avantage de cette méthodologie est qu'il existe déjà une connaissance formalisée sur certains termes du domaine, qui permet d'avoir une base dont la cohérence a été éprouvée. De plus, l'utilisation d'une ontologie de haut niveau permet une communication entre les ontologies en dérivant. Cependant, si l'ontologie de haut niveau n'est pas stable, c'est-à-dire que des concepts ou des relations changent, ceci peut rendre obsolète l'ontologie créée.

2.1.1.6 METHONDOLOGY

METHONDOLOGY [78] est probablement l'une des méthodologies les plus complètes pour créer une ontologie. Elle permet soit de créer une ontologie à partir de zéro, soit d'étendre une ontologie déjà existante. Elle comporte 7 étapes :

1. **spécification :** définition de l'objectif de l'ontologie, de son niveau de formalisation et de son domaine d'application ;
2. **acquisition de connaissances :** compilation de l'ensemble des connaissances sur le domaine ;
3. **conceptualisation :** structuration des connaissances en concepts, instances, propriétés, relations ... ;
4. **intégration :** intégration de concepts d'ontologies de haut niveau dans l'ontologie en construction ;
5. **implémentation :** création de l'ontologie ;

6. **évaluation :** vérification de la validité de l'ontologie produite ;
7. **documentation :** description des concepts et des relations de l'ontologie de manière explicite.

L'avantage de cette méthodologie est que des outils, comme WebODE [81] qui fournit une architecture permettant l'édition collaborative d'ontologie, sont disponibles pour aider les utilisateurs à suivre cette méthode.

2.1.1.7 On-To-Knowledge

La méthodologie On-To-Knowledge [79] est, elle aussi, basée sur l'analyse de scénarios d'utilisations. Elle se décompose en 4 étapes :

1. **"kick-off" :** création d'un premier jet de l'ontologie grâce à la spécification des exigences et à l'analyse de données ;
2. **amélioration :** production d'une ontologie mature grâce à l'intervention d'experts du domaine et à la structuration des connaissances ;
3. **évaluation :** vérification de la cohérence de l'ontologie grâce à des questions de compétences, à l'analyse des retours et de l'utilisation ;
4. **maintenance :** évolution de l'ontologie en fonction des modifications des connaissances.

L'un des points mis en avant dans cette méthodologie est le côté récursif entre les étapes 2, 3 et 4.

2.1.1.8 Agrégation semi-automatique de concepts

Ce type de méthodologie, utilisé par Souvignet *et al.* [71] pour mettre en place une ontologie relative aux effets indésirables des médicaments (OntoADR), peut être synthétisé en trois étapes :

1. création d'une base de données relationnelle à partir de multiples sources ;
2. fusion des définitions sémantiques et des relations de cette base de données de manière semi-automatique ;
3. vérification manuelle de la cohérence des résultats.

L'avantage de ce type de méthode est que la mise en place semi-automatique des définitions et des relations permet de s'assurer en grande partie que les résultats ne présentent pas de redondance. Cependant, ces méthodes nécessitent l'existence de sources formalisées. Par exemple, Souvignet *et al.* [71] ont utilisé, entre autres, la terminologie SNOMED-CT (Systematized Nomenclature of Medicine - Clinical Terms) [1] et le dictionnaire MedDRA (Medical

1. http://www.ihtsdo.org/snomed-ct

Dictionary for Regulatory Activities)[2] comme sources pour développer leur ontologie.

2.1.1.9 Le cycle de vie d'une ontologie

L'Ontology Summit 2013 Communiqué [80] a proposé une méthode basée sur le principe de cycle de vie d'une ontologie. Ce cycle est composé des étapes suivantes :

1. la définition des besoins : établir le contexte, la portée et les exigences initiales ;
2. l'analyse ontologique : identifier les entités clés de l'ontologie ;
3. le design de l'ontologie : définition de l'architecture de l'ontologie ;
4. la conception du système : définition des besoins pour l'intégration de l'ontologie dans de plus grands systèmes ;
5. le développement de l'ontologie : création et réutilisation d'ontologies ;
6. le développement du système et son intégration : création du système utilisant l'ontologie ;
7. le déploiement : mise à disposition de l'ontologie ;
8. le fonctionnement et la maintenance : s'assurer du bon fonctionnement de l'ontologie dans des conditions réelles d'utilisation.

De plus, l'Ontology Summit 2013 Communiqué [80] a proposé un guide pour permettre l'évaluation de ces différentes étapes. C'est la méthodologie qui a été utilisée pour la création de OntoSPM [54], qui est une des ontologies de haut niveau que nous avons utilisé dans nos travaux.

2.1.1.10 Synthèse

Comme nous venons de le voir, il existe de nombreuses méthodologies pour mettre en place une ontologie. Certaines sont très ouvertes, comme c'est le cas pour le squelette méthodologique de Uschold & King [74] ou METHONDOLOGY [78]. D'autres, au contraire, sont beaucoup plus restrictives, comme par exemple la méthode de Grüninger & Fox [75]. Cependant, bien qu'il n'existe pas de méthode universelle, de nombreuses étapes sont partagées entre elles, comme le recours à des ontologies de haut niveau ou le recueil de connaissances préliminaires que ce soit grâce à des scénarios, à des recherches bibliographiques ou à des discussions.

La modélisation des connaissances constituant pour nous un outil pour permettre la mise en place de concepts et d'un vocabulaire pour la création de

2. http://www.meddra.org/

modèles de processus chirurgicaux, nous avons décidé d'utiliser une méthodologie axée sur l'acquisition de connaissances plutôt que sur la formalisation de celle-ci sous la forme d'une ontologie mature. En effet, la construction d'une ontologie mature aurait pu faire l'objet d'une thèse complète. La méthodologie retenue est donc l'analyse des tâches cognitives [82], que nous présenterons ci-dessous.

2.1.2 Analyse des tâches cognitives

L'objectif de l'analyse des tâches cognitives (CTA pour Cognitive Task Analysis) [82] est de rendre explicites les connaissances et compétences mises en jeu par un expert lors de l'accomplissement d'une tâche complexe. Or la chirurgie est une tâche complexe qui fait intervenir des connaissances théoriques sur le déroulement de l'opération et sur l'anatomie, des connaissances spécifiques sur l'historique médical du patient, des compétences techniques (comme la dextérité), des compétences cognitives et interpersonnelles.

Il existe de nombreuses manières de conduire une CTA. Cependant, il est possible de synthétiser ces différentes méthodologies en cinq étapes :

1. collecter les connaissances préliminaires ;
2. représenter les connaissances ;
3. éliciter les connaissances de l'expert ;
4. analyser et vérifier les données recueillies ;
5. mise en forme des résultats pour l'application désirée.

Dans les sous-sections suivantes, nous allons détailler ces cinq étapes. Il est à noter que lorsque nous parlerons de l'analyste, nous ferons référence à la personne qui met en place la CTA ; et lorsque nous parlerons de l'expert, il s'agira de l'expert du domaine qui est analysé.

2.1.2.1 Collecter les connaissances préliminaires

L'objectif de l'analyste est d'identifier la séquence de tâches qui deviendra l'objet de la CTA. Ainsi, l'analyste doit se familiariser avec le contexte, les systèmes et les procédures correspondant au domaine d'étude.

La collecte d'informations peut s'effectuer de différentes manières :

- **analyse de documents :** grâce aux nombreuses connaissances présentes dans la littérature, l'analyste a la possibilité de bien appréhender l'ensemble du domaine d'étude et de comprendre les différents déroulements possibles ;

- **observations :** il s'agit ici d'observer, de manière non intrusive, un ou plusieurs experts réalisant la tâche. Ceci permet à l'analyste de mieux appréhender les conditions normales et les actions se déroulant pendant le processus. Ainsi, l'analyste a une idée plus précise de l'influence du monde extérieur sur ce déroulement ;
- **interviews non structurées :** il s'agit ici d'avoir une explication verbale d'un expert sur le déroulement et les enjeux des tâches à effectuer.

Même lorsque l'analyste est déjà familier avec le domaine d'étude, il est recommandé de ne pas négliger cette étape. En effet, cette collecte de connaissances peut apporter de nouveaux éléments lui permettant d'être plus exhaustif dans ses analyses.

2.1.2.2 Représenter les connaissances

Une fois la collecte d'informations effectuée, il est nécessaire de représenter les connaissances acquises. Cette étape permettra de mettre en place un support de discussion lors des étapes suivantes.

Plusieurs représentations sont possibles, il s'agit des mêmes que nous avons présentées en section 1.2.1.4 : liste non-séquentielle, liste séquentielle, graphe d'état, décomposition hiérarchique, diagramme UML et ontologie.

Il est indispensable que la représentation soit adaptée à l'objectif de la discussion entre l'expert et l'analyste. Si l'objectif de cette dernière est de définir le déroulement de la tâche étudiée, une liste non-séquentielle est adaptée. Mais si l'objectif est d'expliciter les rôles des acteurs et leurs relations avec les concepts, une représentation hiérarchique sera plus adaptée qu'une liste non-séquentielle. Ainsi au cours de la maturation, il ne faut pas hésiter à changer de type de représentation.

2.1.2.3 Éliciter les connaissances de l'expert

L'objectif de l'élicitation est d'amener l'expert à rendre explicites ses connaissances tacites associées au domaine d'étude. En effet, lorsqu'un expert dans son domaine explique une tâche, il a tendance à oublier certaines subtilités qui sont devenues des réflexes pour lui. Or, ce sont souvent ces subtilités qui permettent de bien comprendre le déroulement de la tâche.

Plusieurs méthodes permettent cette élicitation :

- **interviews :** le but est de rendre explicites toutes les étapes impliquées dans l'accomplissement des tâches, les points clés pour la prise de décision, les connaissances conceptuelles nécessaires et les informations permettant à l'expert de déterminer le début d'une sous-tâche. Il existe trois types d'interviews :

1. les interviews structurées : l'analyste pose à l'expert des questions précises et déterminées à l'avance. Dans ce type d'interviews, on ne s'écarte pas des questions préétablies ;
2. les interviews non structurées : seul le sujet est déterminé, la discussion est plus libre et l'analyste doit rebondir sur les points qui nécessitent une précision de la part de l'expert ;
3. les interviews semi-structurées : une série de questions précises est déterminée à l'avance, mais l'analyste doit rebondir sur les points qui nécessitent une précision de la part de l'expert ;

- **analyse de l'explicitation verbale du processus :** l'expert explique à haute voix, les tâches et sous-tâches qu'il effectue lors de l'exécution du processus ;
- **méthode CPP (Concepts, Processes and Principles) [83] :** il s'agit d'une méthode impliquant plusieurs interviews permettant de rendre compte des connaissances inconscientes et des automatismes acquis par l'expert pendant sa pratique. Ceci nécessite plusieurs experts décrivant la même procédure et des cycles de vérification entre experts ;
- **méthode de décision critique [84] :** il s'agit d'une méthode basée sur des interviews semi-structurées, où il est demandé à l'expert d'expliquer les processus cognitifs qui sont mis en jeu pour la résolution d'un problème critique.

Pour l'ensemble de ces méthodes, il est conseillé d'enregistrer les échanges plutôt que de vouloir prendre des notes exhaustives. Ceci permet de mettre en place un vrai échange entre l'expert et l'analyste.

Les deux dernières méthodes citées utilisent intrinsèquement des interviews, mais nous considérons qu'il s'agit de méthodes propres, car le processus est clairement défini. En pratique, les interviews sont souvent les plus utilisées, car elles sont faciles à mettre en place et comparées à une explication verbale du processus, elles n'interfèrent pas dans le déroulement normal de celui-ci. Cependant, cette explication verbale permet de fournir un support concret à la discussion ce qui peut permettre à l'analyste de demander clairement à l'expert d'expliciter ce qu'il est en train de réaliser.

2.1.2.4 Analyser et vérifier les données recueillies

Comme dit précédemment, l'enregistrement des échanges permet de mettre en place un vrai dialogue, cependant il nécessite par la suite une retranscription et une analyse afin de pouvoir en extraire les informations utiles. Ces informations permettront de mettre à jour la représentation des connaissances et si nécessaire de la faire évoluer vers une représentation plus formelle.

Lorsque cette analyse est faite, il est nécessaire d'obtenir la validation du modèle par les experts. Ceci se fait principalement sous forme de discussions où l'analyste propose aux experts le modèle, sous la forme d'une représentation qu'ils peuvent comprendre. Si l'expert ou l'analyste considèrent que le modèle ne prend pas en compte l'ensemble des éléments pour effectuer la tâche, on reprend la phase d'élicitation. Ce processus est itératif jusqu'à ce que le modèle des tâches et des processus cognitifs soit estimé comme correct et exhaustif.

2.1.2.5 Mise en forme des résultats pour l'application désirée

Les contraintes définies par une application ne sont pas toujours en adéquation avec celles permises par la représentation des connaissances choisie. Dans ces cas, il est nécessaire de formater les résultats afin de pouvoir les utiliser. Par exemple, dans le cas des systèmes d'assistance par ordinateur, la connaissance représentée sous forme de liste séquentielle ne prend pas en compte l'ensemble des contraintes, principalement celle de cardinalité, dont le système a besoin pour fonctionner correctement.

La mise en forme des résultats peut se faire par un changement de la représentation choisie ou par leurs intégrations dans un langage compréhensible par un logiciel. Par exemple, l'ontologie "my Corporis Fabrica (MyCF)", basée sur FMA, dédiée à l'anatomie faisant le lien entre les connaissances abstraites et des patients réels, a été mise en forme pour permettre le développement d'une application afin de faciliter la modélisation 3D et à la simulation de l'anatomie [3].

Dans cette section, nous avons rapidement présenté quelques méthodes permettant la modélisation des connaissances et détaillé l'une d'entre elles : l'analyse des tâches cognitives. Dans la section suivante, nous allons décrire comment nous avons utilisé cette dernière afin de modéliser la rectopexie et les événements indésirables qui peuvent survenir lors de cette opération.

3. https://www.youtube.com/watch?v=DlcR3t8RCeA

2.2 Méthodologie utilisée

2.2.1 Collecte des connaissances préliminaires

Pour cette première étape, nous avons parcouru un large panel de la littérature qui décrivait les principes de la rectopexie [68], les différentes techniques existantes [67, 68, 85–87], les événements indésirables associés [10, 20, 86] et les résultats de ces opérations [20, 86–88].

Grâce à cette étude bibliographique, nous avons appris que : 1) l'objectif de la rectopexie est de corriger le prolapsus rectal par fixation du rectum à un point fixe. 2) Que plus de 95% des patients étaient des femmes, qui, en plus de la gêne entraînée par le prolapsus, souffraient en général d'incontinence et de constipation. 3) Que cette fixation pouvait être faite sur la face antérieure, postérieure ou sur les deux faces du rectum de manière directe par des points de suture, ou indirecte grâce à des bandelettes. Nous avons aussi appris que seuls les événements indésirables postopératoires, principalement des infections urinaires et des hernies incisionnelles, étaient étudiés. Selon la review de Samaranayake *et al.* [20], ces EIs concernent entre 1,4 et 47 % des cas. L'écart est important, mais il est à mettre en regard du temps de suivi et du nombre de cas : 73 patients suivis pendant 27,5 mois pour l'étude avec 1,4 % d'événements indésirables postopératoires et 49 patients suivis pendant 106 mois pour l'étude avec 47 % d'événements indésirables postopératoires. À long terme, la récidive est inférieure à 10 % et il y a une amélioration de l'incontinence. Cependant, les résultats sur la constipation des patients varient en fonction des études.

En plus de cette analyse de documents, nous avons aussi eu l'occasion de demander, sous la forme d'une interview non structurée, à deux chirurgiens experts de nous décrire le déroulement et les objectifs de l'opération.

Pour finir, j'ai observé une dizaine d'opérations enregistrées au sein du service de chirurgie digestive de l'hôpital Michallon de Grenoble, ainsi qu'assisté à une opération au bloc opératoire. Ceci m'a permis de mieux appréhender l'environnement et les gestes effectués par le chirurgien.

2.2.2 Représentation des connaissances

Au cours de la modélisation des connaissances, nous avons changé à plusieurs reprises de type de représentation en fonction de la maturité du modèle. Ainsi, suite à la phase de collection des connaissances préliminaires, nous avons mis en place une liste non-séquentielle reprenant l'ensemble des

éléments.

Ensuite, nous sommes allés vers des représentations plus formelles pour arriver à une décomposition hiérarchique et à une représentation ontologique préliminaire de la rectopexie selon la technique Grenobloise.

2.2.3 Élicitation des connaissances des experts

Pour l'élicitation des connaissances, nous avons adapté la méthode CPP [83] (section 2.1.2.3) à notre domaine d'étude en partant des concepts généraux pour aller vers ceux plus spécifiques (approche Top-Down). Nous avons identifié deux chirurgiens, un expert et un interne, qui se sont prêtés à des interviews semi-structurées.

Deux séries d'interviews ont été effectuées. La première, pour permettre la modélisation du déroulement de la rectopexie, la seconde pour définir les événements indésirables pouvant survenir au cours de cette opération. L'ensemble de ces interviews a été enregistré avec l'accord des cliniciens et avec l'autorisation des patients lorsque leurs données étaient impliquées (voir section 3.2, pour les aspects légaux de l'utilisation de données médicales).

2.2.3.1 Élicitation du déroulement de la rectopexie

L'objectif de la première série d'interviews était d'acquérir le déroulement d'une rectopexie au cours duquel aucun événement indésirable ne vient perturber la procédure, mais où la procédure peut varier en fonction des données préopératoires du patient. Pour cadrer la décomposition de l'opération, nous avons utilisé le vocabulaire défini dans l'ontologie OntoSPM [54] : phases, étapes et activités. Cette ontologie ayant pour objectif d'être une ontologie centrale pour la modélisation des processus chirurgicaux, il nous semblait essentiel de partir des concepts de base d'OntoSPM afin d'avoir un cadre que nous pourrions exploiter à l'avenir.

Quatre interviews différentes avec chacun des deux cliniciens ont été réalisées pour obtenir un modèle. Les trois premières interviews avaient pour objectif, par un processus itératif, de décrire le déroulement chirurgical à des niveaux de granularité de plus en plus fins. La quatrième avait pour objectif de mieux appréhender les relations entre les données préopératoires et le déroulement chirurgical. Les objectifs, les supports utilisés et les résultats de ces interviews sont décrits dans le tableau 2.1.

À proprement parler, l'interview notée 3 se rapproche plus de l'explication verbale du processus à partir d'une vidéo que d'une interview. Nous avons fait le choix d'utiliser des extraits vidéo afin d'avoir une référence visuelle

Interview	Objectif	Support	Résultat
1	Obtenir la description de la procédure “type” au niveau de granularité des phases et des étapes	Liste non-séquentielle des phases et des étapes	Représentation séquentielle des phases et des étapes
2	Valider et compléter la première représentation séquentielle. Acquérir le vocabulaire spécifique au monde médical	Représentation séquentielle des phases et des étapes	Représentation hiérarchique des phases et des étapes
3	Identifier les différents éléments d’une activité	Vidéos de rectopexie	Liste non-séquentielle des activités
4	Décrire les caractéristiques préopératoires influençant la procédure “type”	Représentation hiérarchique des phases et des étapes	Liste non-séquentielle de l’influence des caractéristiques préopératoire

TABLE 2.1 – Objectifs, supports utilisés et résultat des interviews semi-structurées pour l’élicitation du déroulement de la rectopexie.

permettant aux experts de montrer clairement les différentes actions, structures et outils utilisés. Ceci nous a aussi permis de demander des précisions lorsqu’une activité n’était pas décrite, et également de se familiariser à la reconnaissance des instruments chirurgicaux et des structures anatomiques. Cela nous a été fortement bénéfique pour le reste de la modélisation, et également pour l’acquisition de données pour la création de modèles de processus chirurgicaux.

2.2.3.2 Élicitation des événements indésirables associés à la rectopexie

L’élicitation des événements indésirables n’a eu lieu qu’après vérification de l’obtention d’un modèle correct et exhaustif décrivant le déroulement de la rectopexie (section 2.2.4). En pratique, de nombreux points avaient déjà été abordés lors de la première série d’interviews, car il est difficile de décrire ce qui se déroule correctement sans aborder les risques pouvant survenir. C’est principalement vrai pour la description de l’influence des caractéristiques préopératoires (interview 4). Par exemple, si le patient est obèse, il y a davantage de graisse dans la cavité abdominale donc le chirurgien doit être d’autant plus vigilant à ne pas sectionner un vaisseau qui n’est pas directement visible.

Puisqu'une grande partie avait déjà été vue, seule une interview par chirurgien a été nécessaire afin d'obtenir les types d'événements indésirables pouvant intervenir en fonction des phases et des étapes. Le support utilisé a été la représentation hiérarchique du déroulement de la rectopexie.

2.2.4 Analyse et vérification des données

Nous avons analysé chaque interview afin de mettre à jour ou de faire évoluer la représentation des connaissances. Les résultats de l'analyse de chaque interview ont été présentés aux deux cliniciens afin de s'assurer de l'exactitude des connaissances élicitées. Lorsque des points n'obtenaient pas un accord unanime, ils étaient rediscutés au cours de l'interview suivante.

De plus, un troisième clinicien expert dans la rectopexie a participé à la vérification des modèles finaux.

2.2.5 Mise en forme des résultats pour l'application désirée

Lorsque les modèles du déroulement opératoire et des événements indésirables ont été validés, nous les avons formalisés sous la forme d'ontologies afin de représenter les concepts et les relations entre eux de manière formelle. Cette thèse n'étant pas dédiée à la mise en place d'ontologies, celles créées ne sont que des squelettes ontologiques qui nécessitent encore du travail avant d'être exhaustifs.

Cette section a présenté la méthode d'analyse des tâches cognitives que nous avons mise en place afin d'extraire le déroulement "type" de la rectopexie et les événements indésirables associés. La section suivante présentera les résultats obtenus suite à l'application de cette méthodologie.

2.3 Résultats

2.3.1 Modélisation de la rectopexie

Dans un premier temps, nous présenterons les résultats du déroulement "type" de la rectopexie sous forme de représentation hiérarchique avec les concepts clés associés.

2.3.1.1 Représentation hiérarchique du déroulement de la rectopexie

Représentation hiérarchique des chirurgies laparoscopiques

Au cours du processus d'élicitation de la rectopexie, nous avons abordé le cas des opérations laparoscopiques en général. Ceci nous a permis d'identifier un déroulement de phases caractéristique à l'ensemble de ces chirurgies (figure 2.2). Ce déroulement comporte 8 phases, dont certaines sont optionnelles (notées ±). Ces phases et leurs objectifs sont les suivants :

1. **Approche chirurgicale :** avoir accès à la cavité abdominale grâce à l'insertion de trocarts pour les instruments et pour l'optique ;
2. **Exposition :** libérer l'accès au site opératoire ;
3. **Dissection :** ouvrir des structures anatomiques afin de pouvoir aller plus profondément dans le site opératoire ;
4. **Résection :** retirer du corps humain toute ou des parties d'une structure anatomique (phase optionnelle) ;
5. **Fixation :** fixer des parties anatomiques entre elles par l'utilisation de points de suture ou via des prothèses (phase optionnelle) ;

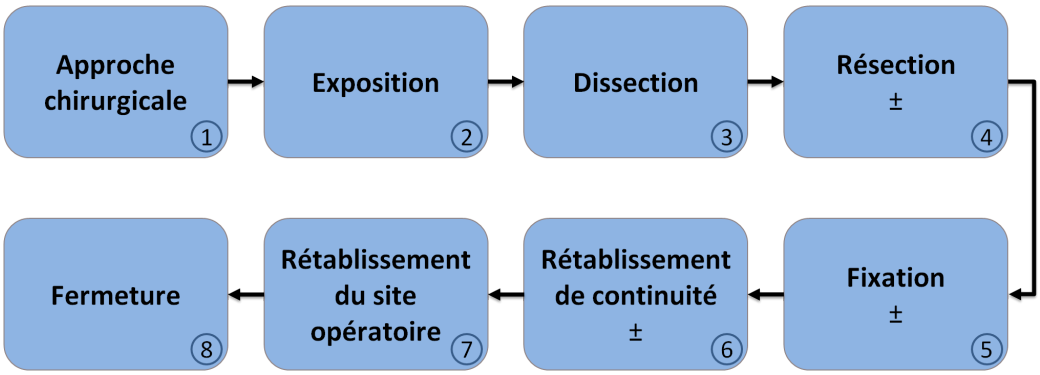


FIGURE 2.2 – Représentation hiérarchique des phases pour les chirurgies laparoscopiques. *Le signe ± représente des phases optionnelles en fonction du type d'opération.*

6. **Rétablissement de continuité :** s'assurer de la continuité des organes devant faire circuler un élément (phase optionnelle) ;
7. **Rétablissement du site opératoire :** revenir dans un état similaire à celui précédent l'exposition tout en conservant le but de l'opération ;
8. **Fermeture :** refermer l'ensemble des incisions effectuées sur le corps du patient.

Représentation hiérarchique de la rectopexie

Dans le cadre de la rectopexie, la phase de rétablissement de continuité n'est pas présente, car aucun organe devant faire circuler un élément n'est sectionné.

La représentation hiérarchique présentée en figure 2.3 est la dernière version que nous avons mise en place et qui a été validée par l'ensemble des experts impliqués. Nous avons identifié 7 phases (représentées par de grands cadres en bleu) et 26 étapes (petits cadres en vert) pour décrire la rectopexie à partir de la première incision jusqu'à la fermeture complète du patient. Afin de faciliter la lecture de cette représentation, seules les phases et les étapes ont été représentées, puisqu'il existe environ 150 activités (liste complète des activités disponible en Annexe B)

Les 26 étapes sont décrites ci-dessous. Afin de faciliter la compréhension, la figure 2.4 présente les principaux concepts anatomiques nécessaires à la bonne compréhension de ces étapes :

1. **Incision cutanée et aponévrotique pour le trocart optique :** permets d'avoir une vision directe de l'intérieur de la cavité abdominale avant d'insérer le trocart optique, on parle de méthode “open cœlioscopie". Cette méthode permet de limiter les risques de perforation viscérale ou de plaies vasculaires lors de l'introduction du trocart optique ;
2. **Introduction du trocart optique :** permets de placer le trocart pour l'optique, créant ainsi une voie d'accès pour l'insufflation ;
3. **Insufflation de la cavité abdominale :** permets de créer le pneumopéritoine par l'insertion de gaz dans la cavité abdominale. Ce pneumopéritoine permet au chirurgien de déplacer les outils dans la cavité abdominale ;
4. **Insertion de l'optique :** l'optique permettra d'avoir un contrôle visuel de l'ensemble des gestes effectués au cours de la chirurgie. C'est à partir de cette étape que le déroulement de l'opération sera visionné a posteriori ;

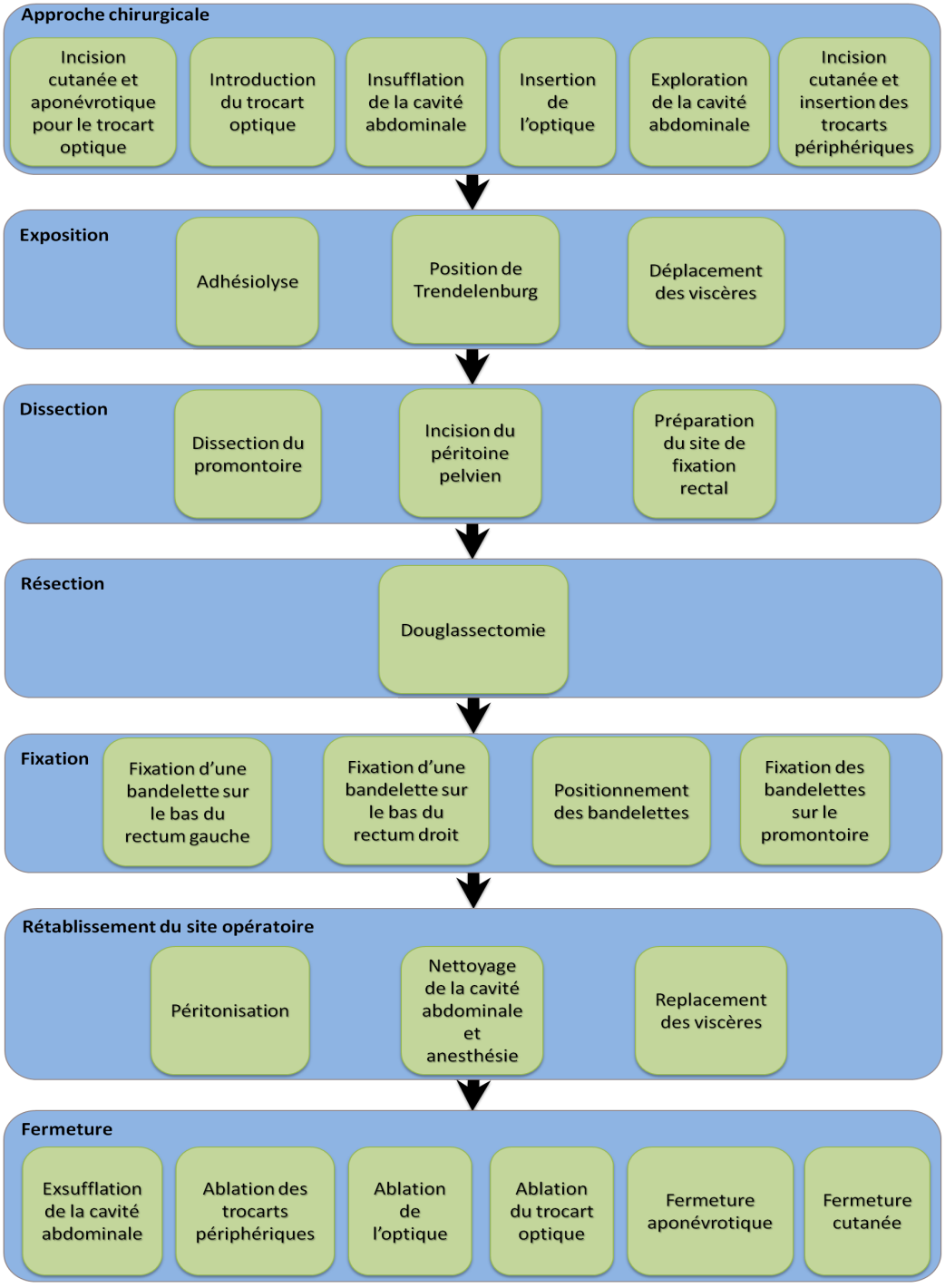
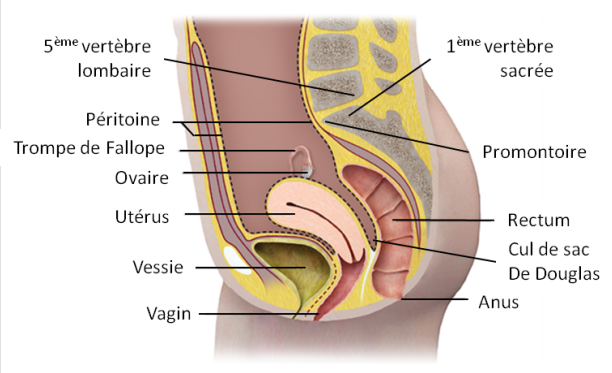
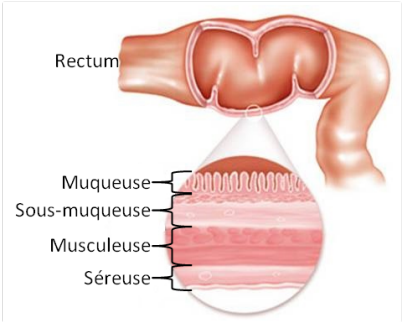


FIGURE 2.3 – Représentation hiérarchique des phases (grand cadre en bleu) et des étapes (petit cadre en vert) de la rectopexie.



(a) Coupe sagittale du pelvis chez la femme avec les structures anatomiques légendées. Source : [89]



(b) Les 4 couches de la paroi du rectum de la muqueuse à la séreuse. Source : [90]

FIGURE 2.4 – Schémas anatomiques du pelvis chez la femme (a) et de la paroi du rectum (b).

5. **Exploration de la cavité abdominale :** permets de repérer la présence d'adhérences entre la paroi et les viscères ou d'anomalies sur des organes ;
6. **Incision cutanée et insertion des trocarts périphériques :** les trocarts périphériques (un de 12 mm pour permettre le passage des agrafeuses et deux de 5 mm) sont insérés, à des positions standardisées, par ponction sous contrôle de la vue. La peau est incisée avant la pose, mais l'aponévrose est traversée par un mandrin placé dans la lumière des trocarts. Ces trocarts permettront le passage des instruments chirurgicaux ;
7. **Adhésiolyse :** permets de libérer les structures anatomiques par la section des adhérences les reliant entre elles. Une adhérence est du tissu cicatriciel qui se forme à la suite d'une opération ;
8. **Position de Trendelenburg :** le patient est basculé afin que sa tête soit plus basse que ses pieds. Cette position permet, grâce à la gravité, d'entraîner et de maintenir les anses intestinales vers la partie supérieure du patient et ainsi de dégager le pelvis ;
9. **Déplacement des viscères :** consiste à dégager le pelvis du patient en déplaçant manuellement les viscères ;
10. **Dissection du promontoire :** consiste à dégager le site de fixation des bandelettes en disséquant le ligament vertébral au niveau de la cinquième vertèbre lombaire et de la première sacrée pour avoir accès au promontoire ;

11. **Incision du péritoine pelvien :** ouverture du péritoine afin d'avoir accès au rectum sous-péritonéal ;
12. **Préparation du site de fixation rectal :** dissection du bas rectum antérolatéral afin d'avoir accès à la musculeuse rectale ;
13. **Douglassectomie :** la résection du cul-de-sac de Douglas, bien que non-standard dans la rectopexie, est systématiquement faite dans la technique Grenobloise afin de limiter les récidives du prolapsus ;
14. **Fixation d'une bandelette sur le bas rectum gauche :** permets la fixation entre la musculeuse du bas rectum gauche et une bandelette. Cette fixation est effectuée en utilisant des agrafes de type Endo-Hernia^{TM} ;
15. **Fixation d'une bandelette sur le bas rectum droit :** même principe, mais sur la musculeuse du bas rectum droit ;
16. **Positionnement des bandelettes :** positionnement des bandelettes afin que le soutien du rectum soit efficace ;
17. **Fixation des bandelettes sur le promontoire :** fixation des deux bandelettes sur le point fixe qu'est le promontoire afin de soutenir le rectum. Cette fixation a lieu par l'utilisation d'agrafes de type Taker® (agrafes en forme de tir bouchon) ;
18. **Péritonisation :** fermeture du péritoine avec du fil non résorbable afin d'isoler les prothèses des viscères ;
19. **Nettoyage de la cavité abdominale et anesthésie :** nettoyage de la cavité abdominale afin d'assurer qu'il ne reste pas de liquide (eau ou sang). Un anesthésique est aussi appliqué afin de diminuer les douleurs postopératoires, principalement au niveau des épaules dues à l'irritation du nerf phrénique par le gaz du pneumopéritoine ;
20. **Replacement des viscères :** repositionnement des viscères dans leur position d'origine par manipulation et grâce à la gravité (patient remis en décubitus) ;
21. **Exsufflation de la cavité abdominale :** retrait du gaz ayant créé le pneumopéritoine afin de retrouver une cavité abdominale normale ;
22. **Ablation des trocarts périphériques :** retrait des trocarts périphériques sous contrôle de la vue. Le chirurgien vérifie en même temps que la paroi ne saigne pas ;
23. **Ablation de l'optique :** retrait de l'optique. L'opération ne peut plus être visionnée a posteriori à partir de cette étape ;
24. **Ablation du trocart optique :** retrait du trocart optique ;

25. **Fermeture aponévrotique :** fermeture de l'aponévrose au niveau du trocart optique et du trocart de 12 mm afin d'éviter les hernies. L'aponévrose au niveau des deux trocarts de 5 mm n'est pas fermée le risque d'hernie étant plus faible ;

26. **Fermeture cutanée :** fermeture des 4 incisions cutanées ayant permis l'insertion des trocarts. C'est la dernière étape qui indique la fin de l'opération.

Chaque étape est associée à une phase, comme représentée en figure 2.3. Mais contrairement aux phases, bien que les étapes aient un ordre préférentiel (de gauche à droite), il est possible que certaines soient interverties. Ainsi, il est possible que l'incision du péritoine pelvien ait lieu avant la dissection du promontoire, ou que la première bandelette soit fixée sur le bas rectum droit au lieu du gauche.

Pour les activités, nous avons identifié 21 verbes d'action, 13 outils et 21 cibles (structures anatomiques ou éléments extérieurs). Ces éléments sont présentés dans le tableau 2.2.

Verbe d'action (21)	Instruments (13)	Cibles (21)
Amener	Agrafeuse Endo-Hernia	Adhérence
Aspirer	Agrafeuse Taker	Aiguille
Coaguler	Canule	Anesthésique local
Coudre	Ciseaux	Ballonnet
Couper	Crochet monopolaire	Bandelette
Dégonfler	Optique	Cavité abdominale
Exposer	Pince crocodile	Côlon
Extraire	Pince de préhension	Compresse
Fixer	Pince fine	Cul de sac de Douglas
Gonfler	Porte-aiguille	Eau
Injecter	Trocart 12mm	Fil
Insérer	Trocart 5mm	Intestin grêle
Lâcher	Trocart optique	Paroi abdominale
Maintenir		Péritoine
Manipuler		Pince de préhension
Nouer		Promontoire
Positionner		Rectum
Regarder		Trompe de Fallope droite
Tirer		Trompe de Fallope gauche
Toucher		Utérus
Transmettre énergie		Vagin

TABLE 2.2 – Composants des activités pour la rectopexie.

L'ensemble de ces termes est défini en annexe A. Nous ne reprendrons ici que les termes les plus ambigus :

- **exposer :** écarter une cible afin de pouvoir avoir accès à d'autres cibles ;
- **maintenir :** rester dans la position actuelle ;
- **positionner :** déplacer une cible vers un autre endroit ;
- **transmettre énergie :** faire passer de l'énergie électrique d'un outil vers un autre n'en produisant pas ;
- **pince crocodile :** pince possédant de petites dents permettant d'agripper la cible, il s'agit d'un instrument traumatique pour les structures anatomiques ;
- **pince de préhension :** pince non traumatique, cet instrument est aussi présent en tant que cible, car il peut être la cible du verbe d'action "transmettre énergie".

Une activité est définie par un verbe d'action, un instrument et une ou plusieurs cibles (<verbe d'action, instrument, cible(s)>). Plusieurs cibles peuvent être présentes du fait de l'interaction existant entre elles. C'est par exemple le cas de <Agrafer, Agrafeuse Endo-Hernia, Bandelette Rectum>, ici la bandelette est agrafée sur le rectum grâce à l'agrafeuse Endo-Hernia.

Avec ces éléments, il est théoriquement possible de créer environ 6 000 activités différentes (21*13*21) composées uniquement d'une cible . En pratique, certaines associations sont impossibles, car elles n'ont pas de sens. Par exemple, l'association <gonfler, agrafeuse Taker, aiguille> est impossible, en effet une agrafeuse de type Taker® ne peut pas gonfler quelque chose. De plus, l'aiguille ne peut pas être la cible de ce verbe d'action, car il ne s'agit pas d'une cible pouvant recevoir du gaz pour être gonflée.

Ainsi, moins de 150 activités, dont certaines avec plusieurs cibles, peuvent exister en pratique. La liste complète de ces activités est présentée en annexe B.

Influence des caractéristiques préopératoires sur le déroulement chirurgical

Au cours du processus d'élicitation, nous nous sommes aussi intéressés aux caractéristiques préopératoires des patients qui pouvaient entraîner une modification du déroulement de la rectopexie. Les caractéristiques que nous avons étudiées sont les suivantes : l'âge, les antécédents chirurgicaux et obstétricaux, l'Index de Masse Corporelle (IMC) et le sexe. Le tableau 2.3 présente les influences sur le déroulement opératoire que peuvent avoir ces caractéristiques.

Caractéristique	Influence
Âge	Pas d'influence sur le déroulement, mais nécessite plus de précautions
Antécédents chirurgicaux et obstétricaux	Plus d'adhérences sont présentes, ainsi l'étape d'adhésiolyse peut être plus longue ou le chirurgien peut revenir à cette étape lors d'une phase ultérieure. En cas d'hystérectomie, les activités faisant intervenir l'utérus ne peuvent pas avoir lieu
IMC	Dans le cadre d'une obésité morbide (IMC>30), il peut être nécessaire d'ajouter un cinquième trocart afin de maintenir les anses intestinales. Les risques sont aussi augmentés
Sexe	Pas de modification du déroulement, mais les activités faisant intervenir des structures du système reproducteur féminin ne peuvent pas avoir lieu chez un homme

TABLE 2.3 – Influences des caractéristiques des patients sur le déroulement opératoire.

Seuls les antécédents chirurgicaux et obstétricaux ont un impact sur le déroulement opératoire. Cependant, il n'est pas modifié drastiquement, seule l'étape d'adhésiolyse est rallongée et peut être plus compliquée à réaliser. Les autres caractéristiques préopératoires ayant peu d'influence sur le déroulement des phases et des étapes, nous avons décidé de ne pas en tenir compte lors de la mise en place du modèle hiérarchique (figure 2.3).

Les modifications les plus importantes sur le déroulement opératoire ont lieu au niveau des activités en fonction de la présence ou non d'un utérus. Dans le cas d'une opération effectuée sur une femme n'ayant pas subi une hystérectomie [4], le chirurgien doit souvent exposer l'utérus afin d'avoir accès au site chirurgical. Dans le cas d'une opération sur une femme hystérectomisée, ou sur un homme, il n'y a pas d'utérus, donc les activités le faisant intervenir sont impossibles. D'un point de vue du déroulement opératoire, il y a donc deux populations différentes, d'un côté, les femmes non hystérectomisées et de l'autre, les femmes hystérectomisées et les hommes.

Cette décomposition hiérarchique nous a permis de comprendre l'ensemble des concepts et les relations intervenant au cours d'une rectopexie effectuée selon la technique Grenobloise. Cependant, afin d'utiliser ce modèle dans une application, il est nécessaire d'aller plus loin par la mise en

4. Hystérectomie : opération consistant à réséquer l'utérus.

place d'une représentation plus formelle. C'est cette représentation que nous présenterons dans la prochaine sous partie.

2.3.1.2 Ontologie de la rectopexie

Une ontologie a pour objectif de représenter l'ensemble des concepts et des relations d'un domaine d'une manière très formelle afin que la représentation puisse être à la fois comprise par l'Homme et par la machine. Pour mettre en place cette ontologie, nous avons utilisé le logiciel protégé [5] développé par l'université de Stanford et nous nous sommes servis de l'ontologie OntoSPM [54] comme ontologie de haut niveau. Ainsi, notre travail a consisté à spécialiser OntoSPM afin de représenter la rectopexie. Nous avons nommé cette ontologie OntoRectopexy.

Afin de mieux mettre en avant les ajouts que nous avons effectués, nous présentons en premier lieu OntoSPM.

Presentation d'OntoSPM

OntoSPMs est une ontologie en cours de construction qui a pour objectif d'être une ontologie générique, c'est-à-dire qui pose les bases essentielles pour faciliter la construction et l'interopérabilité d'ontologies applicatives dans le domaine des SPMs. OntoSPM s'appuie sur plusieurs ontologies de haut niveau, dont BFO (Basic Formal Ontology) qui est une ontologie qui fournit des principes clés pour la construction et la cohérence des ontologies. Par exemple, OntoSPM définit les niveaux de granularité (procédure, phase, étapes et activité) comme des sous-concepts du concept "process" défini dans BFO. OntoSPM définit aussi de nombreux autres concepts comme les instruments chirurgicaux, leurs fonctions, les structures anatomiques (emprunté à FMA [69], ontologie spécialisée dans la description de l'anatomie). Mais aussi, les relations entre ces différents concepts, par exemple des relations d'héritage (une étape est un "process"), ou de la fonction d'une catégorie d'instrument chirurgical (un 'dissecting instrument' hasInstrumentFunction some 'to dissect'). La version d'OntoSPM que nous avons utilisé comportait 261 concepts et 3 134 axiomes (énoncé général considéré comme vrai).

OntoRectopexy

Notre travail a consisté à spécialiser OntoSPM en rajoutant les concepts et les relations qui ne sont pas présents dans cette dernière. Par exemple, OntoSPM définit le concept de phase, mais ce concept est générique et ne

5. http://protege.stanford.edu/

représente pas un type de phase particulière, ainsi, nous avons rajouté l'ensemble des phases que nous avons identifiées (dissection, fixation...) et les relations d'héritages les définissant comme des phases. Il nous a aussi été nécessaire de rajouter l'ensemble des verbes d'action (transmettre énergie, dégonfler...), des instruments (agrafeuse Endo-Hernia, agrafeuse Taker...) et des structures anatomique (promontoire, rectum...) qui n'était pas présent dans OntoSPM. Pour l'ajout des structures anatomiques, nous avons extrait les concepts de FMA. Une fois l'ensemble de ces concepts créé, nous avons spécifié les relations (définie par OntoSPM) qui les reliaient les uns aux autres. Au final, OntoRectopexy compte 361 concepts et plus de 3 400 axiomes. Au vu du nombre de concepts et de relations, nous ne pouvons pas tous les présenter ici, nous nous contenterons de deux exemples illustratifs. Le premier mettant en avant les relations entre les phases et les étapes que nous avons mises en place. Le second montrant les relations permettant d'illustrer comment l'ontologie permet de s'assurer qu'un instrument possède le rôle que l'on désire qu'il réalise. Nous avons choisi ces deux exemples, car ils sont les plus représentatifs du travail que nous avons effectué et car ils illustrent bien la capacité de raisonnement que peut apporter l'ontologie.

La figure 2.5 représente les relations entre la phase de dissection et les étapes de cette phase au sein de OntoRectopexy. On observe deux types de relations classiques entre les concepts : les relations d'héritage (en trait plein bleu) et les relations "partie de" (relation en trait pointillé orange). Ainsi, la *dissection* est une sous-classe (relation en trait plein bleu) de *surgical_procedure_phase* qui est une sous-classe de *process*. De même, *preparation_of_the_rectal_fixation_site* est une sous-classe de *surgical_procedure_step*, elle même sous-classe de *process*. De cette manière, les concepts de *dissection* et *preparation_of_the _rectal_fixation_site* partagent les caractéristiques définies par *process* (concept défini par BFO), c'est-à-dire qu'il s'agit de concepts qui possèdent une durée dont le début et la fin peuvent être clairement identifiés. Les relations "partie de" mettent en évidence qu'une étape (*preparation_of_the_rectal_fixation _site*) est une des parties d'une phase (*dissection*), donc le début et la fin d'une étape doivent être inclus entre ceux d'une phase. L'ensemble des concepts des étapes et des phases ont été représentés de cette manière.

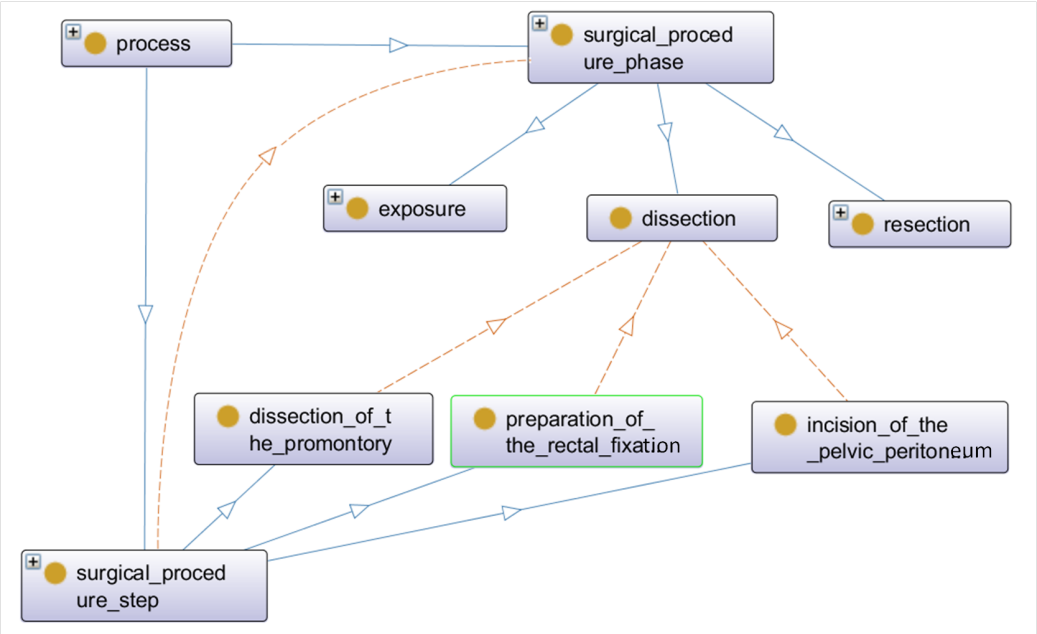


FIGURE 2.5 – Représentation graphique des relations entre la phase de dissection et les étapes qui lui sont attachées au sein de OntoRectopexy. *Les relations en bleu de type $A \rightarrow B$ signifient que A est une classe mère de B. Les relations en orange de type $C \rightarrow D$ signifient que C est une partie de D.*

Prenons un autre exemple : le crochet monopolaire a-t-il la fonction de couper ? Grâce à la figure 2.6, nous observons que le crochet monopolaire (*monopolar_hook*) est un instrument chirurgical (*surgical_instrument*). Or un instrument chirurgical a au minimum une fonction spécifique (relation en jaune pointillé nommée *function_of_instrument*). Deux des fonctions existantes sont de coaguler et de couper (*to_coagulate* et *to_cut*). Ces deux fonctions spécifiques sont des fonctions du crochet monopolaire. Ainsi, il est possible d'utiliser le crochet monopolaire pour couper une cible. Cependant, ceci ne suffit pas à dire que l'activité est réalisable. Notre travail a consisté à ajouter les concepts d'instruments et de fonctions qui n'étaient pas présents dans OntoSPM et de mettre en place les relations de fonction entre eux.

Cette ontologie n'étant pas mature, certaines relations doivent encore être créées entre les différents éléments. C'est par exemple le cas afin de s'assurer qu'une action peut bien avoir lieu sur une cible, par exemple ce n'est pas possible de couper de l'eau liquide.

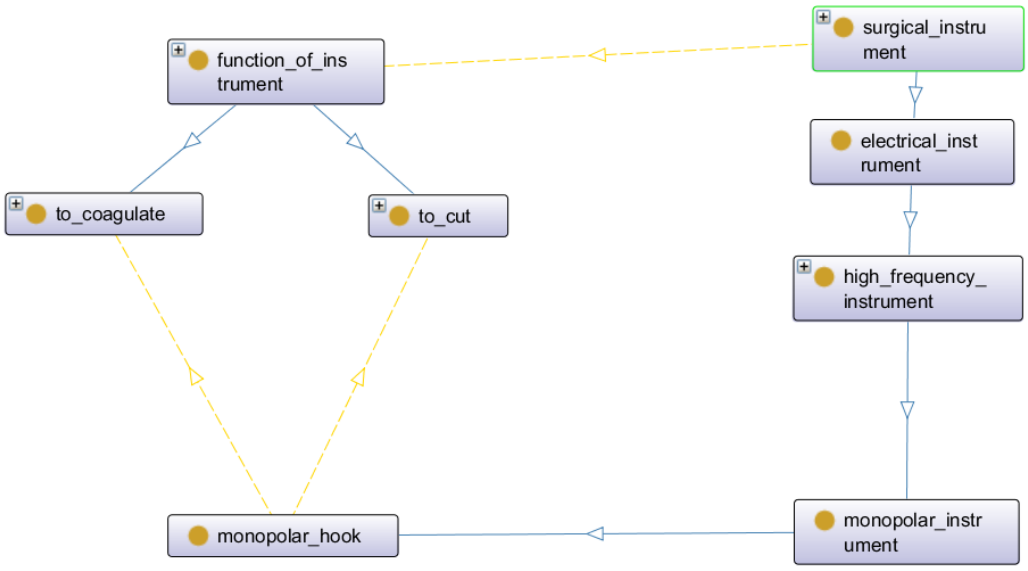


FIGURE 2.6 – Représentation graphique des relations déterminant les fonctions du crochet monopolaire. *Les relations en bleu de type $A \rightarrow B$ signifient que A est une classe mère de B. Les relations en jaune de type $C \rightarrow D$ signifient que C à pour fonction D.*

Dans cette partie, nous avons présenté le déroulement normal d'une rectopexie. Cependant, la représentation hiérarchique et l'ontologie ne prennent pas en compte un élément essentiel lors de l'exécution d'une rectopexie, ou d'une chirurgie en générale : la gestion des événements indésirables.

2.3.2 Modélisation des événements indésirables

Au cours du processus d'élicitation, nous avons abordé le sujet des événements indésirables (EIs) associés à la rectopexie. Ceci nous a permis d'identifier l'ensemble des EIs et de déterminer, à partir de l'expérience des chirurgiens, à quel moment ceux-ci pouvaient survenir.

2.3.2.1 Les événements indésirables et la rectopexie

La rectopexie, comme toute opération chirurgicale, peut entraîner l'apparition d'EIs. Ces EIs peuvent être postopératoires comme des infections urinaires et des hernies incisionnelles [10, 20, 86], mais peuvent aussi apparaître au cours de la chirurgie. Notre objectif étant d'identifier des déviations intraopératoires, nous nous sommes concentrés sur les EIs intraopératoires et nous en avons identifié 9 types pouvant être plus ou moins dangereux pour

le patient, présentés dans le tableau 2.4, avec les phases où il est le plus probable qu'ils surviennent.

Catégorie	Définition	Phase d'apparition
Perforations d'organes creux	Un organe creux est percé entraînant une communication non désirée entre la cavité abdominale et l'intérieur de cet organe, augmentant le risque d'infection	Toutes sauf Fermeture
Plaies vasculaires	Un vaisseau est sectionné entraînant un saignement ou une hémorragie	Toutes
Plaies urologiques	Section d'un vaisseau du système urinaire	Dissection et Résection
Fixations dans le disque intervertébral	Fixation des bandelettes entre 2 vertèbres plutôt que dans le promontoire	Fixation
Brûlures	Brûlure cutanée du patient due à l'optique	Toutes (lorsque l'optique est retiré)
Anesthésique	Problème lié à l'anesthésie (réveil du patient, mauvaise réaction...)	Toutes
Création du pneumopéritoine	Diminution du pneumopéritoine ou injection du gaz entre la paroi et le péritoine	Toutes
Matériels	Matériel non adapté à la réalisation de la tâche	Toutes
Sections nerveuses	Section d'un nerf ou d'un plexus nerveux	Dissection et Résection

TABLE 2.4 – Catégories et phases d'apparition des événements indésirables intraopératoires pouvant survenir au cours d'une rectopexie.

Chaque phase peut être le moment de l'apparition d'un EI intraopératoire, cependant les phases de dissection et de résection sont celles qui présentent le plus de risque pour le patient.

Selon les chirurgiens avec qui nous avons effectué le processus d'élicitation, la majorité des EIs intraopératoires qui apparaissant au cours de la rectopexie sont soit des plaies vasculaires, soit des perforations d'organe creux. La majorité des plaies vasculaires sont des EPRs, car facilement visibles et contrôlables. En revanche, les perforations d'organe creux sont presque exclusivement des EIGs, elles interviennent principalement lors de la fixation des bandelettes sur le rectum, et sont presque impossibles à détecter lors de l'opération, puisqu'elles sont masquées par les bandelettes, et entraînent alors des EIs postopératoires.

2.3.2.2 Ontologie des événements indésirables chirurgicaux

Lors de notre collecte des connaissances préliminaires, nous avons identifié plusieurs ontologies traitant des événements indésirables, parmi lesquelles, nous pouvons citer OntoADR [71, 72] axée sur les réactions indésirables des médicaments, ou OAE axée sur les EIGs en général. Cette dernière comporte plus de 3 500 concepts et 52 170 axiomes, elle est donc très complète et couvre une grande partie du monde médical. Cependant, dans son volet dédié à la chirurgie, elle ne prend en compte que les EIGs postopératoires (figure 2.7). L'ensemble des EIs (EIGs et EPRs) n'est donc pas pris en compte par OAE.

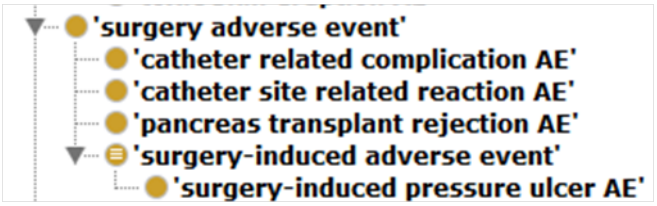


FIGURE 2.7 – Événements indésirables graves présentés dans OAE pour la chirurgie.

Ainsi, il nous a semblé important de mettre en place une ébauche d'ontologie des événements indésirables, quel que soit le moment de leur apparition. Cependant, limiter une telle ontologie uniquement à la rectopexie ne nous semblait pas une solution appropriée. En effet, les 9 catégories d'événements indésirables intraopératoires que nous avons identifiées (tableau 2.4) peuvent aussi s'appliquer à d'autres types de chirurgie laparoscopique. C'est pourquoi le domaine de l'ontologie englobe les événements indésirables dans le cadre d'une opération chirurgicale par voie laparoscopique.

Pour ce faire, nous nous sommes inspirés d'un certain nombre de concepts d'OAE, principalement sur ce qui touche à la déclaration d'un EI et à la gestion des risques associés, en les spécifiant pour l'aspect chirurgical. Pour l'aspect anatomie, nous avons extrait de FMA les concepts dont nous avions besoin. Pour la description des outils chirurgicaux, nous avons pris la même organisation que pour la création de OntoRectopexy. Ainsi, l'ontologie que nous avons mise en place, nommée OntoSurgicalEvents, compte 242 concepts et plus de 1 250 axiomes.

Au cours de l'élaboration de cette ontologie, nous nous sommes principalement concentrés sur la notion de processus de récupération en cas d'apparition d'un EI préopératoire, intraopératoire ou postopératoire. La figure 2.8 représente les relations en jeu lors de l'apparition d'un EI postopératoire nécessitant une nouvelle opération (grade III de la classification de Dindo-Clavien [21]). Dans cet exemple, un EI postopératoire (*postoperative_ event*)

est identifié, celui-ci est soit un EIG ou un EPR (respectivement *adverse-event* et *potential-adverse-event*) et il provient d'une chirurgie (*surgery*). Un EI postopératoire est classifié en fonction de sa gravité selon la classification de Dindo-Clavien (*Dindo_ Clavien_ classification_ severity*). L'analyse détermine qu'il s'agit d'un EI de grade III (*grade_ III_ Dindo_ Clavien _ classification*), ainsi le processus de récupération à mettre en place est une nouvelle opération (*new_ intervention*). En plus de ces concepts, il a été nécessaire de définir des relations qui n'étaient pas présentes dans les autres ontologies. Par exemple, nous avons défini la relation de processus de récupération (représenté en orange pointillé) qui associe la gravité d'un événement (*severity_ of_ event*) à un processus de récupération (*event_ recovery*). La définition de cette relation entre ces deux concepts assure qu'un processus de récupération soit toujours associé à la gravité d'un événement.

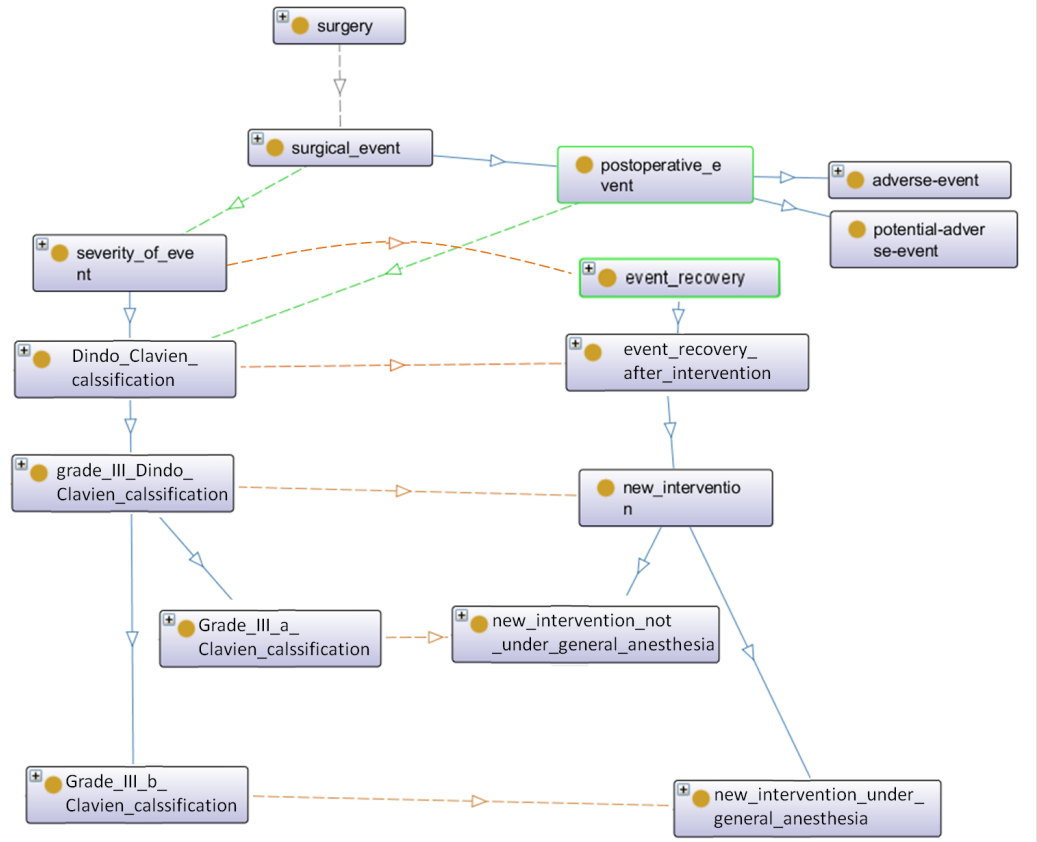


FIGURE 2.8 – Représentation graphique des relations de OntoSurgicalEvents reliant un événement de gravité de grade III(classification de Dindo-Clavien [21]) au processus de récupération à mettre en place. *Les relations en bleu de type $A \rightarrow B$ signifient que A est une classe mère de B. La relation en gris pointillé de type $C \rightarrow D$ signifie que C peut entraîner D. Les relations en vert pointillé de type $E \rightarrow F$ signifient que E est caractérisé par F. Les relations en orange pointillé de type $G \rightarrow H$ signifient que le processus de récupération de G est H.*

Un raisonnement similaire peut être réalisé pour un EI intraopératoire, par exemple avec la classification de Kaafarani [12]. Mais puisque cette classification n'est pas utilisée en pratique et que certains cas ne sont pas pris en compte, comme le cas de la conversion d'une chirurgie laparoscopique en laparotomie, nous n'avons pas spécifié le type de processus de récupération pour chaque grade de gravité. Mais, la relation de processus de récupération qui associe la gravité d'un événement (*severity_ of_ event*) à un processus de récupération (*event_ recovery*), assure que l'ontologie acceptera n'importe quel type de processus de récupération pour un type de gravité d'un EI in-

traopératoire.

2.4 Discussion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodologies existantes pour comprendre le déroulement chirurgical de la rectopexie. Nous avons choisi de modéliser cette chirurgie, car celle-ci, en plus d'être standardisée, est régulièrement réalisée par des experts intéressés par l'explicitation des connaissances. Cette modélisation nous semblait nécessaire pour bien comprendre le déroulement de la rectopexie et les mécanismes mis en jeu lors de l'apparition d'un événement indésirable, au lieu de partir sans la moindre notion élémentaire.

Nous avons fait le choix d'utiliser l'analyse des tâches cognitives pour arriver à la mise en place d'une représentation hiérarchique et d'une ontologie. Ces deux modèles représentent le déroulement normal de la rectopexie sans prendre en compte l'apparition possible d'événements indésirables. Les caractéristiques préopératoires n'ayant pas de rôle majeur sur le déroulement des phases et des étapes, nous avons décidé de les considérer comme négligeables. La représentation hiérarchique permet de comprendre facilement la succession des 7 phases et des 26 étapes permettant de corriger le prolapsus rectal. Grâce aux 21 verbes d'action, aux 13 instruments chirurgicaux et aux 21 cibles pouvant décrire les activités, nous avons recensé 150 combinaisons ayant un sens physique pour la rectopexie. La représentation hiérarchique est en quelque sorte un carnet de route pour effectuer une rectopexie selon la technique Grenobloise.

OntoRectopexy, l'ontologie du déroulement de la rectopexie que nous avons développée s'appuyant sur OntoSPM [54], ouvre les portes pour de nombreuses applications. Par exemple, dans le domaine de la modélisation des processus chirurgicaux (SPM) de nombreuses études se portent sur la reconnaissance automatique de phases, d'étapes ou d'activités. Avec les connaissances inscrites dans l'ontologie, il est envisageable d'améliorer ces méthodes de reconnaissance automatique en ajoutant ces connaissances. En effet, nous avons vu que l'ontologie peut permettre de s'assurer que l'association entre un verbe d'action et un instrument chirurgical est possible grâce aux fonctions de cet outil. Ainsi, la reconnaissance d'un outil suffirait pour que l'ontologie soit capable de retourner l'ensemble des verbes d'action pouvant être fait avec cet outil.

L'avantage d'utiliser une ontologie comparée à un recensement des activités, pour déterminer les activités réalisables, est de s'assurer de leurs exhaustivités. En effet, grâce à la définition des règles permettant de s'assurer de la faisabilité d'une activité, l'ontologie n'oubliera aucune activité. De plus, l'ontologie permet en cas d'ajout d'un élément, par exemple un

nouvel instrument avec ses fonctions, de mettre à jour automatiquement la liste d'activités possibles. On pourrait aussi considérer des activités comme similaires. Par exemple deux activités consistant à couper une structure avec 2 instruments différents sont-elles vraiment deux activités différentes si ces outils ont tous deux la fonction de couper ?

Ainsi, l'utilisation d'ontologie permettrait d'aller plus loin dans l'aide à la chirurgie, en améliorant les méthodes de reconnaissance automatique des activités réalisées par le chirurgien. Bien que cette reconnaissance présente peu d'intérêt pour ledit chirurgien qui sait pertinemment ce qu'il est en train de réaliser, elle est la base essentielle au développement de méthode pour prévenir le chirurgien que ses gestes présentent un risque pour la sécurité du patient.

Pour ce faire, nous avons aussi étudié l'aspect sécurité de la rectopexie en nous intéressant aux événements indésirables qui peuvent survenir pendant la chirurgie. Les événements indésirables postopératoires étant largement étudiés dans la littérature [10, 20, 86], nous nous sommes principalement intéressés, au cours de l'élicitation, aux événements indésirables intraopératoires. Ceci nous a permis d'identifier 9 catégories d'événements indésirables intraopératoires, dont les perforations d'organes creux et les plaies vasculaires qui sont les événements les plus fréquents. Cette étude nous a aussi permis de déterminer que les phases de dissection et de résection étaient celles présentant le plus de risques pour la sécurité du patient. Dans la suite de ce travail, nous décidons donc de nous concentrer uniquement sur ces phases.

Bien qu'une ontologie très complète des événements indésirables graves existe déjà (OAE), nous avons remarqué que le volet chirurgical de cette ontologie se concentrait uniquement sur les événements indésirables postopératoires. Or un événement indésirable peut survenir à tout instant à partir de l'admission du patient jusqu'à longtemps après son départ de l'hôpital. Pour combler ce manque, nous avons essayé de mettre en place une ontologie dédiée aux événements indésirables associés à une chirurgie laparoscopique, que ceux-ci aient lieu avant, pendant ou après l'opération. Cette ontologie est un premier jet et nécessite encore beaucoup de travail avant d'être complète. En effet bien que les notions de causes immédiates et profondes soient présentes, nous n'avons pas listé l'ensemble des causes possibles pour chaque type d'événements indésirables.

Le manque de maturité des ontologies mises en place s'explique par le fait que cette thèse n'a pas pour objectif de mettre des ontologies, mais d'étudier comment les modèles de processus chirurgicaux peuvent aider à la compréhension et à la détection des événements indésirables. Cependant,

il sera nécessaire de continuer le travail sur ces ontologies, par la définition de l'ensemble des concepts et des relations que nous n'avons pas pris en compte, par exemple la mise en place des relations permettant de s'assurer qu'une action peut bien avoir lieu sur une cible. De plus, OntoSPM est elle même en cours de construction, par exemple, comme nous l'avons dit dans la section 1.2.1.2, la définition des activités au sein de OntoSPM est en cours d'évolution, ainsi OntoRectopexy qui s'appuie sur cette ontologie ne peut pas être plus mature que son ontologie mère.

Chapitre 3

Détection de déviations dues à l'apparition d'événements indésirables

Nous avons rappelé dans le chapitre 1 qu'environ 12 000 événements porteurs de risques (EPRs) par an avaient été déclarés dans la base de retour d'expérience (base REX) sur la période 2009 - 2015 [1]. Outre-Atlantique, l'U.S Food and Drug Administration (FDA) a montré que le nombre d'événements indésirables graves (EIGs) a quadruplé en moins de 10 ans [91] : en 2006, moins de 336 000 EIGs avaient été déclarés, alors qu'en 2014 il y en a eu plus de 1,2 million. Ces chiffres ne traduisent pas un accroissement des erreurs médicales, mais bien que le monde médical est de plus en plus préoccupé par ces erreurs. Ce nombre d'événements indésirables (EIs) montre que malgré l'apport des nouvelles technologies fournissant de nombreuses informations aux cliniciens, ou permettant l'exécution de geste plus précis, elles ne sont pas capables de lutter efficacement contre les EIs. Pour être mises sur le marché, ces nouvelles technologies doivent être conformes à certaines normes, par exemple en Europe la directive 93/42/CEE relative aux dispositifs médicaux [92]. Cependant, ces normes prennent uniquement en compte des aspects facilement, de manière relative, quantifiables en matière de sécurité, comme la puissance maximale que peut fournir un appareil en contact avec le patient, ou la biocompatibilité d'une prothèse. Mais rien ne spécifie comment ces dispositifs peuvent lutter contre l'apparition d'EIs.

Avant de penser à lutter contre l'apparition d'EIs, il est indispensable d'être capable de les détecter et de les prédire. Dans ce chapitre, nous présenterons une approche combinant une méthode d'alignement de séquences et des modèles semi-Markovien cachés afin de permettre la détection automatique d'événements indésirables au cours de rectopexies.

3.1 Détection de déviations

La littérature rapporte de nombreuses méthodes permettant la détection automatique de la déviation d'un processus par rapport à un processus "normal". Ces méthodes sont utilisées dans de nombreux domaines, dont la sécurité bancaire [93] et la sécurité informatique [94]. En général, la détection des déviations considère qu'il y a un processus "normal" auquel le nouveau processus est comparé.

Dans le domaine de la sécurité informatique, en se basant sur le principe que le déroulement normal d'un programme suit toujours le même schéma alors que les attaques informatiques peuvent varier et ne suivent pas de schéma particulier, Tan & Xi [94] créent un modèle de Markov caché (HMM) représentant le déroulement "normal" d'un programme. Pour déterminer si un nouveau processus dévie du processus "normal", ils calculent la probabilité que le HMM fournisse le déroulement de ce processus et calculent l'entropie entre les deux types de déroulement, si l'entropie est supérieure à un certain seuil, une attaque est détectée.

En ce qui concerne le domaine de la chirurgie, seuls Bouarfa & Dankelman [63] présentent une méthode d'alignement de séquences pour détecter des déviations. Cependant comme, nous l'avons longuement expliqué dans la section 1.3, cette méthode ne fait aucune différence entre les déviations dues aux particularités anatomiques (DAs) et les déviations dues à l'apparition d'événements indésirables (DEIs). De plus, leur approche et la métrique utilisée sont simplistes. En effet, l'approche se repose uniquement sur l'instrument utilisé, ce qui ne permet pas de connaître le contexte des déviations détectées. La métrique utilisée est uniquement l'absence de correspondance entre une séquence de référence et les séquences à l'étude.

Dans le cadre de la chirurgie, la création d'un processus "normal" consiste à créer un modèle générique de processus chirurgicaux (gSPM). Les techniques d'alignement de séquences proposent une bonne solution pour créer ce gSPM. Ensuite, d'une manière analogue à celle de Bouarfa & Dankelman [63], il est possible de détecter la présence d'une déviation dans une nouvelle chirurgie en la comparant au gSPM. Cependant, nous ne pouvons pas nous contenter d'une telle méthode pour différencier les deux types de déviations (DA et DEI). Pour ce faire, nous avons choisi d'utiliser un modèle semi-Markovien caché après l'alignement des séquences.

3.2 Aspects légaux du recueil de données

Avant de pouvoir utiliser des données de santé, il est obligatoire de les déclarer aux institutions officielles. Avec l'aide du Centre d'Investigation Clinique - Innovation Technologique (CIC-IT) de Grenoble et des chirurgiens, nous avons constitué une base de données de santé, dans le respect de la législation en vigueur. Cette base de données de santé est gérée par le CIC-IT qui s'assure de l'anonymisation des données avant de la céder à nos deux laboratoires de rattachement : le TIMC-IMAG et le LTSI.

La première étape a consisté en la constitution d'un dossier à l'adresse du Comité d'Éthique des Centres d'Investigation Clinique (CECIC) de l'interrégion Rhône-Alpes-Auvergne en vue de demander un avis éthique pour la création de cette base de données. Ce dossier détaillait les informations suivantes :

- les objectifs de la recherche ;
- la population concernée par la recherche ;
- la méthode de recueil de données ;
- le type de données.

Les objectifs de la recherche sont ceux de cette thèse, c'est-à-dire de permettre grâce à la mise en place de SPMs de détecter l'apparition des EIs et de comprendre les causes de leurs apparitions. La population concernée par cette étude est constituée de patients du service de chirurgie digestive du Centre Hospitalier Universitaire (C.H.U.) de Grenoble pour lesquels une indication de rectopexie par cœlioscopie est posée. Le patient doit spécifier son accord par la signature d'un formulaire d'information et de non-opposition (Annexe C). Les données recueillies, par le chirurgien en charge du patient grâce à un cahier d'observation, ont été choisies avec les chirurgiens, car elles pouvaient jouer un rôle dans la survenue et la compréhension des EIs. Ces données sont de trois types : préopératoire (tableau 3.1), intraopératoire (tableau 3.2) et postopératoire (tableau 3.3). Ces trois tableaux présentent les données recueillies et les justifications que nous avons fournies au CECIC.

Un avis éthique favorable du CECIC a été obtenu le 03/09/2014. Ce qui nous a permis de faire les autres démarches auprès du Comité Consultatif sur le Traitement de l'Information en matière de Recherche dans le domaine de la Santé (CCTIRS) et de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL). Les informations demandées par le CCTIRS et la CNIL sont sensiblement similaires à celles pour le CECIC. Le CCTIRS a pour objectif de rendre un avis sur la pertinence des données nominative à caractère personnel par rapport à l'objectif de la recherche, la CNIL a pour objectif d'informer et

de protéger les particuliers à maîtriser leurs données personnelles et à exercer leurs droits.

La demande de constitution de base de santé par le CIC-IT a reçu un accord favorable du CCTIRS le 08/01/2015 et a été déclarée auprès de la CNIL le 12/02/2015. Ces autorisations nous ont permis de mettre en place les démarches de cession de la base de santé anonymisée aux laboratoires TIMC-IMAG et LTSI (une démarche par laboratoire). Un avis favorable du CCTIRS a été reçu le 16/07/2015 pour les deux laboratoires. Les déclarations auprès de la CNIL ont été faites respectivement le 25/02/2016 pour le TIMC-IMAG et le 22/02/2016 pour le LTSI.

Données	Justifications
Âge	Facteur pouvant favoriser l'apparition d'EIs
Antécédents chirurgicaux et obstétricaux	Facteur pouvant favoriser l'apparition d'EIs et pouvant modifier le déroulement chirurgical
Score ASA (American Society of Anesthesiologists)[1]	Décris l'état de santé préopératoire du patient
Date de l'intervention	Donnée de suivi pour le chirurgien (non-disponible pour les chercheurs)
Degré d'entérocèle	Facteur pouvant favoriser l'apparition d'EIs et critère pour évaluer la réussite de l'opération en le comparant avec la valeur postopératoire
IMC	Facteur pouvant favoriser l'apparition d'EIs
Poids	Facteur pouvant favoriser l'apparition d'EIs
Prolapsus rectal en cm	Facteur pouvant favoriser l'apparition d'EIs et critère pour évaluer la réussite de l'opération en le comparant avec la valeur postopératoire
Score de Wexner	Critère de qualité de l'incontinence anale permettant une comparaison avec le score de Wexner postopératoire
Sexe	Donnée modifiant la procédure chirurgicale
Taille	Facteur pouvant favoriser l'apparition d'EIs

TABLE 3.1 – Données préopératoires recueillies et raisons justifiant leur recueil.

1. https://www.asahq.org/resources/clinical-information/asa-physical-status-classification-system

Données	Justifications
Complication	Permets de faire le lien avec les causes immédiates identifiables sur la vidéo
Heure d'induction de l'anesthésie	Permets de calculer la durée de l'anesthésie qui est un facteur pouvant favoriser l'apparition d'EIs
Heure de fermeture des orifices des trocarts	Permets de calculer la durée de l'intervention qui est directement liée à la présence d'EIs intraopératoires
Heure de l'entrée du patient dans le bloc opératoire	Permets de calculer le temps avant l'anesthésie, qui peut être un facteur de stress pour le patient
Heure de l'insertion du premier trocart	Permets de calculer la durée de l'intervention qui est directement liée à la présence d'EIs intraopératoires
Vidéo de l'opération	Permets d'identifier le déroulement de la rectopexie et les causes immédiates de la survenue d'EIs.

TABLE 3.2 – Données intraopératoires recueillies et raisons justifiant leur recueil.

Données	Justifications
Complication	Permets de faire le lien avec les causes immédiates identifiables sur la vidéo
Degré d'entérocèle	Critère postopératoire pour évaluer la réussite de l'opération en le comparant avec la valeur préopératoire
IMC	Critère postopératoire pour évaluer l'influence de l'opération sur l'IMC préopératoire
Incontinence	Critère de qualité
Prolapsus rectal en cm	Facteur pouvant favoriser l'apparition d'EIs et critère pour évaluer la réussite de l'opération en le comparant avec la valeur préopératoire
Qualité de vie postopératoire	Critère subjectif du patient sur la qualité de la chirurgie
Score de Wexner	Critère de qualité de l'incontinence anale permettant une comparaison avec le score de Wexner préopératoire

TABLE 3.3 – Données postopératoires recueillies et raisons justifiant leur recueil.

3.3 Méthode

Notre méthode d'apprentissage de détection off-line de déviations au sein d'une chirurgie de rectopexie est résumée en figure 3.1.

Dans un premier temps, chaque vidéo chirurgicale de l'ensemble de données est manuellement annotée pour créer des iSPMs. Les iSPMs comprennent les activités réalisées par le chirurgien et les EIs intraopératoires (section 3.3.2). Ensuite, les iSPMs sont échantillonnés pour obtenir des séquences discrètes (section 3.3.3). Ces dernières, n'étant pas toutes de la même durée, sont alignées pour avoir le même nombre d'échantillons, par une méthode que nous avons nommée "alignement temporel non-linéraire multi-dimensionnel" (MD-NLTS pour Multi-Dimensional non-linear temporal scaling). Nous obtenons un ensemble de séquences alignées d'apprentissage $S^*_{1..n}$ (section 3.3.4). Grâce à $S^*_{1..n}$, nous créons le modèle spécifique de processus chirurgicaux $\overline{S}$ qui est notre chirurgie de référence (section 3.3.5). On définit et on calcule la distance d entre chaque échantillon de la chirurgie de $S^*_{1..n}$ et $\overline{S}$ (section 3.3.6). Cette distance permet de déterminer la présence d'une déviation sans faire de différence entre les déviations dues à des particularités anatomiques (DAs) et celles dues à des événements indésirables (DEIs). Cette distance d et les séquences alignées $S^*_{1..n}$ nous permettent d'entraîner un modèle semi-Markovien caché (HsMM) afin de créer un modèle de détection capable de faire la différence entre les DEIs et les DAs (section 3.3.7). Le modèle de détection et la chirurgie de référence $\overline{S}$ seront utilisés afin de valider notre méthode (section 3.4.2.1).

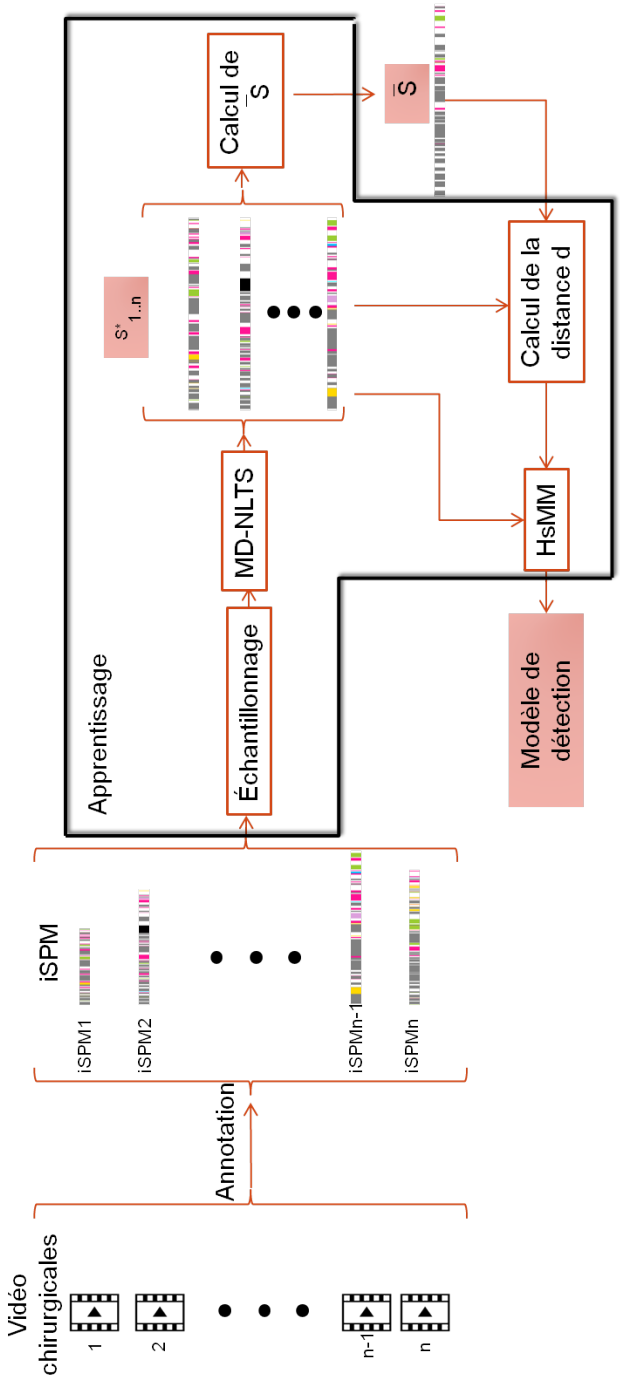


FIGURE 3.1 – Méthode d'apprentissage pour la création du modèle de détection off-line de déviations. *iSPM : modèle individuel de processus chirurgical. MD-NLTS : alignement temporel non-linéaire multi-dimensionnel.* $S^*_{1..n}$ *: séquences d'apprentissage alignées.* $\overline{S}$ *: modèle spécifique de processus chirurgicaux. La distance d est calculée entre chaque échantillon des séquences alignées* $S^*_{1..n}$ *et* $\overline{S}$*. Un modèle semi-Markovien caché (HsMM) est entraîné grâce aux séquences alignées* $S^*_{1..n}$ *et les distances associées d.*

3.3.1 Données

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le déroulement "type" de la rectopexie. Nous avons aussi montré que le déroulement de la rectopexie est très peu influencé par les caractéristiques des patients au niveau des phases et des étapes. Or, notre objectif est de détecter l'apparition d'événements indésirables, ce qui correspond à détecter les causes immédiates de leurs apparitions, c'est-à-dire les activités qui les ont produits. Nous avons vu que pour les femmes hystérectomisées et les hommes, les activités faisant intervenir l'utérus étaient impossibles. Or, ces activités sont nombreuses lors du déroulement opératoire, ainsi la chirurgie de référence comprendra forcément ces activités. Afin de limiter le nombre de DAs, nous avons donc uniquement utilisé les données des rectopexies effectuées sur des femmes non hystérectomisées.

Il est important de noter que toutes les chirurgies ont été effectuées par le même chirurgien, ceci permet de nous affranchir des différences qui peuvent survenir entre les pratiques des chirurgiens.

Les données utilisées pour la détection de déviation sont composées de 11 chirurgies de rectopexie effectuées par un unique chirurgien expert et concernant uniquement des femmes non hystérectomisées. À l'exception de cette restriction, les patients présentent des caractéristiques préopératoires très variées (tableau 3.4) : l'âge varie entre 16 et 81 ans, l'IMC entre 18,1 et 28,3 et 4 femmes sont primipares ou multipares (c'est-à-dire qu'elles ont fait une ou plusieurs grossesses, dans le reste de ce manuscrit nous utiliserons indifféremment le terme de multipare pour les deux cas).

3.3.2 Création des modèles individuels de processus chirurgicaux

Dans le chapitre précédent, nous avions relevé que les phases de dissection et de résection étaient celles qui présentaient le plus de risques d'apparition d'EIs. La rectopexie étant une opération durant en moyenne entre 1H et 1H30 et l'annotation manuelle des chirurgies étant une tâche longue (environ 45 minutes d'annotation pour 15 à 20 minutes de vidéo), nous avons décidé de restreindre l'étude à ces deux phases.

La création des modèles individuels de processus chirurgicaux (iSPMs) passe par l'annotation des vidéos chirurgicales. Pour ceci, nous avons utilisé la version alpha du logiciel Surge Track [2] développé par b<>com [3]. Ce logiciel est dédié à l'annotation de vidéos chirurgicales pour la création d'iSPMs

2. https://b-com.com/en/bcom-surge-track-surgery-workflow-tracker
3. https://b-com.com/en

Patiente	Âge	IMC	Multipare
1	71	26,6	x
2	81	23,5	
3	38	21,8	
4	36	21,5	
5	60	24,6	x
7	67	21,5	x
10	27	18,1	
11	68	21,8	
14	23	19,4	
15	47	28,3	x
17	16	19,1	

TABLE 3.4 – Données préopératoires des femmes non hystérectomisées participant à l'étude de détection de déviations. *Un* x *signifie que la patiente est multipare.*

et se base sur l'ontologie OntoSPM [54] pour les concepts de phase, d'étape et d'activité. La modélisation de la rectopexie nous a permis d'extraire le vocabulaire et les relations entre les différents concepts pour paramétrer le logiciel Surge Track. La figure 3.2, présente l'interface d'annotation de Surge Track où l'on peut voir l'ensemble des phases et des étapes que nous avons définies, ainsi que trois exemples d'activités réalisées par trois acteurs différents : la main droite du chirurgien, la main gauche du chirurgien et la main droite de l'assistant. L'ensemble des activités faites par ces trois acteurs a été annoté.

Par la suite, nous nous intéresserons principalement à la main dominante du chirurgien, c'est-à-dire la main droite pour notre chirurgien. En effet, les 2 autres acteurs apportent peu d'information, l'assistant expose en continu les intestins afin qu'ils ne gênent pas les mouvements du chirurgien au niveau du pelvis ; la main gauche du chirurgien fait davantage d'activités, mais la grande majorité consiste à exposer une structure afin que la main droite puisse effectuer une autre activité.

L'apparition des EIs a été annotée grâce à l'ajout de note ("Add note" sur la figure 3.2) en spécifiant le début et la fin de chaque EI. Parmi les types d'EI intraopératoire que nous avons identifiés dans le précédent chapitre (voir tableau 2.4), nous avons uniquement relevé des EIs du type plaies vasculaires. Dans la suite de ce chapitre, nous parlerons uniquement d'EIs vasculaires.

L'annotation des 11 chirurgies représente 671 activités effectuées par la main dominante et 16 EIs vasculaires, pouvant durer de quelques secondes à plus de deux minutes.

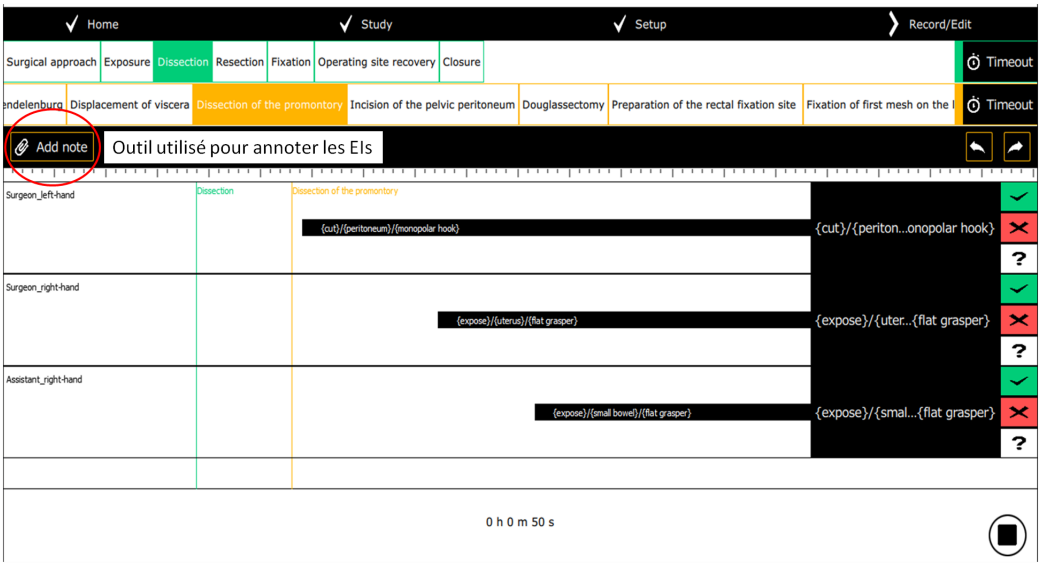


FIGURE 3.2 – Interface d'annotation de Surge Track pour 3 acteurs différents.

La méthode de détection que nous proposons est une méthode automatique. Cependant, c'est la détection des déviations qui est automatique et non celle des activités. De nombreuses études proposent déjà des méthodes de détection automatique des activités comme la méthode de Lalys *et al.* [29]. Dans le cadre d'une application chirurgicale qui utiliserait notre méthode de détection de déviations, les activités pourraient être détectées par ces méthodes de détection d'activités.

3.3.3 Échantillonnage des modèles individuels de processus chirurgicaux

Les iSPMs disponibles après l'annotation sont des séquences d'activités continues, où chaque activité a une durée propre. Pour la suite, il est nécessaire de construire des séquences discrètes, c'est-à-dire des séquences d'éléments qui ont tous la même durée. Pour cela, nous échantillonnons nos iSPMs (figure 3.3).

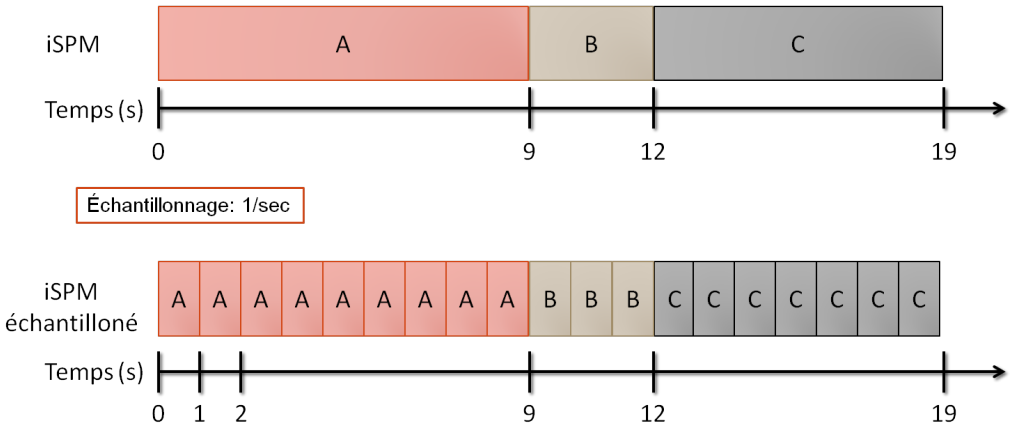


FIGURE 3.3 – Échantillonnage d'un iSPM continu (en haut) pour obtenir un iSPM discret (en bas). *Avant échantillonnage, les activités ont des durées différentes, 9 secondes pour A, 3 secondes pour B et 7 secondes pour C. Après échantillonnage, toutes les activités ont la même durée, cependant A est répété 9 fois, B 3 fois et C 7 fois.*

3.3.4 Alignement temporel non-linéaire multi-dimensionnel

Notre objectif est d'identifier des déviations au sein des iSPMs en les comparants à une référence, mais nous désirons que cette comparaison soit faite en fonction de la succession des activités et non de leur durée respective. C'est pourquoi nous proposons une méthode d'alignement temporel des iSPMs que nous avons nommée alignement temporel non-linéaire multi-dimensionnel (MD-NLTS pour Multi-Dimensional non-linear temporal scaling).

MD-NLTS est une extension de l'alignement temporel non-linéraire (NLTS). NLTS, développé par Forestier *et al.* [95], est lui même une extension de l'algorithme de déformation temporelle dynamique (DTW). Avant de détailler MD-NLTS, nous présenterons l'algorithme DTW, les manières de l'étendre pour prendre en compte des séquences multi-dimensionnelles, et les spécificités de NLTS.

3.3.4.1 La déformation temporelle dynamique

Le principe de la déformation temporelle dynamique est de rechercher l'appariement optimal entre deux séquences temporelles. Pour cela, il nécessaire de calculer la distance cumulative $D(q_I, c_J)$, avec I le nombre d'éléments

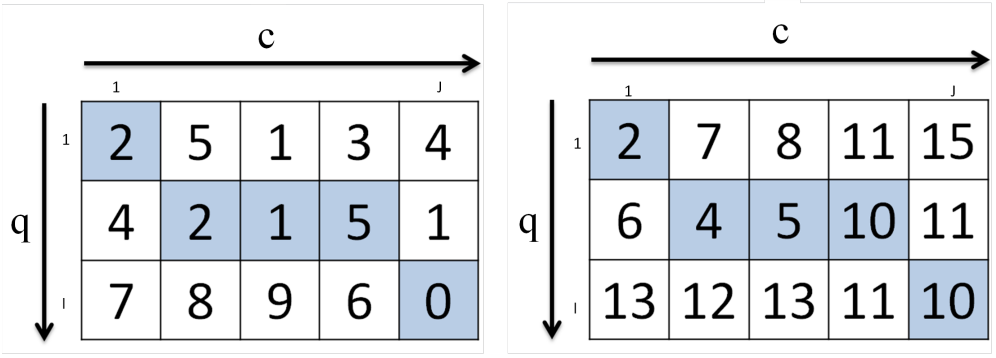
de la séquence q et J le nombre d'éléments de la séquence c, définie par :

$$D(q_i, c_j) = d(q_i, c_j) + min(D(q_{i-1}, c_j), D(q_i, c_{j-1}), D(q_{i-1}, c_{j-1})) \ , \quad (3.1)$$

avec $i \in [1, I]$, $j \in [1, J]$ et $d(q_i, c_j)$ la distance locale entre l'élément i de q et l'élément j de c. La définition de $d(q_i, c_j)$ dépend du type de séquence que l'on traite. Dans le cas de séquences numériques, $d(q_i, c_j)$ est généralement la distance euclidienne, dans le cas de séquences littérales, il est nécessaire de définir des équivalences entre les termes pour obtenir cette distance locale.

La figure 3.4 illustre le calcul de la distance cumulative à partir des distances locales connues. La figure 3.4a présente la distance entre chaque élément des deux séquences dans chaque case du tableau. Grâce à cette figure, il est possible de calculer la distance cumulative (figure 3.4b). Ainsi dans cet exemple, la distance DTW est de 10, et le chemin le plus court est représenté en bleu.

L'algorithme DTW a été initialement prévu pour une séquence uni-dimensionnelle, cependant dans notre cas les séquences comportent trois dimensions : le verbe d'action, l'instrument et la cible.



(a) Distance locale $d(q_i, c_j)$. (b) Distance cumulative $D(q_i, c_j)$.

FIGURE 3.4 – Calcul de la distance cumulative (b), grâce à la distance locale (a) entre 2 séquences dans l'algorithme DTW. *Le chemin en bleu représente le plus court chemin entre les 2 séquences.*

3.3.4.2 La déformation temporelle dynamique multi-dimensionnelle

Pour répondre à ce problème, deux types d'extensions à DTW permettent de prendre en compte les séquences multi-dimensionnelles [96] : la déformation temporelle dynamique dépendante (DTW_D) et la déformation temporelle dynamique indépendante (DTW_I). La différence entre ces deux méthodes réside dans la manière dont la distance entre deux séquences est calculée.

Dans le cas de DTW_D, le calcul de la distance DTW entre 2 séquences multi-dimensionnelles est fait de manière similaire à celle de DTW pour une dimension (équation 3.1), mais la distance locale entre deux éléments $d(q_i, c_j)$ est définie comme la somme de chaque distance locale uni-dimensionnelle de ces 2 éléments (équation 3.2).

$$d(q_i, c_j) = \sum_{m=1}^{M} d(q_{i,m}, c_{j,m}) \ , \tag{3.2}$$

avec $d(q_{i,m}, c_{j,m})$ la distance locale entre l'élément i de q et l'élément j de c sur la dimension m.

Pour DTW_I, un DTW uni-dimensionnel est fait sur chaque dimension et la distance est la somme de ces distances DTW uni-dimensionnelles (équation 3.3).

$$DTW_I(q, c) = \sum_{m=1}^{M} DTW(q_m, c_m) \ , \tag{3.3}$$

où $DTW_I(q, c)$ est la distance multi-dimensionnelle totale entre les séquences q et c et $DTW(q_m, c_m)$ est la distance DTW sur la dimension m entre ces deux séquences.

Chacune de ces méthodes, DTW_D et DTW_I, s'applique donc à des cas différents. Dans le cas de DTW_D, les dimensions sont directement reliées entre elles, alors que pour DTW_I, elles sont totalement indépendantes. Dans notre cas, chaque composant des activités constitue une dimension. Cependant, ceux-ci sont reliés entre eux, nous avons donc développé une méthode similaire à DTW_D.

Nous aurions pu utiliser une méthode DTW_D, mais une telle méthode (tout comme DTW) ne permet pas de faire d'alignement multiple, c'est-à-dire un alignement entre plusieurs séquences sans prendre une d'entre elles

comme référence. Or l'alignement temporel non-linéaire (NLTS) proposé par Forestier *et al.* [95] permet de faire ce type d'alignement.

3.3.4.3 L'alignement temporel non-linéaire

NLTS est une méthode d'alignement multiple, pour les iSPMs à une dimension, composée de 3 étapes (figure 3.5) :

1. une séquence moyenne est calculée grâce à la méthode de DTW Barycenter Averaging (DBA) [97]. DBA est une extension de DTW qui permet, par un processus de raffinement itératif, de créer une séquence moyenne à partir d'un ensemble de séquences ;
2. NLTS aligne indépendamment cette séquence moyenne sur chaque iSPM. Les iSPMs ne sont pas alignés sur la séquence de référence afin de conserver l'ensemble de l'information ;
3. ces alignements sont étendus, ce qui modifie le nombre d'échantillons, en utilisant la largeur maximum de chaque élément pour conserver l'ensemble de l'information. Les chirurgies alignées ont alors toute la même longueur, mais celle-ci est différente de la longueur de la séquence de référence.

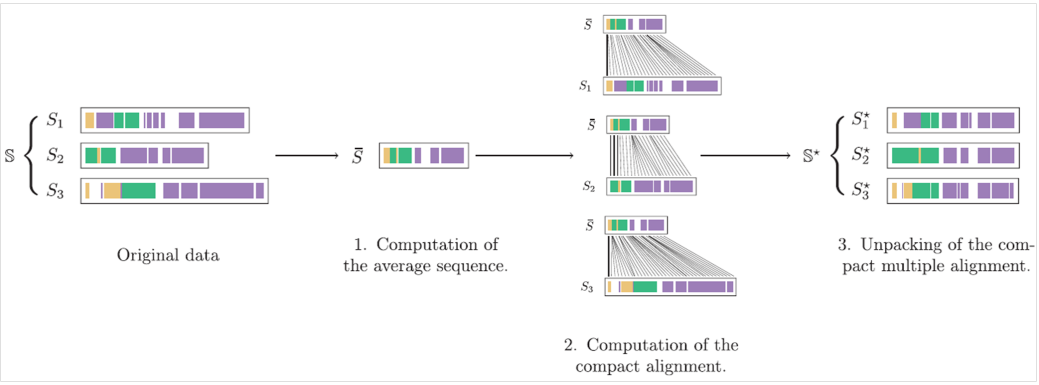


FIGURE 3.5 – Étapes de l'alignement temporel non-linéaire [95].

Comme pour DTW, il est nécessaire de définir la manière dont la distance locale entre deux séquences est calculée. Or, les iSPMs, composés de labels, sont des séquences littérales et non numériques, il est donc impossible d'utiliser la distance euclidienne. Forestier *et al.* [95] ont défini la distance $d(q_i, c_j)$ égale à 0 si l'élément q_i est le même que l'élément c_j, et égale à 1 sinon (équation 3.4). Cette distance est utilisée au sein de la première étape de NLTS.

$$d(q_i, c_j) = \begin{cases} 0, & \text{si } q_i = c_j \\ 1, & \text{si } q_i \neq c_j \end{cases} . \tag{3.4}$$

Les avantages de NLTS comparé à une méthode classique de DTW sont les suivants :

1. Contrairement à DTW, pour effectuer un alignement entre 3 séquences ou plus, NLTS ne choisit pas une référence parmi l'ensemble des données, cette référence est la séquence moyenne créée par DBA ;
2. Il n'y a aucune perte d'information, car les séquences sont étendues au cours de l'étape 3 de NLTS, ainsi même un élément avec peu d'échantillons sera toujours conservé.

Cependant, le principal problème est que NLTS ne propose qu'un alignement uni-dimensionnel. Ainsi dans le cas d'un alignement sur des activités, qui sont constituées de 3 composants (le verbe d'action, l'instrument chirurgical et la cible), NLTS considère le triplet comme un seul élément, donc la séquence comme uni-dimensionnelle. Ainsi, si nous avons 3 activités définies par A_1 : <verbe_1, instrument_1, cible_1>, A_2 : <verbe_1, instrument_2, cible_1> et A_3 : <verbe_3, instrument_3, cible_3>. NLTS considérera que A_1 est aussi différent de A_2 que de A_3, alors que l'on voit clairement que A_1 et A_2 ne diffèrent que par l'instrument. C'est pour cette raison que nous avons décidé d'étendre NLTS en une version multi-dimensionnelle.

3.3.4.4 L'alignement temporel non-linéaire multi-dimensionnel

Le fonctionnement de MD-NLTS est similaire à celui de NLTS, la différence réside dans le calcul de distance lors de création de la séquence moyenne par DBA puisque nous avons une séquence multi-dimensionnelle. Nous avons utilisé une méthode similaire à DTW_D puisque les éléments de chaque dimension sont liés les uns aux autres. Nous avons donc défini la distance entre deux éléments $d(q_i, c_j)$ comme la somme des distances sur chaque dimension (équation 3.5).

$$d(q_i, c_j) = \sum_{m=1}^{M} \alpha_m * d(q_{i,m}, c_{j,m}) \ , \tag{3.5}$$

avec, $\alpha_m \geq 0$ et,

$$d(q_{i,m}, c_{j,m}) = \begin{cases} 0, & \text{si } q_{i,m} = c_{j,m} \\ 1, & \text{si } q_{i,m} \neq c_{j,m} \end{cases} \ . \tag{3.6}$$

Le coefficient α_m permet de faire varier l'importance d'un des composants de l'activité. Nous avons intégré ce coefficient afin de pouvoir étudier l'influence de chaque composant sur notre méthode de détection.

En sortie de MD-NLTS, toutes les séquences sont alignées, nous notons cet ensemble $S^*_{1..n}$. Ces séquences alignées comprennent les activités, mais aussi les informations sur la présence d'EIs.

3.3.5 Création de la chirurgie de référence

Pour mettre en avant les déviations, nous avons besoin de comparer les séquences alignées $S^*_{1..n}$ à une référence. Cependant, nous ne pouvons pas utiliser la séquence moyenne créée par DBA (première étape de NLTS), car celle-ci n'a pas la même longueur que les séquences alignées $S^*_{1..n}$. Nous créons donc une référence, notée $\overline{S}$, constituée de l'activité la plus fréquente (à chaque temps des échantillons alignés) des séquences alignées $S^*_{1..n}$.

$\overline{S}$ est un modèle de processus chirurgicaux (SPM), mais il ne s'agit pas d'un modèle générique de processus chirurgicaux (gSPM), car celui-ci ne représente pas l'ensemble des chemins décrits par nos iSPMs, mais uniquement l'enchaînement le plus fréquent d'activités. De plus, les iSPMs que nous avons utilisés appartiennent tous à des chirurgies de femmes non hystérectomisées effectuées par le même chirurgien, donc ce SPM n'est pas générique, mais est spécifique aux femmes non hystérectomisées opérées par ce chirurgien. Nous avons donc décidé de nommer ce SPM un modèle spécifique de processus chirurgicaux (sSPM). Nous définissons un sSPM comme une représentation schématisant le déroulement opératoire le plus fréquemment suivi pour un ensemble d'iSPMs partageant des caractéristiques (sexe, âge...). Ces caractéristiques décrivent une population de patient spécifique.

3.3.6 Calcul de la distance entre la chirurgie de référence et une chirurgie de l'ensemble d'apprentissage

$\overline{S}$ est utilisée comme référence à laquelle nous comparons nos iSPMs alignés $S^*_{1..n}$ pour mettre en évidence des déviations. Pour ce faire, nous calculons, à chaque instant t, la distance entre $\overline{S}$ et une chirurgie S^*_s de $S^*_{1..n}$ de la même manière que dans l'équation 3.5, avec $i = j = t$:

$$d(\overline{S}_t, S^*_{s,t}) = \sum_{m=1}^{M} \alpha_m * d(\overline{S}_{t,m}, S^*_{s,t,m}) \ , \tag{3.7}$$

où, $\overline{S}_t$ est l'activité de $\overline{S}$ à l'instant t, $S^*_{s,t}$ l'activité du iSPM aligné S^*_s à l'instant t, et :

$$d(\overline{S}_{t,m}, S^*_{s,t,m}) = \begin{cases} 0, & \text{si } \overline{S}_{t,m} = S^*_{s,t,m} \\ 1, & \text{si } \overline{S}_{t,m} \neq S^*_{s,t,m} \end{cases} \tag{3.8}$$

Ainsi, pour $\alpha_m = 1$, si les 3 composants des activités du sSPM $\overline{S}$ et de l'iSPM aligné S^*_s à l'instant t sont identiques la distance est de 0, et pour chaque composant différent la distance augmente de 1. Les α_m sont les mêmes que ceux utilisés dans MD-NLTS.

Avec cette distance, nous pouvons savoir à chaque instant s'il existe une déviation au sein des iSPMs, cependant contrairement à l'étude de Bouarfa & Dankelman [63], nous désirons différencier les déviations dues aux particularités anatomiques (DA) de celles dues à l'apparition d'EIs (DEI). C'est pour cela que nous utilisons un modèle de Markov.

3.3.7 Modèle semi-Markovien caché

Les HMMs ont été présentés par Baum et ses collègues dans une série de publications parues entre 1966 et 1970 [98–101]. Ils sont depuis largement utilisés dans de nombreux domaines comme la reconnaissance vocale [102], la reconnaissance de mouvements [103–106], la reconnaissance de SPMs [29, 36, 44, 45].

Avant de parler de la manière dont nous avons utilisé les HsMMs, nous présenterons ce que sont les modèles de Markov cachés (HMMs) et ce qui les différencie des HsMMs.

3.3.7.1 Modèles de Markov cachés

Un HMM est défini par [60] :

- un ensemble d'états cachés S :

  $S = \{S_1, S_2, ..., S_N\}$, avec N le nombre d'états cachés ;

- le dictionnaire V de symboles pouvant être émis par le système :

  $V = \{V_1, V_2, ..., V_M\}$, avec M le nombre de symboles ;

- la séquence d'observation O :

  $O = O_1, O_2, ..., O_T$,

  avec T le nombre d'observations composant la séquence. Chaque observation O_t ($t \in [1, T]$) est issue du vocabulaire V ;

- la matrice des probabilités de transition A :

  $A = [a_{i,j}]$, où $a_{i,j} = Pr(s_{t+1} = S_j | s_t = S_i)$, $\forall i$ et $j \in [1, N]$.

  C'est-à-dire la probabilité que l'état à t+1 soit S_j, sachant que l'état à l'instant t est S_i ;

- la matrice des probabilités d'émission B :

  $B = [b_j(m)]$, où $b_j(m) = Pr(o_t = V_m | s_t = S_j)$ et $m \in [1, M]$.

  C'est-à-dire la probabilité que l'observation à l'instant t soit V_m, sachant que l'état est S_j ;

- la matrice de probabilités d'initialisation Π :

  $\Pi = [\pi_i]$, où $\pi_i = Pr(s_1 = S_i)$

  C'est-à-dire la probabilité que le premier état soit S_i.

La figure 3.6 présente un exemple simplifié du fonctionnement de ces différents éléments dans le cas de deux états cachés (S_1 et S_2) et de trois symboles observables (V_1, V_2 et V_3). La probabilité que le premier état caché d'une séquence soit S_2 est de $\pi_2 = 0,9$. À l'instant suivant, il y a 7 chances sur 10 ($a_{2,1}$) que l'état caché soit S_1 et 3 chances sur 10 de rester dans l'état S_2 ($a_{2,2}$). À chaque instant, les états cachés émettent un symbole observable. Un observateur extérieur au système voit uniquement ces symboles. La probabilité que l'état S_2 émette le symbole V_3 est de 0,2 ($b_2(V_3)$) et pour l'état S_1 la probabilité d'émettre le symbole V_3 est de 0,5 ($b_1(V_3)$). Les 3 matrices de probabilité forment le modèle HMM : $\lambda = (\Pi, A, B)$.

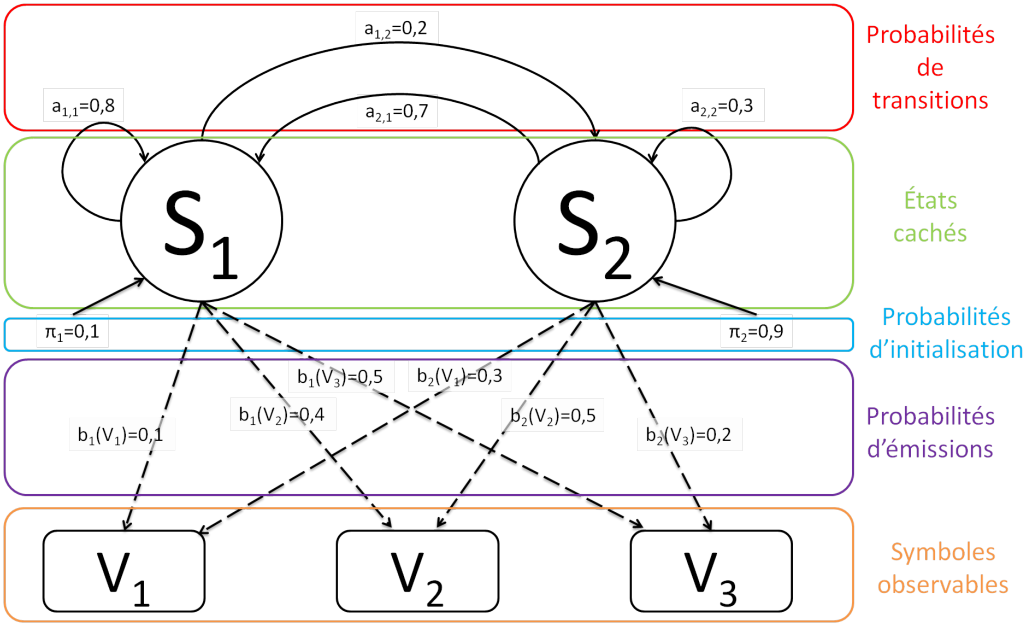


FIGURE 3.6 – Représentation des différents composants d'un HMM à deux états cachés et trois symboles observables.

Il existe trois problématiques différentes lors de l'utilisation des HMMs :

1. Le problème d'évaluation : c'est-à-dire comment peut-on calculer la probabilité d'avoir la séquence d'observation O en connaissant le modèle λ ,$P(O|\lambda)$?
2. Le problème de déduction de l'enchaînement des états cachés : c'est-à-dire comment déterminer la séquence des états cachés expliquant la séquence d'observation O en utilisant le modèle λ ?
3. Le problème d'apprentissage : c'est-à-dire comment optimiser les paramètres du modèle λ afin de décrire la séquence d'observation O ?

Pour répondre à ces questions, il existe des algorithmes basés sur la procédure "forward/backward" [60]. Pour le problème d'évaluation, seule la partie "forward" de cette procédure est utile. Les deux autres problèmes utilisent respectivement l'algorithme de Viterbi [107] et celui de Baum-Welch [98–101], incorporant la procédure "forward/backward".

3.3.7.2 Modèles semi-Markoviens cachés

Dans les HMMs, la stationnarité dans un état est représentée par des auto transitions, c'est-à-dire que la durée de séjour dans un état suit une loi

exponentielle décroissante. Or, ceci n'est pas compatible avec certains phénomènes où la durée de séjour dans un état peut être excessivement longue, comme l'illustre l'exemple ci-dessous.

Prenons un cas simplifié : un maire d'une commune française. Les états cachés pouvant décrire son mandat sont les suivants : en poste et démission. Les symboles observables par la population sont les différentes réformes mises en place et les scandales. En France, la durée d'un mandat de maire est de 6 ans, si l'on considère que l'évolution de cet état est prise toutes les semaines ceci fait 312 évolutions possibles de cet état. En théorie, un maire étant élu, la probabilité de rester dans l'état caché "en poste" est de 1, réduisons la à 0,99 pour prendre en compte qu'une démission est possible. La probabilité qu'un maire soit encore en poste après 1 an est de 0,59 ($0{,}99^{52}$) et après 6 ans de 0,04 ($0{,}99^{52*6}$). Cela voudrait dire que sur les 37 000 maires élus en 2014 seulement 1 480 (37 000*0,04) finiront leur mandat. Cet exemple illustre bien que les HMMs ne permettent pas de représenter les longues durées de séjour dans un état. Or, dans notre cas, le déroulement d'un iSPM peut être différent de celui du sSPM pendant toute la durée de la chirurgie.

Les modèles semi-Markoviens cachés (HsMMs), aussi nommés dans la littérature modèles de Markov cachés à durée explicite [108], permettent de pallier à ce problème. Dans ceux-ci, les transitions d'un état vers lui-même sont impossibles, mais une matrice de probabilité de durée de séjour est ajoutée au modèle λ pour permettre de rester dans un état. La matrice de transition A est modifiée comme suit :

$$A = [a_{i,j}]\,, \text{ où } \begin{cases} a_{i,j} = Pr(s_{t+1} = S_j | s_t = S_i), & \text{pour } i \neq j \\ a_{i,j} = 0, & \text{pour } i = j \end{cases} . \tag{3.9}$$

La matrice de probabilité de durée de séjour P qui représente la probabilité que la durée de séjour u_i dans l'état S_i soit d est définie par :

$$P = [p_i(d)]\,, \text{ où } p_i(d) = Pr(u_i = d | s_t = S_i) \text{ et } d \in [1, D] \ , \tag{3.10}$$

avec D la durée maximale de séjour dans un état.

Les autres matrices restent inchangées et le modèle devient $\lambda = (\Pi, A, B, P)$.

La figure 3.7 représente l'influence de la matrice de probabilité de durée de séjour. Sur cette figure, on voit que l'état S_1 est associé à la durée d_1 qui est égale à 2 unités de temps, que S_2 est associé à la durée d_2 qui est égale à 3 unités de temps, etc. Si on considère que la probabilité de transition entre l'état 1 et l'état 2 est de 1 ($a_{1,2} = 1$), dans le cadre d'un HMM classique l'état à t_2 serait S_2. C'est ici qu'intervient la matrice de probabilité de durée de

séjour P dans un HsMM. La probabilité de transition entre l'état S_1 et S_2 est calculée par le produit de la probabilité de $a_{1,2}$ et de $p_1(d)$ (probabilité que la durée de séjour dans l'état S_1 soit d). Puisque $p_1(1) = 0.01$, $p_1(2) = 0.95$ et $p_1(3) = 0.04$, il est plus probable de rester 2 unités de temps dans l'état S_1 que 1 ou 3 unités de temps.

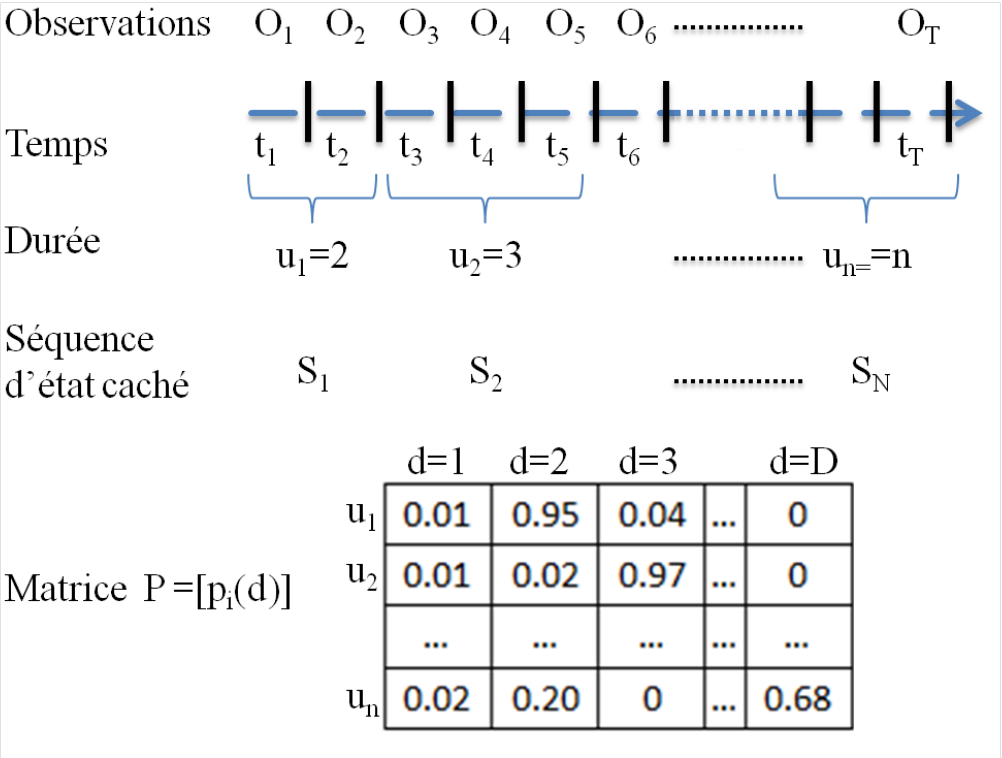


FIGURE 3.7 – Représentation de l'influence de la matrice de probabilité de durée de séjour au sein d'un HsMM.

En reprenant l'exemple du maire d'une commune française. Dans le cadre d'un HsMM, les auto transitions étant impossibles, la probabilité de passer de l'état en poste à démission serait de 1. Cependant, la matrice de probabilité de durée de séjour mettrait l'accent sur le fait qu'une grande majorité des mandats arrive à échéance, ainsi, on peut considérer que la probabilité de rester en poste 6 ans est de 0,90 ($p_{en_poste}(6ans) \approx 0,90$), ce qui semble plus cohérent avec la vérité politique ou les révocations ne sont pas monnaie courante.

C'est pour cette possibilité de représenter de longues durées de séjour

que nous avons décidé d'utiliser un HsMM. En effet, les états cachés que nous souhaitons mettre en évidence grâce à notre modèle sont les déviations (DA ou DEI), ou leur absence (voir section 3.3.7.3). Or, il est théoriquement possible qu'une chirurgie ne subisse aucune déviation et donc tout comme notre exemple sur le maire en poste, un HMM ne serait pas adapté.

3.3.7.3 Apprentissage du modèle semi-Markovien caché dans notre étude

Afin d'obtenir le modèle λ qui nous permettra d'être capable de détecter et de catégoriser les déviations, nous devons résoudre le problème d'apprentissage (problème 3 énoncé en section 3.3.7.1, page 99). C'est-à-dire optimiser les paramètres du modèle λ afin de décrire les séquences d'observations. Nous avons donc besoin de définir des séquences d'observations et les séquences d'états cachés associés. Pour ce faire, nous disposons de deux éléments :

- un ensemble de chirurgies alignées $S^*_{1..n}$ comportant des informations sur les activités du chirurgien et les événements vasculaires étant survenus ;
- la distance $d(\overline{S}_t, S^*_{s,t})$, à chaque instant t, entre chaque chirurgie alignée S^*_s de $S^*_{1..n}$ et le sSPM $\overline{S}$ (équation 3.7, 97.

Création des séquences d'observations

Les séquences d'observations sont créées à partir des activités des chirurgies alignées $S^*_{1..n}$ et à la distance $d(\overline{S}_t, S^*_{s,t})$. Ainsi, les symboles pouvant être émis sont du type <distance, verbe d'action, instrument chirurgical, cible>.

Création des séquences d'états cachés

Nous avons défini trois états cachés :

- pas de déviations : la chirurgie se déroule selon le sSPM ;
- déviation anatomique (DA) : une déviation sans conséquence pour la sécurité du patient est présente ;
- déviation événementielle (DEI) : une déviation pouvant entraîner un risque pour la sécurité du patient est présente.

Les séquences d'états cachés sont créées grâce à la distance $d(\overline{S}_t, S^*_{s,t})$ et aux événements de la chirurgie alignée S^*_s. Pour chaque instant t :

- lorsque la distance est de 0, l'état caché est "pas de déviations" ;
- lorsque la distance est supérieure à 0 et qu'il n'y a pas d'événement vasculaire, l'état est "déviation anatomique" ;
- lorsque la distance est supérieure à 0 et qu'il y a un événement vasculaire, l'état caché est "déviation événementielle".

La figure 3.8 représente ce processus de création de la séquence d'états cachés.

(a) $d(\overline{S}, S_s^*)$: distance entre une chirurgie S_s^* et le sSPM $\overline{S}$. Bleu = 0, jaune = 1, gris = 2, rouge = 3.

(b) Événement vasculaire de la chirurgie S_s^*. Bleu = pas d'événement, jaune = événement vasculaire.

(c) Séquence d'états cachés. Bleu = pas de déviations, jaune = déviation anatomique, gris = déviation événementielle.

FIGURE 3.8 – Représentation de la création de la séquence d'états cachés pour la chirurgie S_s^*. *Si* $d(\overline{S}_t, S_{s,t}^*) = 0$ *(a), l'état caché est "pas de déviation" (c). Si* $d(\overline{S}_t, S_{s,t}^*) > 0$ *(a), et qu'il n'y a pas d'événement vasculaire en cours (b), l'état caché est "déviation anatomique" (c). Si* $d(\overline{S}_t, S_{s,t}^*) > 0$ *(a) et qu'il y a un événement vasculaire en cours (b), l'état caché est "déviation événementielle"(c).*

Sur l'ensemble de nos séquences, l'état "pas de déviation" représente en moyenne 68% des séquences alignées, l'état "déviation anatomique" 26% et l'état "déviation événementielle" 6%.

Ces séquences d'états cachés constituent notre vérité terrain qui nous permettra d'entraîner et de valider notre modèle.

Création du modèle λ

Grâce aux séquences d'observations et aux séquences d'états cachés associées, nous pouvons entraîner notre modèle afin d'estimer les différentes matrices du modèle $\lambda = (\Pi, A, B, P)$. Pour ce faire, nous avons utilisé l'algorithme développé par Yu & Kobayashi [108], car celui-ci a une complexité algorithmique en $O((ND + N^2)T)$, avec N le nombre d'états cachés, D la durée maximale de séjour dans un état et T le nombre d'observations composant une séquence. En comparaison, les algorithmes classiques d'HsMMs ont une complexité en $O(N^2DT)$. Ainsi, l'algorithme de Yu & Kobayashi [108] a une complexité réduite d'un facteur D. Or, cette durée maximale de séjour dans un état peut théoriquement être égale à la durée totale des séquences lorsqu'il n'y a aucun changement d'état.

3.3.8 Propagation de l'information temporelle

L'inconvénient d'utiliser une méthode d'alignement temporel comme MD-NLTS est que l'on perd toute l'information temporelle puisqu'en plus de modifier le nombre d'échantillons, ceux-ci n'ont plus tous la même durée suite à l'étape 3 de NLTS (section 3.3.4.3). Ainsi, il est impossible de présenter des résultats dans le domaine temporel. Pour résoudre ce problème, nous avons décidé de propager l'information temporelle à travers l'ensemble de notre méthode. Cette information n'intervient pas dans le processus de détection, mais elle nous permet de revenir à la dimension temporelle a posteriori.

Le principe de cette propagation est illustré en figure 3.9. À l'origine, nous avons une séquence continue ou les activités sont définies par un début et une fin (représenté par les chiffres 0-5 et 5-8). Lors de l'échantillonnage, on affecte à chaque échantillon l'instant de début et l'instant de fin de l'activité dont il est issu. Ensuite, l'alignement a lieu et le nombre d'échantillons pour chaque activité d'origine est modifié. On compte alors le nombre d'échantillons issus de la même activité (même verbe d'action, cible, instrument chirurgical, début et fin) et on divise la durée de l'activité par le nombre d'échantillons après alignement pour connaître la durée réelle que représente chaque échantillon. Pour finir, nous mettons à jour les débuts et fins de chaque échantillon, afin que chaque activité dans l'iSPM aligné soit associée à sa durée réelle, quel que soit le nombre d'échantillons qui la décrit.

L'activité blanche de la figure 3.9 commence à 0 et finit à 5. Après l'échantillonnage, les cinq échantillons conservent ce début et cette fin. Après l'alignement, il y a 10 échantillons, ainsi chaque échantillon a une durée de 0,5. Dans la suite de la méthode de détection, cette information est attachée aux séquences d'observations et d'état cachés de manière muette, c'est-à-dire qu'elle n'intervient pas. Cette information temporelle nous permet de comparer les séquences détectées et les états cachés "ground truth" dans le domaine temporel.

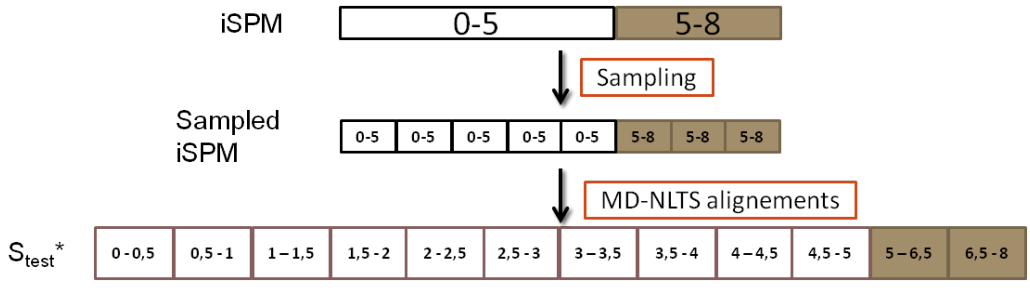


FIGURE 3.9 – Propagation de l'information temporelle de deux activités dans le processus d'alignement des séquences

Le retour dans la dimension temporelle avec cette propagation permet non seulement d'avoir des résultats ayant un sens physique, mais aussi d'appliquer un filtrage sur les résultats. En effet, selon les cliniciens avec qui nous avons travaillé, un état ayant une durée inférieure à une seconde n'est pas significatif.

Dans cette section, nous avons présenté la méthodologie mise en place pour créer un modèle pour détecter et différencier des déviations. Celle-ci est principalement composée de deux étapes clés : l'alignement des séquences par MD-NLTS afin de pouvoir créer un sSPM qui servira de référence pour détecter les déviations ; et le modèle HsMM pour les différencier. Nous avons aussi présenté comment nous avons propagé l'information temporelle. Dans la section suivante, nous verrons les processus mis en place pour valider le sSPM et le modèle de détection de déviations.

3.4 Validation

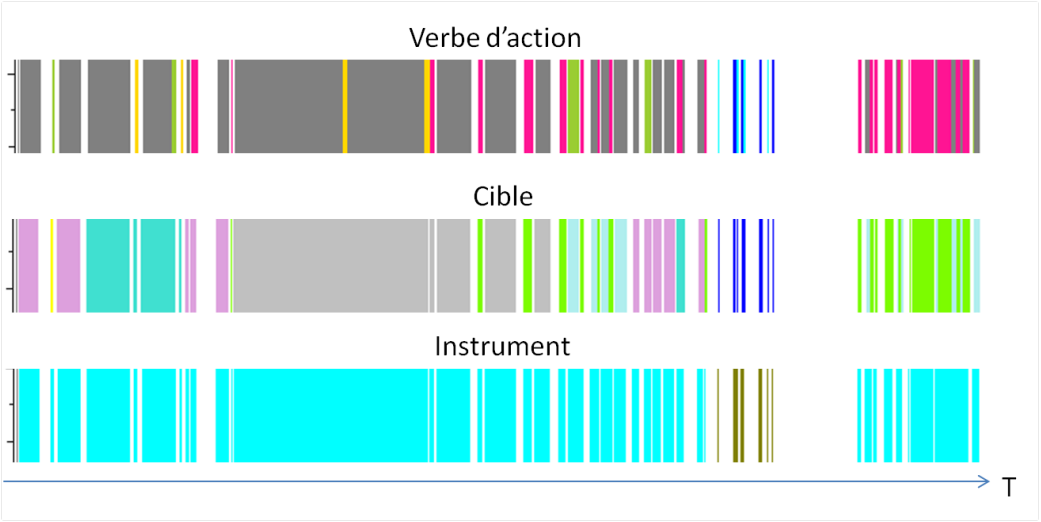
3.4.1 Validation de la création du modèle spécifique de processus chirurgicaux

Les états chirurgicaux (pas de déviation, déviation anatomique et déviation événementielle) sont obtenus en calculant la distance entre les iSPMs alignés et le modèle spécifique de processus chirurgicaux (sSPM). Nous avons donc vérifié avec l'aide d'un chirurgien expert que le sSPM représentait effectivement un déroulement chirurgical cohérent.

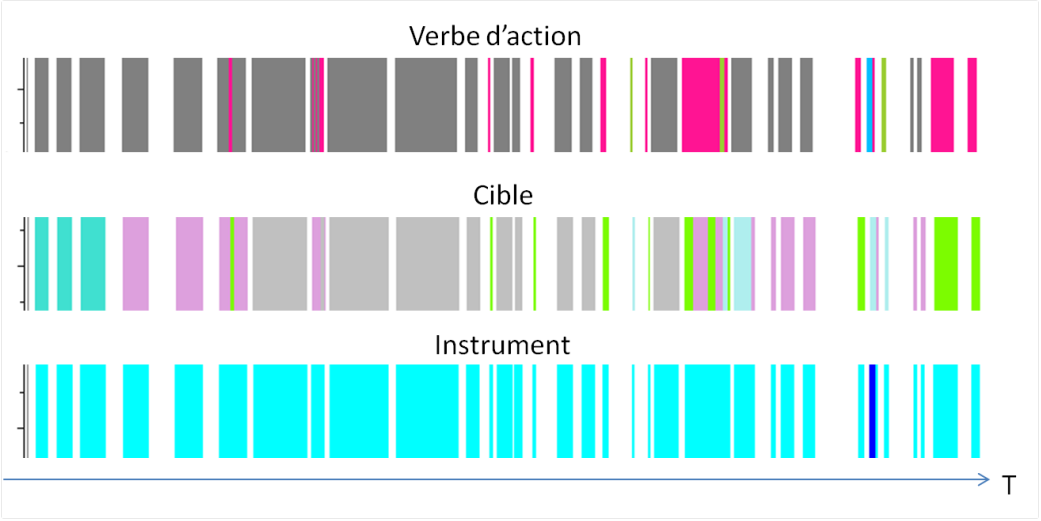
Nous lui avons d'abord montré notre représentation graphique de plusieurs chirurgies afin que le chirurgien s'y familiarise (figure 3.10a). La représentation est composée de 3 séquences : une pour le verbe d'action, une pour la cible de l'activité et la dernière pour l'instrument chirurgical utilisé. Dans une séquence, chaque couleur représente un élément spécifique (légende en figure 3.10c). En associant les 3 composants à l'instant t, on obtient l'activité complète. Ainsi, la première activité de la figure 3.10a est <couper, péritoine, crochet monopolaire>(gris pour l'action, rose pour la cible et turquoise pour l'instrument).

Une fois le chirurgien familiarisé avec la représentation graphique, nous lui avons présenté d'autres chirurgies et le sSPM, sans spécifier quel exemple était le sSPM, et nous lui avons demandé si chaque représentation pouvait correspondre à une chirurgie. Le chirurgien a jugé que toutes les séquences représentaient un déroulement chirurgical cohérent.

Le sSPM, représenté en figure 3.10b, est plus simple que l'iSPM présenté (3.10a). Lorsque nous avons révélé au chirurgien quelle représentation était celle du sSPM, il a considéré celle-ci comme la chirurgie "idéale", car elle suivait parfaitement les gestes qu'il pensait effectuer. De plus, aucune activité de coagulation (verbe en jaune) n'est présente, donc aucun événement vasculaire n'a lieu.



(a) Représentation des trois composants des activités d'un iSPM en fonction du temps



(b) Représentation des trois composants des activités du sSPM

(c) Légende des couleurs utilisées dans a et b

FIGURE 3.10 – Représentation de la séquence d'activités pour un iSPM (a) et pour le sSPM (b).

3.4.2 Validation de la méthode de détection de déviations

3.4.2.1 Méthode de validation

Pour valider notre méthode, nous avons utilisé la méthode leave-one-out : nous avons entraîné un modèle grâce aux données de 10 patients et nous l'avons testé sur le onzième patient, processus répété jusqu'à ce que tous les patients soient testés.

La figure 3.11 illustre cette validation. L'étape d'apprentissage (décrite dans la section précédente, figure 3.1) fournit deux éléments essentiels : le modèle de détection et le sSPM $\overline{S}$. L'iSPM restant est échantillonné à la même fréquence que les données d'apprentissage et est aligné sur $\overline{S}$ afin de pouvoir calculer la distance entre l'iSPM aligné à tester et $\overline{S}$. Comme précédemment, nous créons la séquence d'observations et la séquence des états cachés grâce à la distance et à l'iSPM aligné. La séquence d'états cachés servira de vérité terrain. Nous la comparerons avec la séquence des déviations détectées par la résolution du problème de déduction (problème 2 énoncé en section 3.3.7.1, page 99) à partir du modèle de détection et de la séquence d'observations.

Pour valider notre méthode, nous avons mis en place plusieurs études :

1. influence de l'échantillonnage ;
2. apport du couplage total entre les deux mains du chirurgien ;
3. influence des poids des composants des activités.

Nous présenterons ces études dans la section 3.4.2.2 et les résultats associés dans la section 3.4.3.

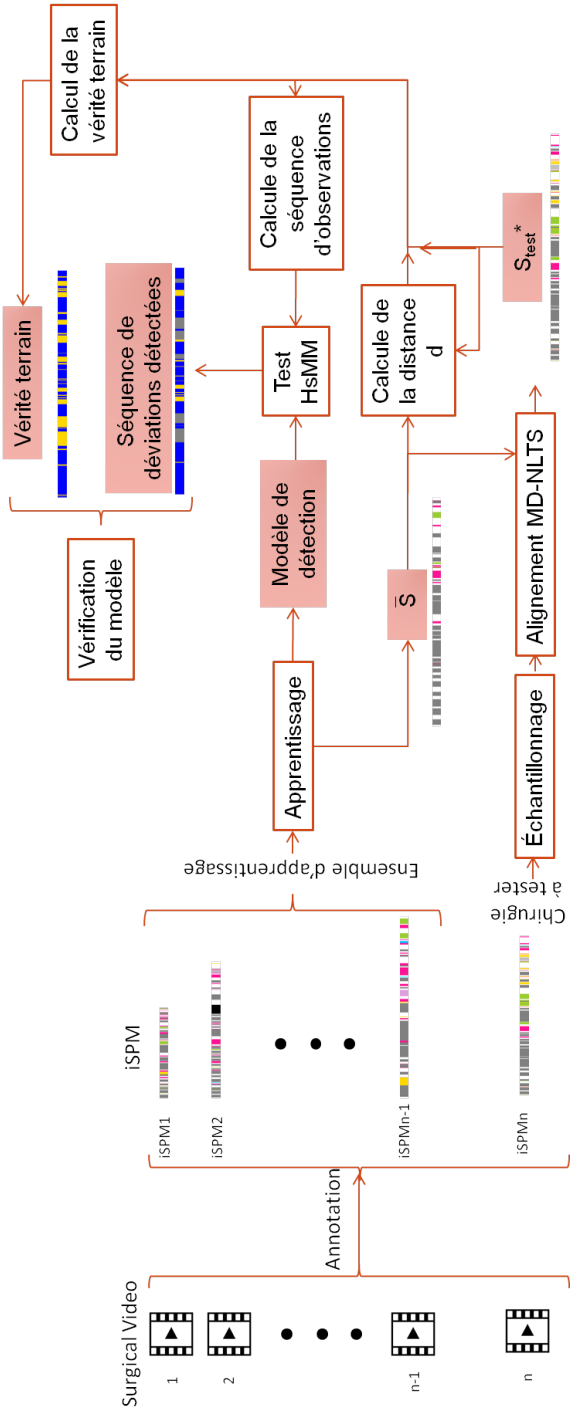


FIGURE 3.11 – Méthode de validation leave-one-out. *La boite intitulée "apprentissagee" fait référence au processus d'apprentissage présenté figure 3.1 (page 87. iSPM : modèle individuel de processus chirurgical. MD-NLTS : alignement temporel non-linéaire multi-dimensionnel.* S^*_{test} *: iSPM à tester aligné.* $\overline{S}$ *: modèle spécifique de processus chirurgicaux. La distance d est calculée entre chaque échantillon de l'iSPM aligné* S^*_{test} *et* $\overline{S}$*. Pour tester le modèle semi-Markovien caché (HsMM), nous créons la séquence d'observation grâce à la distance d et à* S^*_{test}*. Pour vérifier notre modèle, nous comparons la séquence de déviation détecté avec la séquence d'états cachés "vérité terrain" (créé à partir de la distance d et de* S^*_{test}*).*

3.4.2.2 Études réalisées

Étude 1 : Influence de l'échantillonnage

L'objectif de cette étude est de déterminer si le taux d'échantillonnage a une influence sur les résultats, afin de savoir s'il y a un taux d'échantillonnage à privilégier. Les taux d'échantillonnage étudiés vont de 2 échantillons par seconde à 12 échantillons par seconde par pas de 1 échantillon par seconde. Nous avons aussi étudié les résultats pour 12,5 échantillons par seconde, car ceci correspondait à la moitié du nombre d'images par seconde disponible sur les vidéos (25 Hz). Les poids des dimensions (α_m) ont été fixés à $\alpha_m = 1$ (voir section 3.3.4.4 et section 3.3.6) pour cette étude.

Dans cette étude, nous avons aussi utilisé notre méthode de propagation de l'information temporelle afin de voir si celle-ci modifiait nos résultats. Nous avons donc trois sous-études : l'influence de l'échantillonnage sur les échantillons alignés (étude 1.a), l'influence de l'échantillonnage avec un retour dans le domaine temporel (étude 1.b) et l'influence de l'échantillonnage avec un retour dans le domaine temporel avec filtrage (étude 1.c). Les résultats sont présentés en section 3.4.3.1.

Étude 2 : Couplage total entre les deux mains du chirurgien

Dans le cadre d'une opération, le chirurgien utilise ces deux mains. Ainsi, nous avons étudié l'influence de l'ajout de l'information de la seconde main sur les résultats. Pour cela, nous avons mis en place un couplage total (figure 3.12), c'est-à-dire qu'à partir des séquences des deux mains nous créons une nouvelle séquence qui à chaque instant prend les valeurs des activités de chaque main. Comme illustré par la figure 3.12, à partir des deux activités de la main principale (A et E) et des 3 activités de la main secondaire (B, C et D) on arrive à une séquence composée de 4 paires d'activités (A/B, A/C, A/D et E/D).

L'ajout de cette seconde main, par couplage total, n'entraîne pas de modifications majeures de la méthode, nous passons juste de 3 à 6 dimensions (le verbe, la cible et l'instrument pour chaque main), donc le MD-NLTS et le calcule de la distance entre les iSPMs et la référence sont fait sur 6 dimensions au lieu de 3. Les observations ont aussi été modifiées afin de prendre en compte les éléments de la main secondaire et comportent maintenant 7 éléments : la distance, les trois composants de l'activité de la main principale et les trois composants de l'activité de la seconde main.

Nous avons fait cette étude pour des $\alpha_m = 1$ (voir section 3.3.4.4 et section 3.3.6) pour chaque dimension et les taux d'échantillonnages suivants : 2, 4, 8, 10 et 12,5. Les résultats sont présentés en section 3.4.3.2.

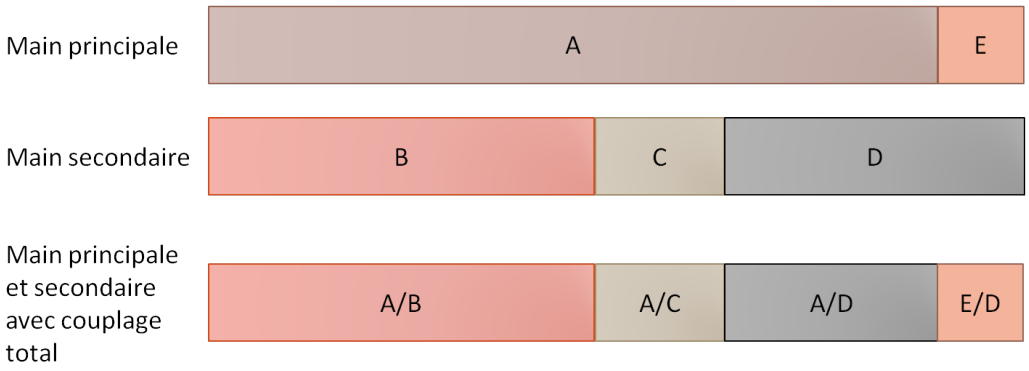


FIGURE 3.12 – Représentation de la séquence obtenue avec un couplage complet entre les deux mains du chirurgien.

Étude 3 : Influence du poids donné aux composants

L'objectif de cette étude est d'étudier l'importance du poids attribué (α_m) aux composants des activités (verbe d'action, cible ou instrument chirurgical) sur la détection des déviations. Pour cela, nous avons uniquement utilisé les informations de la main principale et fixé le taux d'échantillonnage à 12,5. Pour chaque poids, deux dimensions sont fixées à 1, et la troisième dimension varie de 0 à 1 par pas de 0,1. Ainsi, nous avons trois sous-études : l'influence du poids donné au verbe d'action (étude 3.a), l'influence du poids donné à la cible (étude 3.b) et l'influence du poids donné à l'instrument chirurgical (étude 3.c).

Ceci nous a permis d'étudier l'importance de chaque composant des activités afin de savoir si un de ces composants avait peu d'importance dans la détection de déviation. Les résultats sont présentés en section 3.4.3.3.

3.4.2.3 Méthode d'analyse des erreurs de détection

Notre méthode de détection de déviation commet des erreurs, principalement concernant l'état caché "déviation événementielle". Afin de comprendre d'où proviennent ces erreurs, nous avons étudié en détail les observations identifiées comme appartenant à cet état, mais qui appartiennent en réalité à un autre. Il s'avère qu'une très grande majorité (supérieur à 90 %) de ces erreurs proviennent d'observations appartenant à l'état "déviation anatomique", nous nous sommes donc focalisé sur ces observations.

Nous avons identifié 4 catégories d'erreurs pour ces observations :

1. **Rarement mal détectée :** il s'agit d'observations qui sont mal identifiées dans moins de 10 % des cas. Ces erreurs sont dues à un délai pouvant intervenir dans le modèle avant que celui-ci ne change d'état ;

2. **Non entraînée :** il s'agit d'observations qui ne sont présentes que dans la chirurgie à tester. Le modèle n'ayant pas appris à quel état caché elles sont reliées, il décide de manière arbitraire l'état affecté ;
3. **Correctement entraînée :** dans l'ensemble des données d'apprentissage, le modèle a appris à classifier ces observations comme appartenant à la classe "déviation événementielle". Le modèle classe donc correctement ces observations selon ses connaissances ;
4. **Autre :** il s'agit d'observations qui n'ont pas de raison particulière d'être mal classées.

Cette analyse a été réalisée dans le cas où on utilise uniquement les informations de main dominante (étude 1.a) avec celles dans le cas de l'utilisation des deux mains (étude 2).

3.4.2.4 Métriques utilisées

Les métriques utilisées et dont les définitions sont rappelées ci-dessous sont : le taux de reconnaissance, le rappel, la précision.

Le taux de reconnaissance représente le pourcentage d'échantillon correctement identifié (équation 3.11).

$$Taux\ de\ reconnaissance = \frac{\sum_{i=n}^{N} nb\ échantillons\ correctement\ identifiés\ pour\ la\ classe\ n}{nombre\ total\ d'échantillons}, \quad (3.11)$$

avec N le nombre de classes du HsMM (dans notre cas 3, i.e. le nombre d'états cachés).

Cependant, la répartition du nombre d'observations par classe n'est pas homogène. En effet, environ 68 % des observations appartiennent à la classe "pas de déviation", 26 % à la classe "déviation anatomique" et uniquement 6 % à la classe "déviation événementielle". Le taux de reconnaissance ne représente donc pas la capacité à correctement différencier les deux types de déviations, en effet si toutes les observations des classes "pas de déviation" et "déviation anatomique" sont correctement identifiées par le modèle le taux de reconnaissance peut être de 94 % (68 %+24 %), même si aucune "déviation événementielle" n'est correctement détectée, or c'est ce type de déviation qui nous intéresse particulièrement. Pour vérifier si le modèle est capable de correctement identifier les observations de la classe "déviation événementielle" nous avons aussi étudié le rappel et la précision pour chaque état caché.

Le rappel correspond au nombre d'échantillons correctement identifiés comme appartenant à une classe sur le nombre d'échantillons appartenant

réellement à cette classe (équation 3.12). Il représente la capacité du modèle à correctement identifier les échantillons dans leur classe.

$$\textit{rappel classe } n = \frac{\textit{nb échantillons correctement identifiés pour la classe } n}{\textit{nombre d'échantillons } \textbf{\textit{appartenant réellement}} \textit{ à } n} \quad . \tag{3.12}$$

La précision correspond au nombre d'échantillons correctement identifiés comme appartenant à une classe sur le nombre d'échantillons attribués à cette classe (équation 3.13). Elle représente l'absence d'erreur de prédiction.

$$\textit{précision classe } n = \frac{\textit{nb échantillons correctement identifiés pour la classe } n}{\textit{nombre d'échantillons } \textbf{\textit{identifiés comme appartenant}} \textit{ à } n} \quad . \tag{3.13}$$

Nous évaluons donc nos détections grâce à sept résultats exploitant ces métriques :

- 1 résultat pour le taux de reconnaissance ;
- 3 résultats pour le rappel (il y a 3 classes) ;
- 3 résultats pour la précision.

Idéalement, nous désirons avoir des résultats parfaits, c'est-à-dire que pour chaque étude ces 7 résultats soient de 100 %.

3.4.2.5 Validation statistique

Afin de vérifier l'influence des différents paramètres (taux d'échantillonnage et α_m) sur les résultats de détection, nous avons effectué le test non-paramétrique de Kendall. Ce test permet d'identifier s'il existe une corrélation entre le résultat testé et le paramètre étudié. Dans notre étude de l'influence du taux d'échantillonnage, ce test nous permettra de dire si les résultats ont tendance à augmenter ou à diminuer lorsque le taux d'échantillonnage augmente. Pour que cette évolution soit significative, nous considérons que la p-value doit être inférieure à 0,05. Néanmoins, puisque nous avons 7 résultats par type d'étude, ceci entraîne 7 tests par étude, nous rentrons donc dans le cadre de comparaison multiple, le hasard peut donc entraîner un faux test positif. Selon la méthode de correction de Bonferroni [109, 110], pour contrecarrer ce problème de comparaison multiple, le résultat est significatif si la p-value est inférieure à 0,0071 (0,05/7).

3.4.3 Résultats de la méthode de détection de déviations

3.4.3.1 Étude 1 : Influence de l'échantillonnage

Les taux d'échantillonnages que nous avons étudiés sont : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 et 12,5 échantillons par seconde pour des α_m fixés à 1. Notre objectif est de déterminer si le taux d'échantillonnages a de l'influence pour détecter et différencier des déviations.

Étude 1.a : Résultats sur les échantillons alignés

Résultats

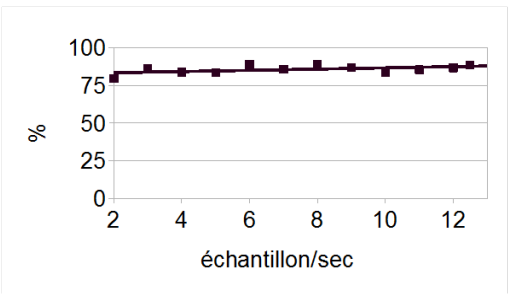
Ces résultats sont ceux à partir des échantillons alignés, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de référence temporelle. Le tableau 3.6, page 120, et la figure 3.13 détaillent les résultats.

Le taux de reconnaissance évolue entre 80 % et 90 % en fonction du taux d'échantillonnage. La figure 3.13a illustre que le taux de reconnaissance à tendance à augmenter avec le nombre d'échantillons par seconde, mais la p-value de 0,1926 (tableau 3.6) montre que cette tendance n'est pas significative.

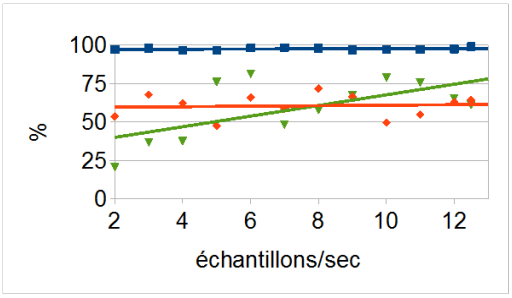
Pour le rappel (capacité du modèle à correctement identifier les échantillons), les résultats sont différents selon les états cachés. Le rappel pour l'état "pas de déviation" est globalement stable entre 97 % et 99 %. Le rappel de l'état "déviation anatomique" oscille entre 50 % et 72 % sans tendance particulière. Pour l'état "déviation événementielle", l'échantillonnage semble avoir de l'influence puisque celui-ci est de 20 % pour 2 échantillons par seconde et plus de 75 % pour 10 échantillons par seconde et que la courbe de tendance augmente avec l'échantillonnage. Cependant, l'influence n'est pas significative (p-value = 0,1148).

La précision (absence d'erreur de prédiction) pour l'état "pas de déviation" augmente de manière significative (p-value <0,001) de 84 % à plus de 99 % en fonction de l'échantillonnage. Pour l'état "déviation anatomique", la précision se situe entre 73 % et 98 %. Pour l'état "déviation événementielle", elle varie entre 29 % et 40 % avec une tendance non-significative à la diminution.

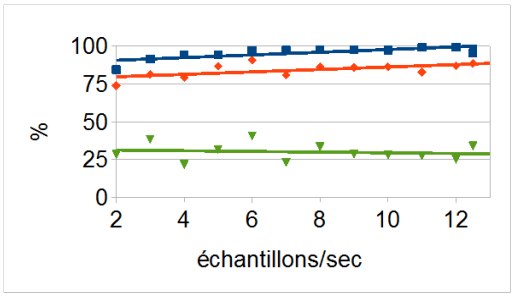
Bien que le taux d'échantillonnage ait uniquement une influence significative sur la précision de l'état "pas de déviation", les courbes de tendance des figures 3.13b et 3.13c semblent indiquer une tendance privilégiant un taux d'échantillonnage élevé.



(a) Taux de reconnaissance.



(b) Rappel.



(c) Précision.

FIGURE 3.13 – Graphes illustrant l'influence de l'échantillonnage. *Pour les figures (b) et (c) la courbe bleue représente les résultats pour l'état "pas de déviation", la rouge pour l'état "déviation anatomique" et la verte pour l'état "déviation événementielle".*

Analyse des erreurs de prédiction

Afin de comprendre pourquoi le taux de précision de l'état "déviation événementielle" est inférieur à 40% , nous avons analysé les erreurs de prédiction (voir section 3.4.2.3). Le tableau 3.5 et la figure 3.14 présentent la répartition des observations au sein de ces différentes catégories en fonction de l'échantillonnage. On remarque que le nombre d'observations appartenant à la catégorie 1 est négligeable (inférieur à 1%). Les observations des catégories 2 et 3 représentent chacune moins de 20% des observations mal identifiées, avec néanmoins une diminution des observations non entraînées (catégorie 2), et une augmentation de celles correctement entraînées (catégorie 3) avec l'échantillonnage. La catégorie 4 représente une majorité des observations mal classifiées.

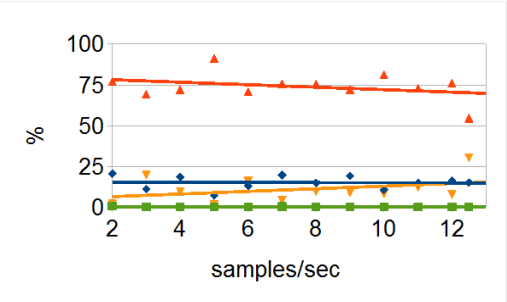


FIGURE 3.14 – Résultats graphiques des observations mal classifiées pour l'étude 1.a : influence de l'échantillonnage sur les échantillons alignés. *La courbe verte représente les observations du type "rarement mal détectées", la bleue celles du type "non entraînées", l'orange celles du type "correctement entraînées" et la rouge celles du type "autres".*

Échantillons par secondes	Nb observations	1. Rarement mal détectée (%)	2. Non entraînée (%)	3. Correctement entraînée (%)	4. Autre (%)
2	1942	0,57	20,49	1,85	77,09
3	3137	0,06	11,06	19,67	69,21
4	8770	0,14	18,43	9,42	72,02
5	13503	0,10	7,03	1,62	91,25
6	12247	0,09	12,97	15,96	70,98
7	18623	0,32	19,73	4,37	75,57
8	13972	0,14	14,78	9,60	75,47
9	21988	0,03	19,03	9,01	71,93
10	34887	0,11	10,61	8,14	81,13
11	35901	0,01	14,87	12,29	72,84
12	34206	0,01	16,34	7,70	75,95
12,5	22106	0,18	14,95	30,29	54,57

TABLE 3.5 – Type d'observations appartenant à l'état déviation anatomique et détectées comme déviations événementielles.

Étude 1.b : Résultats dans le domaine temporel

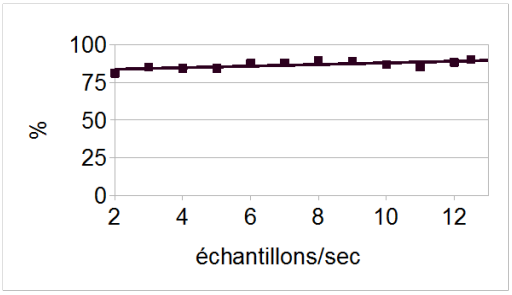
Comme nous l'avons expliqué en section 3.3.8, nous avons propagé l'information temporelle afin de pouvoir faire un retour dans le domaine temporel une fois la détection de déviations effectuées. Les résultats présentés dans le tableau 3.7, page 121 et en figure 3.15 sont ceux après le retour dans le

domaine temporel. Nous comparerons ces résultats à ceux des échantillons alignés (étude 1.a, tableau 3.6).

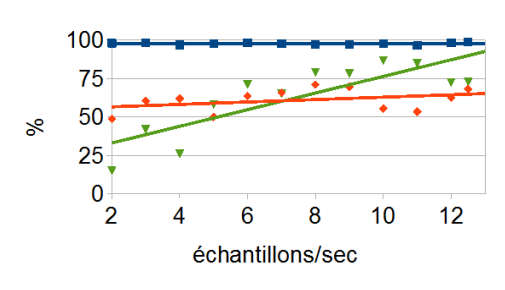
Le taux de reconnaissance est similaire à celui présenté dans l'étude 1.a et oscille entre 82 % est 90 %. Comme précédemment, il y a une tendance non-significative à de meilleurs résultats lorsque le nombre d'échantillons par seconde augmente.

Le rappel est également similaire dans les deux études, pour les états 'pas de déviation" et "déviation anatomique". Pour l'état "déviation événementielle", les résultats sont moins bons que dans l'étude 1.a pour les plus faibles taux d'échantillonnage, mais augmentent de manière significative (p-value=0,0049) lorsque taux d'échantillonnage augmente. Ceci est particulièrement visible sur la figure 3.15b (courbe verte).

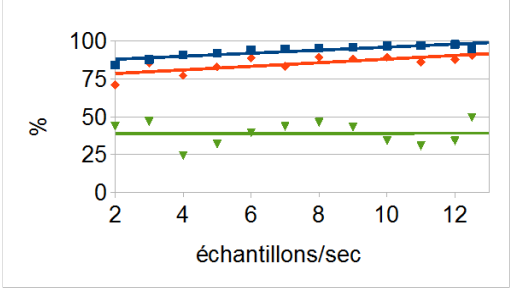
Pour la précision, les résultats sont similaires pour les états 'pas de déviation" (influence significative de l'échantillonnage) et "déviation anatomique". Pour l'état "déviation événementielle", bien qu'il n'y ait pas d'influence significative de l'échantillonnage, on remarque que les résultats oscillent aux alentours de 40 %, soit de 10 % d'augmentation en comparaison des résultats de l'étude 1.a.



(a) Taux de reconnaissance.



(b) Rappel.



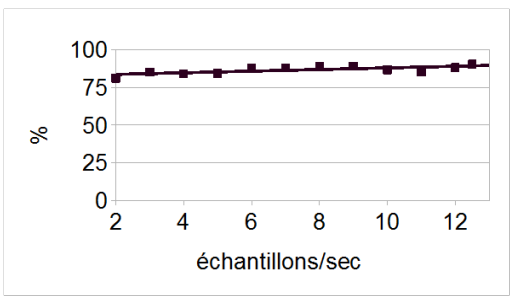
(c) Précision.

FIGURE 3.15 – Graphes illustrant de l'influence de l'échantillonnage dans le domaine temporel. *Pour les figures (b) et (c) la courbe bleue représente les résultats pour l'état "pas de déviation", la rouge pour l'état "déviation anatomique" et la verte pour l'état "déviation événementielle".*

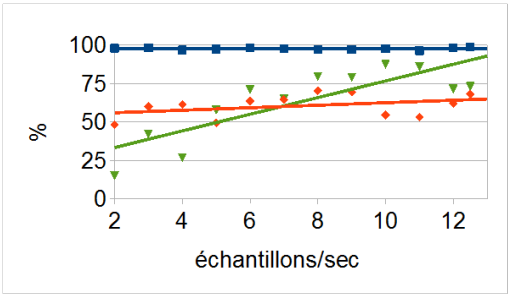
Étude 1.c : Résultats dans le domaine temporel avec filtrage d'une seconde

L'avantage de pouvoir revenir dans le domaine temporel est de pouvoir filtrer les résultats. Selon les chirurgiens avec qui nous avons travaillé, une déviation dont la durée est inférieure à une seconde ne peut pas être considérée comme délétère pour le patient. Même s'il est possible de sectionner un vaisseau pendant ce laps de temps, si le saignement est contrôlé dans la seconde, il est considéré comme sans conséquence par les chirurgiens. Ainsi, nous avons filtré les résultats pour qu'en cas d'états ayant une durée inférieure à une seconde, nous restions dans l'état précédent.

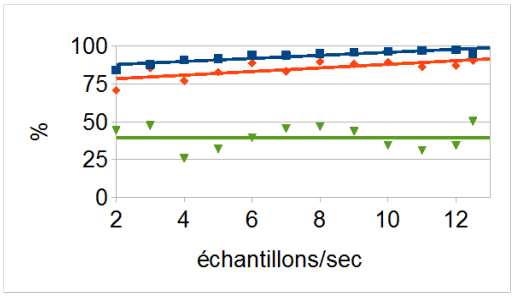
Les résultats après filtrage sont présentés en figure 3.16 et dans le tableau 3.8, page 122. Ces résultats sont très similaires à de l'étude 1.b avec une très légère amélioration de l'ordre de 1 %.



(a) Taux de reconnaissance.



(b) Rappel.



(c) Précision.

FIGURE 3.16 – Graphes illustrant l'influence de l'échantillonnage dans le domaine temporel avec un filtrage d'une seconde. *Pour les figures (b) et (c) la courbe bleue représente les résultats pour l'état "pas de déviation", la rouge pour l'état "déviation anatomique" et la verte pour l'état "déviation événementielle".*

Synthèse de l'étude 1 Bien que les résultats soient globalement meilleurs lorsque le taux d'échantillonnage est élevé, seule la précision de l'état "pas de déviation" augmente de façon significative lorsque l'échantillonnage augmente dans les 3 cas présentés (résultat sur les échantillons alignés, dans le domaine temporel sans et avec filtrage). L'autre influence significative est pour le rappel de l'état "déviation événementielle" après un retour dans la dimension temporelle avec ou sans filtrage (étude 1.b et 1.c).

Échantillons par seconde	Taux de reconnaissance(%)	Rappel$_{ND}$ (%)	Rappel$_{DA}$ (%)	Rappel$_{DEI}$ (%)	Précision$_{ND}$ (%)	Précision$_{DA}$ (%)	Précision$_{DEI}$ (%)
2	79.67 n=59 901	96.98 n=38 872	53.58 n=17 271	20.52 n=3 758	84.42 n=44 659	73.86 n=12 529	28.42 n=2 713
3	85,97 n=91 384	97,88 n=60 752	67,75 n=25 285	36,81 n=5 347	91,29 n=65 139	81,17 n=21 104	38,28 n=5 141
4	83.76 n=124 160	96.69 n=82 655	62.28 n=34 372	37.39 n=7 133	94.18 n=84 860	79.24 n=27 018	21.71 n=12 282
5	83,60 n=152 291	96,71 n=105 996	47,55 n=36 480	76,00 n=9 815	94,29 n=108 718	86,55 n=20 041	31,70 n=23 532
6	88.99 n=182 456	98.04 n=125 725	65.93 n=45 630	81.29 n=11 101	97.03 n=127 038	90.69 n=33 175	40.57 n=22 243
7	85,68 n=211 485	98,35 n=146 724	58,90 n=52 992	48,19 n=11 769	97,30 n=148 312	80,89 n=38 586	23,07 n=24 587
8	89.03 n=249 741	97.87 n=172 679	71.79 n=62 928	57.81 n=14 134	97.69 n=173 000	86.27 n=52 360	33.51 n=24 381
9	87,04 n=279 970	96,93 n=188 771	66,44 n=77 423	67,21 n=13 776	97,61 n=187 470	85,81 n=59 947	28,44 n=32 553
10	83.71 n=308 590	97.24 n=209 410	49.55 n=80 214	78.84 n=18 966	97.25 n=209 376	86.33 n=46 042	28.12 n=53 172
11	85,48 n=341 398	97,02 n=238 666	54,83 n=83 674	75,62 n=19 058	99,09 n=233 678	82,73 n=55 459	27,58 n=52 261
12	86,77 n=370 212	97,44 n=253 875	63,10 n=96 767	65,35 n=19 570	99,24 n=249 271	87,02 n=70 162	25,19 n=50 779
12.5	88.61 n=388 102	98.98 n=273 651	64.36 n=94 629	61.17 n=19 822	95.50 n=283 612	98.40 n=68 893	34.06 n=35 597
p-value	0,1926	0,3037	0.8370	0.1148	<0,0001 *	0,0236	0,7317

TABLE 3.6 – Résultats de l'influence de l'échantillonnage sur les échantillons alignés. *ND : pas de déviation. DA : déviation anatomique. DEI : déviation événementielle. Le nombre n représente la somme du nombre d'observations de toutes les chirurgies (taux de reconnaissance), le nombre d'observations appartenant à chaque état (rappel) et le nombre d'observations détectées dans chaque état (précision). * : Influence significative de l'échantillonnage.*

Échantillons par seconde	Taux de reconnaissance(%)	Rappel$_{ND}$ (%)	Rappel$_{DA}$ (%)	Rappel$_{DEI}$ (%)	Précision$_{ND}$ (%)	Précision$_{DA}$ (%)	Précision$_{DEI}$ (%)
2	81,16 d=7 467	98,01 d=5 229	48,74 d=1 775	15,08 d=463	84,14 d=6 091	71,10 d=1 217	43,91 d=159
3	85,29 d=7 498	98,08 d=5 182	60,44 d=1 881	41,91 d=434	87,81 d=5 767	85,48 d=1 345	46,99 d=387
4	84,29 d=7 524	96,74 d=5 265	62,00 d=1 838	25,96 d=422	90,95 d=5 600	77,18 d=1 476	24,44 d=448
5	84,43 d=7 449	97,54 d=5 325	49,91 d=1 694	58,11 d=430	91,91 d=5 651	82,90 d=1 020	32,11 d=778
6	87,81 d=7 515	98,19 d=5 164	63,53 d=1 942	71,14 d=409	94,17 d=5 382	88,83 d=1 398	39,54 d=735
7	88,17 d=7 439	97,54 d=5 256	65,72 d=1 751	65,16 d=432	94,72 d=5 412	83,34 d=1 381	43,60 d=646
8	89,34 d=7 412	97,02 d=5 094	71,02 d=1 893	79,01 d=425	95,31 d=5 185	89,45 d=1 503	46,37 d=724
9	89,01 d=7 504	97,23 d=5 139	69,63 d=1 954	78,31 d=411	95,78 d=5 217	88,28 d=1 541	43,18 d=746
10	86,82 d=7 469	97,57 d=5 259	55,39 d=1 797	86,61 d=413	96,63 d=5 310	89,38 d=1 113	34,24 d=1 045
11	85,21 d=7 486	96,40 d=5 234	53,40 d=1 838	84,91 d=414	96,93 d=5 205	86,14 d=1 139	30,80 d=1 141
12	88,35 d=7 453	98,22 d=5 275	62,50 d=1 751	72,47 d=428	97,79 d=5 298	87,82 d=1 246	34,08 d=910
12.5	90,32 d=7 485	98,78 d=5 353	68,16 d=1 709	72,80 d=422	94,83 d=5 576	90,47 d=1 288	49,52 d=621
p-value	0,0164	0,6800	0,4507	0,0049 *	0,0002 *	0,0164	0,9453

TABLE 3.7 – Résultats dans le domaine temporel de l'influence de l'échantillonnage. *ND : pas de déviation. DA : déviation anatomique. DEI : déviation événementielle. La durée d, exprimée en seconde, représente la somme des durées de toutes les chirurgies (taux de reconnaissance), la durée de chaque état (rappel) et la durée détectée pour chaque état (précision). * : Influence significative de l'échantillonnage.*

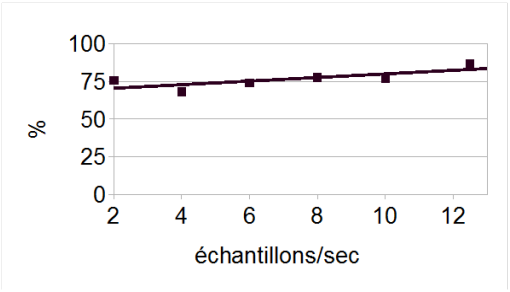
Échantillons par seconde	Taux de reconnaissance(%)	Rappel$_{ND}$ (%)	Rappel$_{DA}$ (%)	Rappel$_{DEI}$ (%)	Précision$_{ND}$ (%)	Précision$_{DA}$ (%)	Précision$_{DEI}$ (%)
2	81.15 d=7 467	97.97 d=5 248	48.25 d=1 755	15.28 d=464	84.16 d=6 109	70.73 d=1 197	44.17 d=160
3	85,29 d=7 498	98,08 d=5 182	59,98 d=1881	42,27 d=434	87,78 d=5 791	85,43 d=1 321	47,49 d=386
4	84.24 d=7 524	96.75 d=5 277	61.39 d=1 823	26.82 d=424	90.71 d=5 628	77.00 d=1 454	25.71 d=442
5	84,37 d=7 449	97,47 d=5 344	49,39 d=1 675	57,78 d=430	91,76 d=5 677	82,75 d=1 000	32,17 d=772
6	87.81 d=7 515	98.19 d=5 175	63.53 d=1 929	71.14 d=411	94.14 d=5 395	88.83 d=1 379	39.54 d=740
7	88,04 d=7 439	97,67 d=5 269	64,59 d=1 737	64,97 d=434	94,00 d=5 475	83,36 d=1 346	45,51 d=619
8	89.28 d=7 412	97.05 d=5 105	70.37 d=1 880	79.64 d=427	95.13 d=5 209	89.55 d=1 477	46.80 d=726
9	89,05 d=7 504	97,16 d=5 159	69,55 d=1 933	78,96 d=412	95,84 d=5 230	88,06 d=1 527	43,52 d=747
10	86.73 d=7 469	97.49 d=5 276	54.60 d=1 778	87.54 d=414	96.53 d=5 329	89.21 d=1 088	34.49 d=1 052
11	85,31 d=7 486	96,35 d=5 256	53,25 d=1 819	86,05 d=410	96,92 d=5 225	86,22 d=1 124	31,06 d=1 137
12	88,22 d=7 453	98,09 d=5 292	62,20 d=1 731	71,56 d=431	97,54 d=5 322	87,09 d=1 236	34,41 d=895
12.5	90.43 d=7 485	98.79 d=5 373	68.14 d=1 688	73.12 d=424	94.83 d=5 598	90.51 d=1 270	50.24 d=617
p-value	0,0236	0,8370	0,1499	0,0049 *	<0,0001 *	0,01639	1

TABLE 3.8 – Résultats dans le domaine temporel avec filtrage d'une seconde de l'influence de l'échantillonnage. *ND : pas de déviation. DA : déviation anatomique. DEI : déviation événementielle. La durée d, exprimée en seconde, représente la somme des durées de toutes les chirurgies (taux de reconnaissance), la durée de chaque état (rappel) et la durée détectée pour chaque état (précision). * : Influence significative de l'échantillonnage.*

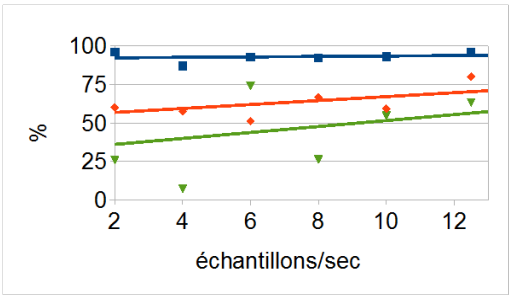
3.4.3.2 Étude 2 : Couplage total entre les deux mains

Les taux d'échantillonnages que nous avons étudiés sont : 2, 4, 6, 8, 10 et 12,5 échantillons par seconde pour des $\alpha_m = 1$, sur chacune des 6 dimensions qu'apportent les deux mains.

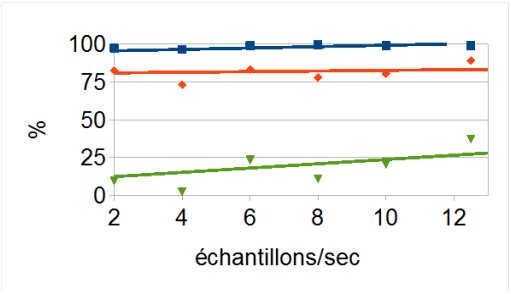
Résultats Les résultats sont présentés dans le tableau 3.9 et en figure 3.17, et nous les comparerons aux résultats obtenus avec l'étude qui ne prenait en compte que la main dominante (étude 1.a, tableau 3.6).



(a) Taux de reconnaissance.



(b) Rappel.



(c) Précision.

FIGURE 3.17 – Graphes illustrant les résultats avec l'ajout des activités de la seconde main. *Pour les figures (b) et (c) la courbe bleue représente les résultats pour l'état "pas de déviation", la rouge pour l'état "déviation anatomique" et la verte pour l'état "déviation événementielle".*

Le taux de reconnaissance augmente de manière non-significative avec l'échantillonnage passant de 75% à plus de 85 %.

L'échantillonnage n'a pas d'influence sur le rappel de l'état "pas de déviation" et les résultats oscillent aux alentours de 93 %. Pour le rappel de l'état "déviation anatomique", les résultats montrent une tendance à l'amélioration avec le taux d'échantillonnage avec des valeurs entre 50 % et 80 %. Pour l'état "déviation événementielle" les résultats ont tendance à s'améliorer

avec l'échantillonnage, mais certaines valeurs semblent aberrantes puisque le rappel passe de 7 % pour 4 échantillons par seconde à 74 % pour 6.

Pour la précision, les états "pas de déviation" et "déviation anatomique" ne dépendent pas de l'échantillonnage. La précision de l'état "pas de déviation" est stable aux alentours de 97 %, soit une amélioration de 2 % par rapport à l'étude 1.a. Pour l'état "déviation anatomique", la précision est autour de 82 %, soit une dégradation de 2% par rapport à l'étude 1.a. Pour l'état "déviation événementielle" on remarque une augmentation non-significative des résultats en fonction de l'échantillonnage avec des valeurs entre 10 % et 37 %. Comparés à l'étude 1.a, où la précision de cet état variait entre 29 % et 40 %, ceux-ci sont moins bons.

Échantillons par seconde	2	4	6	8	10	12,5	p-value
Taux de reconnaissance(%)	75,79	68,25	73,99	77,78	76,72	86,87	0,1329
Rappel_{ND}(%)	96,00	87,14	92,81	92,16	93,04	96,10	0,4524
Rappel_{DA}(%)	60,13	57,54	51,15	66,65	59,32	80,06	0,4524
Rappel_{DEI}(%)	25,80	7,13	74,04	26,22	54,80	63,31	0,2597
Précision_{ND}(%)	97,22	96,59	98,99	99,46	98,88	98,94	0,4524
Précision_{DA}(%)	82,30	73,12	83,24	77,94	80,29	88,97	0,4524
Précision_{DEI}(%)	9,61	2,42	23,47	10,87	20,44	37,27	0,1329

TABLE 3.9 – Résultats en fonction de l'échantillonnage de la détection de déviations avec l'ajout d'information de la seconde main. *ND : pas de déviation. DA : déviation anatomique. DEI : déviation événementielle.*

Analyse des erreurs de détection Nous avons analysé les erreurs de détection (section 3.4.2.3, pour comprendre pourquoi le taux de prédiction de l'état "déviation événementielle" est inférieur à 37%. Ces résultats, que nous comparerons à ceux de l'étude 1.a (section 3.4.3.1, tableau 3.5, page 116) sont présentés en tableau 3.10 et à la figure 3.18.

Ces résultats montrent que beaucoup plus d'observations sont mal détectées que dans l'étude 1.a, par exemple pour 10 échantillons par seconde, on passe d'environ 35 000 observations mal détectées dans l'étude 1.a à plus de 50 000 dans celle-ci. Cependant, on observe que la proportion d'observation de la catégorie 4 (autre) passe d'une moyenne de 74 % dans l'étude 1.a à 53 % dans celle-ci. Pour les catégories 2 (non entraînée) et 3 (correctement entraînée), on observe une augmentation moyenne de 10 % passant de 15 % à 26 % pour la catégorie 2 et de 11 % à 20 % pour la catégorie 3. Les observations de la catégorie 1 restent négligeables (inférieur à 1 %).

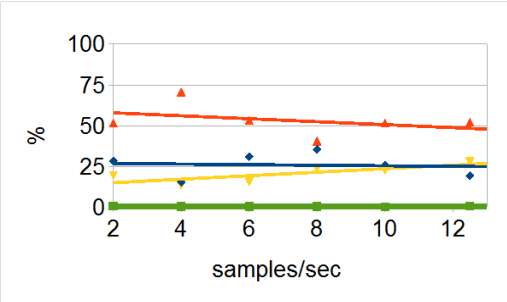


FIGURE 3.18 – Résultats graphiques des observations mal classifiées pour l'étude 2 : couplage total entre les deux mains. *La courbe verte représente les observations du type "rarement mal détectées", la bleue celles du type "non entraînées", l'orange celles du type "correctement entraînées" et la rouge celles du type "autres".*

Échantillons par secondes	Nb observations	1. Rarement mal détectée (%)	2. Non entraînée (%)	3. Correctement entraînée (%)	4. Autre (%)
2	10 159	0,53	28,45	19,48	51,54
4	22 737	0,49	15,42	13,49	70,59
6	39 931	0,39	30,83	15,49	53,29
8	34 202	0,37	35,42	23,69	40,52
10	51 527	0,26	25,74	22,51	51,49
12,5	32 862	0,73	19,32	27,94	52,02

TABLE 3.10 – Type d'observations appartenant à l'état déviation anatomique et détectées comme déviations événementielles dans l'étude avec couplage total entre les deux mains.

Synthèse de l'étude 2 Globalement, les résultats de cette étude sont moins bons que ceux de l'étude 1.a, à l'exception du rappel pour l'état "déviation anatomique" (entre 50 % et 72 % dans l'étude 1.a). Ainsi, bien que les deux mains du chirurgien travaillent ensemble, l'intégration de cette seconde main par un couplage total ne semble pas être une bonne solution, pour permettre une meilleure détection des déviations. Mais cette étude nous permet de mettre en évidence que l'ajout d'information de la seconde main permet de diminuer la proportion d'erreurs de détection appartenant à la catégorie 4 (autre).

3.4.3.3 Étude 3 : Influence des poids des composants des activités

Cette partie présente l'influence des coefficients α_m sur les résultats de détection. Pour rappel, les α_m sont utilisés pour la création de la matrice de distance de la première étape de MD-NLTS (équation 3.5, page 96) et pour le calcul de la distance entre le sSPM et les iSPMs (équation 3.7, page 97).

Pour cette étude, nous avons fixé l'échantillonnage à 12,5 puisque les résultats tendaient à être les meilleurs pour ce taux, bien que non significativement. Dans cette étude, nous n'avons pas fait de retour dans la dimension temporelle ici, l'étude 1.b n'ayant pas montré d'apport significatif de ce retour en termes de résultats de détection.

Nous avons étudié l'influence de chacun des composants d'une activité en le faisant varier de 0 à 1 par pas de 0,1 les autres étant fixé à 1.

Étude 3.a : Influence du poids donné au verbe d'action

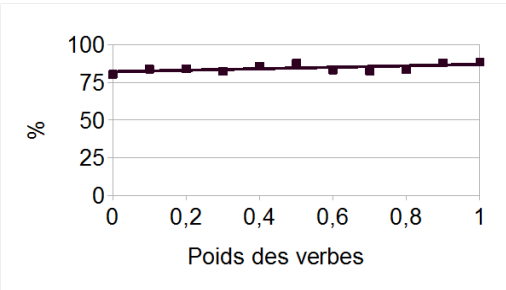
Les résultats de l'influence du poids donné au verbe d'action sont présentés dans le tableau 3.11, page 132, et en figure 3.19.

Lorsque le poids du verbe varie de 0 à 1, on remarque une augmentation non-significative du taux de reconnaissance de 80 % à 89 %, avec le meilleur résultat pour un poids de 1.

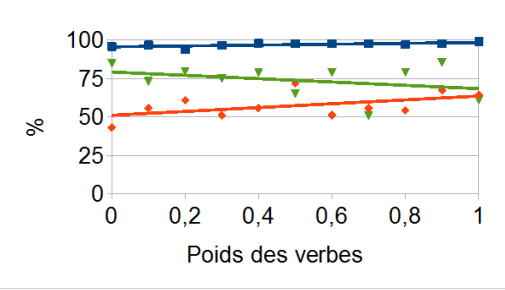
Le rappel est stable aux alentours de 97% pour l'état "pas de déviation". On remarque une augmentation non-significative pour le rappel de "déviation anatomique". Au contraire, le rappel de "déviation événementielle" a tendance à décroître lorsque le poids du verbe augmente. Mais, ceci n'est pas significatif, et la figure 3.19b montre que la valeur la plus faible du rappel est obtenue pour un poids de 0,7 (51 %) et la meilleure pour un poids de 0,9 (85%).

La précision est stable aux alentours de 98 % pour l'état "pas de déviation". Pour les deux autres états, il y a une augmentation non-significative des résultats en fonction du poids. L'état "déviation anatomique" évolue de 80 % à 90 %, et celui de "déviation événementielle" de 25 % à 35 %.

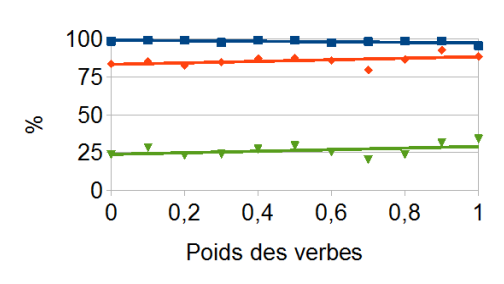
Il n'y a pas d'influence significative du poids du verbe sur les résultats. Néanmoins, un poids de 1 semble donner les meilleurs résultats même si ce n'est pas le cas pour le rappel de l'état "déviation événementielle".



(a) Taux de reconnaissance.



(b) Rappel.



(c) Précision.

FIGURE 3.19 – Graphes illustrant l'influence du poids du verbe. *Pour les figures (b) et (c) la courbe bleue représente les résultats pour l'état "pas de déviation", la rouge pour l'état "déviation anatomique" et la verte pour l'état "déviation événementielle".*

Étude 3.b : Influence du poids donné à la cible

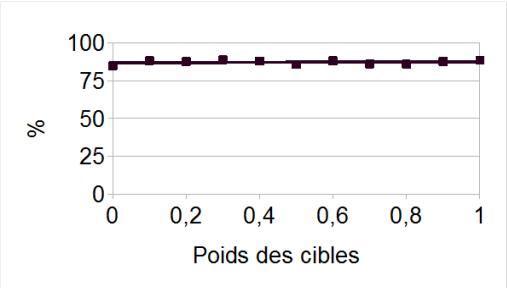
Les résultats de l'influence du poids donné à la cible sont disponibles dans le tableau 3.12, page 133, et en figure 3.20.

Lorsque le poids de la cible varie entre 0 et 1, le taux de reconnaissance reste stable aux alentours de 87 %. Le poids de la cible semble donc n'avoir aucune influence sur les résultats.

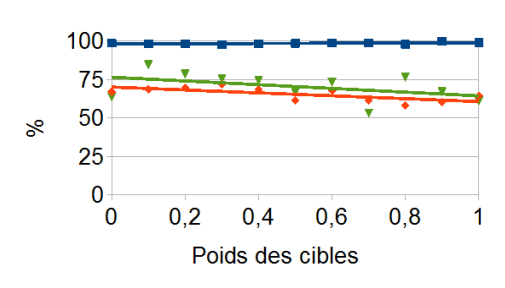
Le rappel de l'état "pas de déviation" semble confirmer cette hypothèse puisque celui-ci est stable aux alentours de 98 %. A contrario, on remarque que les valeurs pour le rappel des deux autres états varient en fonction du poids du verbe. Grâce aux courbes de tendance de la figure 3.20, on remarque même que les résultats se dégradent lorsque le poids augmente passant de 70-80 % à 60 % .

Pour la précision, celle-ci est stable aux alentours de 98 % pour l'état "pas de déviation". Pour l'état "déviation anatomique", il y a une diminution de la précision de 95 % à 88 % en fonction du poids. La précision d'état "déviation événementielle" augmente de 15 % à 35 %.

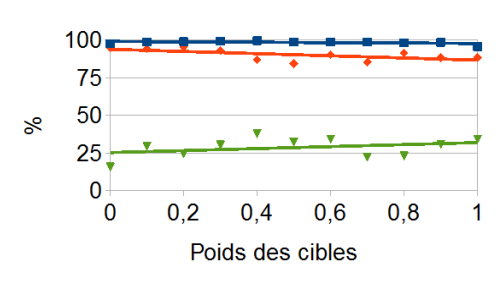
Bien que le poids de la cible n'a pas d'influence significative sur les résultats, il semble que plus le poids est important moins le rappel des états "déviation anatomique" et "déviation événementielle" sont bons. Pour la précision, ceci est différent puisque celle de l'état "déviation anatomique" diminue avec le poids, alors que celle de l'état "déviation événementielle" augmente.



(a) Taux de reconnaissance.



(b) Rappel.



(c) Précision.

FIGURE 3.20 – Graphes illustrant l'influence du poids de la cible. *Pour les figures (b) et (c) la courbe bleue représente les résultats pour l'état "pas de déviation", la rouge pour l'état "déviation anatomique" et la verte pour l'état "déviation événementielle".*

Étude 3.c : Influence du poids donné à l'instrument chirurgical

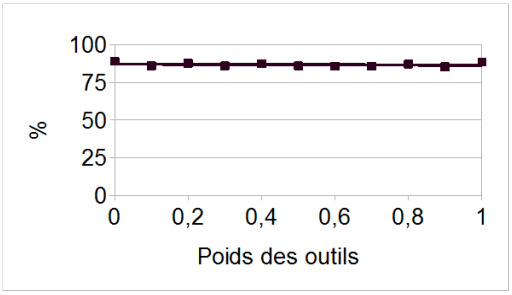
Les résultats de l'influence du poids donné à l'instrument chirurgical sont disponibles dans le tableau 3.13, page 134 et en figure 3.21.

Lorsque le poids de l'instrument chirurgical varie de 0 à 1, le taux de reconnaissance est stable aux alentours de 87%. Le poids de l'instrument chirurgical semble donc n'avoir aucune influence sur les résultats.

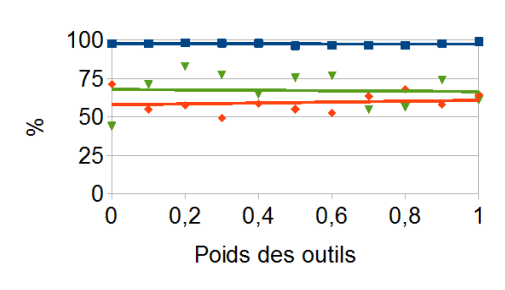
Le rappel de l'état "pas de déviation" semble confirmer cette hypothèse puisque celui-ci est stable aux alentours de 97%. Néanmoins, on remarque que les valeurs pour le rappel des deux autres états semblent beaucoup varier en fonction du poids de l'instrument chirurgical, entre 50% et 70% pour l'état "déviation anatomique" et entre 45% et 83% pour "déviation événementielle". Les courbes de tendance de la figure 3.21 semblent montrer des résultats stables.

La précision est stable aux alentours de 98% pour l'état "pas de déviation". Pour l'état "déviation anatomique", il y a une augmentation de la précision de 80% à 88% en fonction du poids. La précision de l'état "déviation événementielle" est relativement sable autour de 30%, bien que la meilleure valeur soit pour un poids d'instrument de 1 (35%).

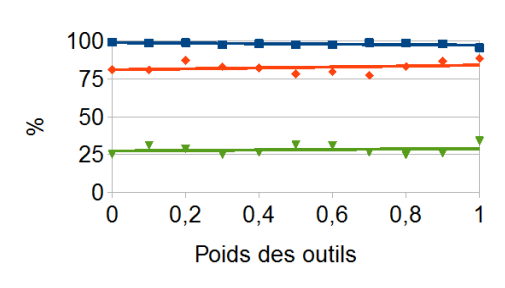
Le poids donné à l'instrument chirurgical semble avoir très peu d'influence sur les résultats. Bien que les rappels des états "déviation anatomique" et "déviation événementielle" ont une courbe de tendance stable, on remarque que les valeurs sont, à l'origine, éloignées de celle-ci pour s'en rapprocher lorsque le poids augmente. Ainsi, le poids donné à l'instrument semble avoir de l'importance dans la stabilité des résultats.



(a) Taux de reconnaissance.



(b) Rappel.



(c) Précision.

FIGURE 3.21 – Graphes illustrant l'influence du poids de l'instrument chirurgical. *Pour les figures (b) et (c) la courbe bleue représente les résultats pour l'état "pas de déviation", la rouge pour l'état "déviation anatomique" et la verte pour l'état "déviation événementielle".*

Synthèse de l'étude 3

Le poids donné aux composants des activités semble n'avoir aucune incidence sur le rappel et la précision de l'état "pas de déviation", mais des influences diverses, mais non significatives sur les autres résultats :

- pour le verbe, un poids élevé semble améliorer le taux de reconnaissance, le rappel et la précision de l'état "déviation anatomique", ainsi que la précision de l'état "déviation événementielle". Cependant, le rappel de l'état "déviation événementielle" est moins bon lorsque le poids augmente ;
- pour la cible, le poids n'a pas d'influence sur le taux de reconnaissance. Mais, lorsque le poids augmente, les rappels des états "déviation anatomique" et "déviation événementielle" ainsi que la précision de l'état "déviation anatomique" diminuent. Au contraire, la précision de l'état "déviation événementielle" augmente ;
- pour l'instrument chirurgical, le poids ne semble avoir aucune influence sur l'ensemble des résultats.

3.4.3.4 Conclusion de la validation

Dans cette section, nous avons présenté les méthodes de validations mises en place ainsi que les résultats de nos différentes études. Ces résultats sont discutés en détail dans la section suivante.

Poids du verbe	Taux de reconnaissance (%)	Rappel$_{ND}$ (%)	Rappel$_{DA}$ (%)	Rappel$_{DEI}$ (%)	Précision$_{ND}$ (%)	Précision$_{DA}$ (%)	Précision$_{DEI}$ (%)
0	80,38	95,83	43,12	84,82	98,50	83,48	23,66
0,1	83,93	96,76	55,68	73,18	99,21	85,20	28,30
0,2	84,16	93,65	60,81	79,61	99,34	82,38	23,10
0,3	82,35	96,60	51,10	75,12	97,72	84,62	23,94
0,4	85,83	97,88	55,72	78,66	99,09	87,13	27,41
0,5	87,80	97,67	71,81	65,12	99,15	87,41	29,59
0,6	83,39	97,54	51,16	78,88	97,67	85,90	25,31
0,7	82,73	97,57	55,58	50,94	98,33	79,59	20,29
0,8	83,71	96,95	54,18	79,05	98,58	86,58	23,74
0,9	88,04	97,68	67,32	85,49	98,57	92,74	31,40
1	88,61	98,98	64,36	61,17	95,50	98,40	34,06
p-value	0.7555	0.1611	0.0617	0.1195	0,3502	0,4363	0.4363

TABLE 3.11 – Influence du poids du verbe d'action dans la détection de déviation pour 12,5 échantillons par seconde. *ND : pas de déviation. DA : déviation anatomique. DEI : déviation événementielle.*

Poids de la cible	Taux de reconnaissance (%)	Rappel$_{ND}$ (%)	Rappel$_{DA}$ (%)	Rappel$_{DEI}$ (%)	Précision$_{ND}$ (%)	Précision$_{DA}$ (%)	Précision$_{DEI}$ (%)
0	84,88	98,58	67,07	63,60	97,52	94,98	15,84
0,1	88,22	98,17	68,72	84,66	98,55	94,01	29,42
0,2	87,71	98,29	69,70	78,59	98,87	95,31	24,45
0,3	88,80	97,73	71,76	75,39	99,09	92,83	30,41
0,4	88,09	98,15	68,60	74,26	99,49	86,81	37,80
0,5	85,77	98,54	61,27	66,62	98,61	84,37	32,34
0,6	88,20	98,85	67,81	73,50	98,59	90,16	34,19
0,7	86,13	98,64	61,46	53,25	98,72	85,32	22,24
0,8	85,97	97,86	58,07	76,55	98,08	91,40	23,08
0,9	87,81	99,82	60,25	67,09	98,40	88,26	30,90
1	88,61	98,98	64,36	61,17	95,50	98,40	34,06
p-value	0,1611	1	0,4363	0,6404	0.1195	0.5334	0.8763

TABLE 3.12 – Influence du poids de la cible dans la détection de déviation pour 12,5 échantillons par seconde. *ND : pas de déviation. DA : déviation anatomique. DEI : déviation événementielle.*

Poids de l'instrument	Taux de reconnaissance (%)	Rappel$_{ND}$ (%)	Rappel$_{DA}$ (%)	Rappel$_{DEI}$ (%)	Précision$_{ND}$ (%)	Précision$_{DA}$ (%)	Précision$_{DEI}$ (%)
0	89,01	97,68	71,24	44,05	99,26	81,08	25,19
0,1	86,10	97,76	54,95	71,13	98,62	80,95	31,15
0,2	87,78	98,17	57,51	82,89	98,94	87,17	28,83
0,3	86,01	97,98	49,32	77,45	97,54	82,96	25,07
0,4	87,55	97,92	58,61	64,84	98,27	82,27	26,41
0,5	86,04	96,30	55,08	75,47	97,48	78,34	31,39
0,6	85,89	96,56	52,73	76,93	97,64	79,64	30,95
0,7	85,70	96,42	63,44	54,90	98,90	77,31	26,55
0,8	87,29	96,61	67,91	56,35	98,80	83,19	24,75
0,9	85,40	97,80	58,17	74,07	98,17	86,70	25,83
1	88,61	98,98	64,36	61,17	95,50	98,40	34,06
p-value	0,1611	1	0,4363	0,6404	0,1195	0,5334	0,8763

TABLE 3.13 – Influence du poids de l'instrument chirurgical dans la détection de déviation pour 12,5 échantillons par seconde. *ND : pas de déviation. DA : déviation anatomique. DEI : déviation événementielle.*

3.5 Discussion

3.5.1 Création du modèle spécifique de processus chirurgicaux et élicitation des connaissances

Le modèle spécifique de processus chirurgicaux (sSPM) a mis en évidence que l'élicitation des connaissances n'était pas parfaite. Selon le processus d'élicitation, la dissection du rectum est censée avoir lieu avant la résection du cul-de-sac de Douglas (figure 2.3). Or sur le sSPM (figure 3.10b), la succession des cibles est la suivante : promontoire (turquoise), péritoine (rose), cul-de-sac de Douglas (gris) et enfin rectum (bleu clair). Cette succession est entrecoupée d'activités sur l'utérus (vert) qui correspondent au moment où l'utérus est exposé par la main dominante. Puisque le sSPM représente les activités les plus fréquentes au sein des chirurgies alignées, on peut donc considérer que les deux phases sont bien entrelacées.

De plus, à la fin du sSPM, on observe un retour sur le péritoine (cible) en association avec le verbe "couper". Sur la majorité des iSPMs, on remarque qu'il y a un retour sur le promontoire, le péritoine ou le cul-de-sac de Douglas. Étant donné que la phase suivante est la fixation du rectum grâce aux bandelettes, nous interprétons ces retours comme des étapes de vérification que la dissection et la résection sont correctement faites. Ceci n'avait jamais été abordé lors du processus d'élicitation.

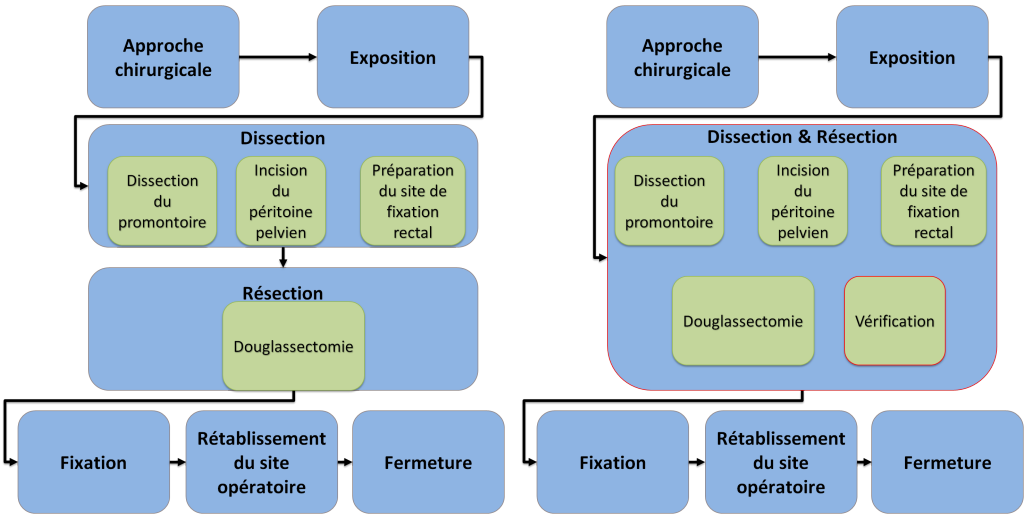
La figure 3.22 met en évidence ces différences entre le modèle hiérarchique de la rectopexie obtenu à l'étape de modélisation des connaissances (figure 3.22a) et celui obtenu après la mise à jour suite à la création du modèle spécifique de processus chirurgicaux (figure 3.22b).

Ces différences peuvent s'expliquer par trois raisons, indépendantes de notre méthode de création du sSPM :

1. Le chirurgien effectuant les opérations n'est pas un des deux chirurgiens ayant contribué à la mise en place du modèle ;
2. La séparation des phases de dissection et de résection provient des connaissances théoriques sur l'opération, alors que leur entrelacement provient de la réalité clinique, c'est-à-dire des connaissances procédurales ;
3. L'étape de vérification est due à l'expertise et non aux connaissances théoriques, le chirurgien l'effectue afin de limiter les complications ultérieures.

La première explication est la moins probable de toutes. En effet bien que le chirurgien n'ait pas été impliqué dans la création du modèle, c'est lui qui a validé le modèle final. Les deux autres explications sont les plus plausibles et

pourraient mettre en évidence que les connaissances théoriques ne sont que les bases des connaissances procédurales.



(a) Modèle hiérarchique suite à la modélisation des connaissances.

(b) Modèle hiérarchique suite à la mise à jour apportée par la création du sSPM.

FIGURE 3.22 – Représentation des différences entre le modèle hiérarchique de la rectopexie obtenu à l'étape de modélisation des connaissances (a) celui obtenu après la mise à jour suite à la création du modèle spécifique de processus chirurgicaux (b). *Les phases sont représentées en bleu et les étapes en vert. Seules les étapes des phases de dissection et de résection ont été représentées afin de mettre en avant les différences relevées.*

Ces différences peuvent aussi provenir de la méthode de création de ce sSPM, qui comporte une limite importante. En effet, au cours de sa création, nous ne vérifions pas que l'activité choisie est majoritairement présente dans l'ensemble d'apprentissage. Ainsi, il est possible que celle-ci ne soit présente que dans une petite proportion (par exemple 25%) des chirurgies, et on peut se demander si une activité si peu fréquente doit appartenir au sSPM. Bien que les sSPMs créés aient été validés par un chirurgien, il semble nécessaire de s'assurer que toutes les activités des sSPMs soient majoritaires dans l'ensemble d'apprentissage, ou alors proposer des chemins alternatifs en créant différentes branches possibles.

3.5.2 Étude 1 : Influence de l'échantillonnage

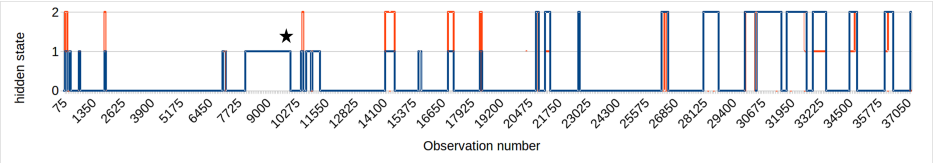
Le taux d'échantillonnage étant l'un des paramètres de notre méthode, il nous a semblé important d'étudier son influence sur les résultats. Bien

qu'il existe une tendance à de meilleurs résultats lorsque l'échantillonnage est élevé, son influence n'est pas significative, sauf pour la précision de l'état "pas de déviation" et pour le rappel de l'état "déviation événementielle" dans le cas d'un retour dans le domaine temporel (étude 1.b).

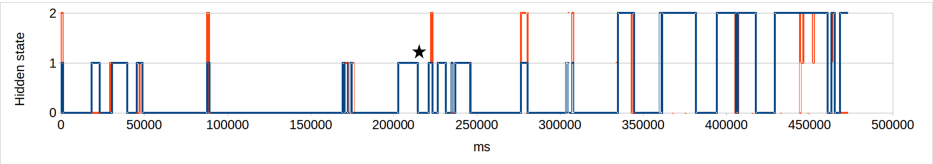
Dans cette étude, nous avons aussi étudié l'intérêt d'un retour dans le domaine temporel (étude 1.b) sur la performance de la détection. L'intérêt est démontré puisqu'il permet d'améliorer de 10% la précision pour l'état "déviation événementielle". Ce retour au domaine temporel nous a aussi permis de filtrer les résultats (étude 1.c), mais ils sont similaires avec ou sans filtrage. L'intérêt de ce retour dans le domaine temporel et le filtrage ne réside pas uniquement dans l'amélioration des résultats, mais également dans le fait qu'il permet de revenir à la vidéo et d'analyser les séquences de façon plus lisible pour les chirurgiens.

La figure 3.23 met en avant les différences qui peuvent apparaître entre les résultats provenant directement des échantillons alignés et ceux provenant du retour au domaine temporel. Chaque séquence est issue du même iSPM. Dans cette figure, chaque état est représenté par un nombre : 0 pour "pas de déviation", 1 pour "déviation anatomique" et 2 pour "déviation événementielle". La ligne bleue représente la séquence d'états cachés qui nous sert de référence et la courbe rouge est la séquence d'états cachés détectés par le modèle (uniquement visible en cas de résultat différent). Du premier coup d'œil, on voit que la figure 3.23a, représentant les résultats à partir des échantillons alignés, est très différente des deux autres figures. L'étoile représente le même instant dans chaque séquence. On voit clairement que les échantillons alignés n'ont pas la même durée. En effet, la partie se trouvant à gauche de l'étoile ne représente qu'un tiers du nombre total d'échantillons (figure 3.23a), alors que dans le domaine temporel cette partie représente environ la moitié de la durée de la séquence (figure 3.23b).

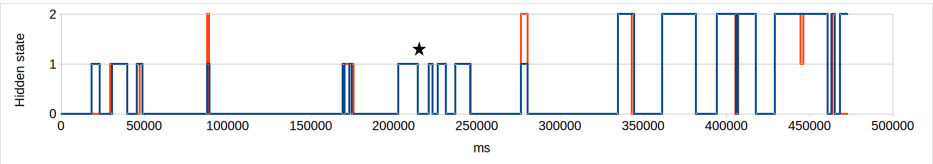
Le filtrage permet quant à lui de supprimer les changements brefs d'état comme nous pouvons le voir à la droite de l'étoile. Sans filtrage, le modèle détecte une "déviation événementielle" (figure 3.23b), après le filtrage le modèle trouve une "déviation anatomique"(figure 3.23c) conformément à la vérité terrain. Ceci permettrait de limiter le bruit pour une application clinique.



(a) Représentation séquentielle à partir des échantillons alignés



(b) Représentation séquentielle dans le domaine temporel



(c) Représentation séquentielle dans le domaine temporel avec filtrage

FIGURE 3.23 – Représentations séquentielles des états cachés réels (bleu) et détectés par le modèle (rouge) à partir des échantillons alignés et après le retour temporel avec et sans filtrage. *L'étoile représente le même instant dans les différentes représentations.*

Nous avons aussi analysé en détail les observations détectées comme appartenant à l'état "déviation événementielle" alors qu'il s'agit de "déviations anatomiques". Ceci nous a permis d'identifier 4 catégories d'observations mal détectées : 1) les observations qui sont rarement mal identifiées, 2) celles qui ne sont pas entraînées, 3) celles qui sont correctement entraînées et 4) celles où il n'existe pas de raisons particulières expliquant ces erreurs.

Pour les erreurs de la catégorie 1, il est difficile de pouvoir trouver des solutions puisqu'il s'agit de délais du modèle. De plus, puisque cette catégorie représente moins de 1 % des observations mal détectées, il ne semble pas prioritaire de se concentrer sur ce type d'erreur.

La catégorie 2 (observations non-entraînées), représentant en moyenne 15 % des observations mal détectées, est principalement due à un manque de données. En effet, il s'agit d'observations n'apparaissant pas dans les données utilisées dans l'ensemble d'apprentissage ; or le nôtre est uniquement composé de 10 chirurgies. Ainsi avec plus de données, le nombre d'observations mal détectées appartenant à cette catégorie pourrait être réduit.

Les erreurs de la catégorie 3 (observations correctement entraînées), représentant en moyenne 11 % des observations mal détectées, peuvent être

expliquées par deux raisons. La première est que les activités reliées à ces observations auraient pu conduire à l'apparition d'un événement indésirable, mais le chirurgien a mis en place un processus de récupération avant son apparition. La seconde explication peut être un manque de données. Car il est possible que ce soit l'inverse, c'est-à-dire qu'en général cette déviation anatomique n'entraîne pas l'apparition d'un EI, mais que dans notre ensemble d'apprentissage cette déviation est toujours liée à un EI.

La majorité, en moyenne 74 %, des observations mal classifiées appartiennent à la catégorie 4. Ceci peut être dû à un problème de définition dans les observations qui ne prend pas en compte l'ensemble des gestes du chirurgien. En effet, nous avons uniquement utilisé les informations de la main dominante, or la main secondaire n'est pas passive et peut elle aussi entraîner des déviations et des EIs. C'est pour tester cette hypothèse que nous avons étudié l'influence de la seconde main, afin d'ajouter cette information dans la définition des observations.

3.5.3 Étude 2 : Couplage total entre les deux mains

Les résultats de couplage entre les deux mains ne sont pas significatifs, seul le rappel de l'état "déviation anatomique" est amélioré d'environ 8% pour le meilleur résultat. L'analyse des erreurs de détection a mis en évidence que bien que la majorité des observations appartienne toujours à la catégorie 4, celle-ci a diminuée de 21% par rapport à l'étude 1.a (74% contre 53%). Ainsi, l'ajout de l'information de la seconde main permet bien de diminuer l'importance de cette catégorie.

Cette diminution a entraîné une plus grande part des observations appartenant aux catégories 2 (observations non-entraînées) et 3 (observations correctement entraînées), respectivement 26% et 20%. Ceci peut s'expliquer par le fait que nous avons considéré que les activités des deux mains étaient entièrement couplées. Les deux mains travaillent en effet de concert, mais ceci ne signifie pas que les activités sont toujours associées de la même manière. Ainsi, dans la figure 3.12 alors que la main dominante fait une activité A, la seconde main fait 3 activités différentes (B, C et D). Ainsi avec un couplage complet, on considère qu'il y a 3 types d'associations différentes A/B, A/C et A/D. Or si dans le cadre de l'apprentissage une des associations n'existe pas, les observations issues de cette association viendront gonfler le nombre d'observation de la catégorie 2.

Pour la catégorie 3, c'est un problème similaire. Une des associations, par exemple A/C, peut être, dans l'ensemble d'apprentissage, associée à un EI. Ainsi le modèle apprend à reconnaître les observations issues de cette association comme appartenant à l'état "déviation événementielle". Mais rien

n'indique que l'EI est davantage lié à l'association des activités des deux mains que de l'activité de la main principale.

Ainsi, bien que le couplage total que nous avons utilisé semble permettre une diminution de la répartition des observations mal détectées appartenant à la catégorie 4. Les résultats et la réparation des observations dans les catégories 2 et 3 montrent que ce type de couplage n'est pas une solution viable.

3.5.4 Étude 3 : Influence des poids des composants des activités

Aucun des poids des composants des activités n'a d'influence significative sur les résultats. Néanmoins, dans le cadre d'une détection automatique des composants d'activité, cette étude nous permet de déterminer s'il est possible de se passer d'un des trois composants.

L'outil semble être le composant qui pourrait être ignoré. En effet, celui-ci n'influence aucun des résultats. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'un outil possède un certain nombre de fonctions, et que chaque fonction est fortement corrélée à un verbe d'action. Ainsi en connaissant le verbe d'action, on connaît la fonction de l'outil qui est utilisé. Une autre explication possible est que la main dominante, sur les deux phases que nous avons étudiées, utilise presque exclusivement le crochet monopolaire (figure 3.10). Donc l'information n'est pas discriminante pour la détection.

Il s'avère que l'outil chirurgical est actuellement le composant le plus simple à identifier de manière automatique [29]. Il est aussi envisageable de savoir quel instrument est utilisé grâce à des capteurs. Ainsi avoir les informations sur les outils est relativement simple, il n'existe donc pas de raison objective de se passer de cette information, et se passer d'un des autres composants semble donc plus pertinent à l'heure actuelle.

À partir des informations fournies par la vidéo, la reconnaissance d'une cible correspond à la reconnaissance d'une forme pouvant varier et se déplacer dans le temps. Par exemple, Lalys [29] détecte facilement les cibles (structures anatomiques de l'œil), mais l'environnement d'une chirurgie de la cataracte est relativement simple en comparaison de celui d'une chirurgie laparoscopique. La détection de cible en chirurgie laparoscopique est possible, mais les méthodes actuelles nécessitent l'ajout de d'autres modalités d'imagerie, par exemple les ultrasons, et sont spécifiques à une structure particulière (projet DEPORRA [111]).

La reconnaissance du verbe est envisageable grâce à la détermination de la trajectoire tridimensionnelle de l'outil. Une telle trajectoire est facilement disponible dans le cas d'une application robotisée grâce aux capteurs de po-

sition, mais nécessite des méthodes de tracking dans le cas d'une application basée vidéo [112]. Connaître la trajectoire ne fait pas tout, il est encore nécessaire de déterminer la relation entre les trajectoires et les verbes d'action. L'utilisation des surgemes peut être une première étape pour déterminer cette relation. Despinoy *et al.* [48] proposent une méthode pour reconnaître les surgemes (voir tableau 1.10, page 22, pour la définition) dans le cadre d'un exercice constituant à déplacer des plots d'un point A à un point B grâce à l'utilisation d'un robot. Parmi les surgemes reconnus, certains sont définis par des concepts très proche de celui du verbe d'action : "se déplacer vers la cible" ou "attraper la cible". Les verbes d'action pourraient être identifiés en mettant en évidence des successions de surgemes spécifiques.

D'un point de vue clinique, il est préférable de détecter toutes les déviations dues à un événement indésirable, même s'il existe quelques fausses alarmes. Autrement dit, il est préférable d'avoir un rappel élevé pour l'état "déviation événementielle", même si la précision est plus mauvaise. Lorsque le poids du verbe ou de la cible est à 0, nous avons respectivement un rappel pour cet état de 85 % et de 63 % comparé à un rappel de 61 % lorsque tous les poids sont à 1. Mais, lorsque le poids du verbe ou de la cible est à 0, la précision est respectivement de 24 % et de 16 %. Alors qu'elle est de 34 % lorsque tous les poids sont à 1. Le gain de rappel est-il suffisant pour justifier d'augmenter encore le nombre de fausses alertes ? C'est une question qui dépend vraiment de l'application finale [49]. Si l'objectif d'une telle l'application est d'analyser a posteriori une opération d'apprentissage sur simulateur, le fait de retourner de fausses alertes n'est pas forcément problématique surtout lorsque l'on prend en compte qu'environ 90 % des fausses alertes représentent des déviations anatomiques. En revanche, dans le cadre de l'aide à la chirurgie au bloc opératoire, augmenter le nombre de fausses alertes aura comme conséquence d'exaspérer le chirurgien qui désactivera le système.

3.5.5 Méthode

En plus de la limite sur la création du sSPM, l'analyse des erreurs de détection dans les études 1.a et 2, nous a permis de mettre d'autres limites en évidence, ce qui nous a donné des pistes d'amélioration. Avoir un plus large ensemble d'apprentissage permettrait de diminuer le nombre d'observations qui ne sont présentes que dans la chirurgie testée (catégorie 2), mais aussi de s'assurer que les observations de la catégorie 3 (correctement entraînées) sont dues à un processus de récupération du chirurgien.

Même avec davantage de données, il est toujours possible de rencontrer des observations qui ne sont jamais apparues dans l'ensemble d'apprentissage.

Dans ce cas, une solution envisageable consiste à modifier le HsMM afin que ces observations ne se voient pas attribuer un état caché de manière arbitraire. Meier *et al.* [113] proposent une méthode pour détecter l'observation la plus proche de celle qui est non présente dans l'ensemble d'apprentissage. Dans notre cas, les observations sont constituées des composants des activités et de la distance entre ces composants et ceux du sSPM (section 3.3.6). Les observations les plus proches pourraient être définies comme celles ayant une distance proche ou avec des composants d'activité similaire à l'observation, par exemple deux outils avec des fonctions identiques.

Pour diminuer le nombre d'observations appartenant à la catégorie 4, nous avons émis l'hypothèse que la main secondaire pouvait aussi fournir de l'information utile pour détecter et différencier des activités. Les résultats de l'étude avec un couplage total entre les deux mains nous ont montré que c'était bien le cas. Cependant, le nombre d'observations des catégories 2 et 3 était beaucoup plus important, ce qui avait un impact direct sur les résultats, un couplage total n'est donc pas la solution. Afin d'améliorer les résultats, une des solutions serait de modifier notre méthodologie afin d'avoir un alignement multi-dimensionnel où chaque main est traitée indépendamment. C'est-à-dire que pour chaque main la distance serait calculée comme nous le faisons actuellement(DTW dépendant) et qu'ensuite, les deux mains seraient alignées par un DTW indépendant. Pour différencier les déviations, le HsMM serait modifié pour être un modèle markovien couplé : dans un tel modèle, il n'existe qu'une seule séquence d'états cachés, mais deux séquences d'observations (ces deux séquences seraient dans notre cas les séquences de chaque main).

Une autre limite de notre méthode est qu'il est actuellement nécessaire d'annoter manuellement les activités. Avec l'étude de l'influence des poids de chaque composant des activités, nous avons essayé de voir s'il était possible de se passer de l'un d'eux. Il s'avère que le composant qui a le moins d'influence sur les résultats est aussi celui qui est le plus facilement identifiable automatiquement. Concernant l'identification automatique des verbes, il serait intéressant d'étudier si la méthode de détection des surgemes mise en place par Despinoy *et al.* [48] peut être appliquée pour déterminer les verbes d'action dans des cas plus compliqués et sur des trajectoires acquises à partir de vidéo. Des travaux sont aussi en cours sur la détection des cibles (projet DEPORRA [111]). La détection automatique de l'ensemble des composants des activités nous permettrait de vérifier la robustesse de notre méthode lorsque les données acquises sont bruitées.

3.6 Conclusion

La détection de déviations dans des chirurgies, et notamment les déviations dues à un événement indésirable, est un défi important à relever en vue de comprendre leurs origines. Nous avons proposé dans ce chapitre une méthode off-line pour détecter et différencier automatiquement ces déviations. Cette méthode, composée d'un alignement temporel non-linéaire multidimensionnel suivi d'un modèle semi-Markovien caché, donne des résultats encourageants. Toutefois, avant d'avoir une application utilisable dans un cadre clinique, il est nécessaire d'améliorer les résultats, principalement sur les fausses détections de déviations dues à des événements indésirables.

La capacité à annoter automatiquement des activités est le premier pas vers une application utilisable en routine clinique. Le second est d'avoir une méthodologie compatible avec le peropératoire, c'est-à-dire temps réel. Dans la méthodologie proposée, l'alignement de la séquence à tester sur le sSPM nécessite de posséder l'ensemble de la séquence, ce qui nous limite à une méthodologie off-line. Pour répondre à cette limite, Forestier *et al.* [62] ont proposé une amélioration de leur méthode NLTS pour permettre un alignement en temps réel sans avoir besoin de l'ensemble de la séquence. Ainsi en modifiant notre méthode MD-NLTS, nous pourrions déterminer en temps réel l'activité correspondant sur le sSPM et ainsi détecter s'il y a une déviation et de quel type elle est.

Enfin, toutes nos chirurgies ont été réalisées par le même chirurgien. Ceci nous a permis de nous affranchir des différences liées à l'habitude et à l'expertise des chirurgiens, éliminant ainsi un niveau de complexité. Il serait intéressant d'obtenir des chirurgies réalisées par d'autres chirurgiens afin de nous assurer de la robustesse de la méthode.

Ce chapitre a montré qu'il était possible de détecter automatiquement les déviations dues à l'apparition d'événements indésirables. Cependant, cette détection n'est pas encore suffisamment précise pour mettre en place un système capable de lutter contre les événements indésirables. Pour arriver à un tel système, il est nécessaire de comprendre les causes des événements indésirables. L'une de ces causes peut être un comportement chirurgical inadapté. Dans le prochain chapitre, nous présenterons une méthode de découverte de patterns pour identifier de tels comportements.

Chapitre 4

Identification de comportements chirurgicaux spécifiques à l'aide de la découverte de patterns

Les particularités anatomiques des patients et les habitudes de l'équipe chirurgicale font que chaque chirurgie est unique. Cependant, il peut exister des points communs entre deux chirurgies. Ces points communs peuvent venir de l'indication chirurgicale, de particularités communes entre les patients, par exemple la pathologie, sa localisation, le sexe ou la tranche d'âge. Un autre point commun qui peut rapprocher deux chirurgies est l'équipe chirurgicale l'effectuant, et principalement le chirurgien. Un chirurgien acquiert au cours de sa pratique des connaissances procédurales qui deviennent des automatismes. Ainsi deux chirurgies effectuées par le même chirurgien possèdent sa signature. Cette signature reflète le comportement chirurgical du chirurgien.

Cependant, ces comportements sont-ils uniquement spécifiques aux chirurgiens ? Deux chirurgiens travaillant dans le même hôpital ont-ils des comportements similaires ? Un jeune chirurgien acquiert-il un comportement similaire à celui de son mentor ? Pour un chirurgien donné, son comportement chirurgical change-t-il en fonction des spécificités anatomiques des patients ? L'ensemble de ces questions concerne directement les chirurgiens, mais n'existe-t-il pas aussi au sein d'un même type de chirurgie des comportements spécifiques selon qu'il s'agit d'une procédure ambulatoire ou d'une procédure avec hospitalisation ?

La littérature apporte des réponses à certaines de ces questions. Ainsi, on sait que la pratique d'un chirurgien expert est différente de celle d'un chirurgien intermédiaire ou junior [47, 50], que la pratique chirurgicale n'est pas identique dans l'ensemble des hôpitaux [114], ou encore que les chirurgies

ambulatoires n'ont pas les mêmes caractéristiques que celles avec hospitalisation [115]. Cependant, ces études n'examinent pas vraiment les comportements chirurgicaux dans le détail et se contentent généralement de comparer les temps pour effectuer une tâche ou utilisent des méthodes d'alignement de séquences sans mettre en évidence des successions d'activités spécifiques à ces comportements chirurgicaux.

Dans ce chapitre, nous essayerons d'aller plus loin en utilisant une méthode de découverte de patterns pour déterminer si la succession d'activités peut permettre d'identifier des comportements chirurgicaux spécifiques. Nous essayerons également de voir s'il est possible d'identifier des comportements chirurgicaux spécifiques à l'apparition d'événements indésirables.

4.1 Découverte de patterns

4.1.1 Découverte de patterns dans la littérature

Un pattern est une succession d'éléments représentant la structure d'un comportement individuel ou collectif. Dans de la littérature, la découverte de patterns est utilisée dans de nombreux domaines : la biologie [116, 117], les télécommunications [118] ou le web [119], etc.

Ces méthodes de découverte de patterns possèdent toutes leurs spécificités, mais elles ont toutes le même objectif : découvrir une succession d'éléments qui sont présents dans plusieurs séquences afin d'expliquer ou de comprendre l'apparition d'un phénomène. Par exemple dans la biologie, cela peut être de trouver des mutations ou des promoteurs (site spécifique d'ADN permettant la transcription d'un gène en ANR), ou de trouver des signaux d'alerte dans les télécommunications.

4.1.2 Découverte de patterns dans le milieu médical

La découverte de patterns est aussi utilisée dans le milieu médical. Par exemple, Huang *et al.* [120, 121] identifient le chemin clinique des patients depuis leur admission jusqu'à leur départ de l'hôpital grâce à ce type de techniques. Ces deux études montrent qu'il est possible d'utiliser ce type de méthode pour mettre en place des gSPMs. En effet, le chemin clinique des patients subissant une opération est un gSPM à un niveau de granularité plus large que ceux que nous avons étudiés.

Mullins *et al.* [122] utilisent la découverte de patterns pour identifier des relations entre des données de santé. Les auteurs ont mis en évidence des relations qui étaient déjà connues au sein de la littérature, par exemple que

le tabac augmentait les risques de crises cardiaques, mais l'aspect le plus intéressant de cette étude est la découverte de relations qui n'étaient pas décrites dans la littérature (tout du moins en 2006 lors de sa publication), par exemple qu'un diabète simple associé à des manipulations physiques et à des examens de tomodensitométrie (CT-scan) de la tête implique des troubles hydro-électrolytiques.

4.1.3 Les différentes méthodes de découverte de patterns

Compte tenu de la grande variété d'applications, il existe de très nombreuses méthodes au sein de la littérature. Brejová *et al.* [123] proposent une review des différentes méthodes existantes. Ces méthodes peuvent être classées en trois catégories :

1. Les méthodes de recherche exhaustive : ces méthodes énumèrent tous les patterns qui respectent les paramètres définis par l'utilisateur [124] ;
2. Les méthodes d'extension de patterns : ces méthodes identifient dans un premier temps les patterns courts et au fur et à mesure les allongent en rajoutant des éléments à ces patterns. L'algorithme APRIORI [125] et l'algorithme TEIRESIAS [126] sont les plus connus dans la littérature ;
3. Les méthodes heuristiques itératives : ces méthodes sont utilisées dans le cadre de patterns complexes. L'une de ces méthodes est l'échantillonnage de Gibbs [127].

Ces méthodes possèdent toutes leurs avantages et inconvénients. Ainsi, l'avantage de la recherche exhaustive est de retourner la totalité des patterns existants, son inconvénient principal est le temps de calcul. L'extension de patterns a l'avantage d'être plus rapide, mais ne permet pas d'identifier la totalité des patterns, principalement lorsque des substitutions peuvent exister. Les méthodes heuristiques itératives ne garantissent pas de trouver les meilleurs patterns, mais ont l'avantage de converger vers un minimum local.

Les patterns peuvent être de différentes formes [118] :

- des patterns dits séquentiels, c'est-à-dire que la succession des éléments les composant est clairement définie ;
- des patterns parallèles, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de contraintes d'ordre entre les éléments.

La figure 4.1 présente la différence entre ces deux types de patterns à travers un exemple simple. Dans cette figure, les deux patterns sont composés des mêmes activités (A, B et C), mais le pattern séquentiel nécessite que l'ordre

des éléments soit respecté. Ainsi, le pattern séquentiel n'est présent qu'en début de séquence, alors que le pattern parallèle est présent en début et en fin de séquence.

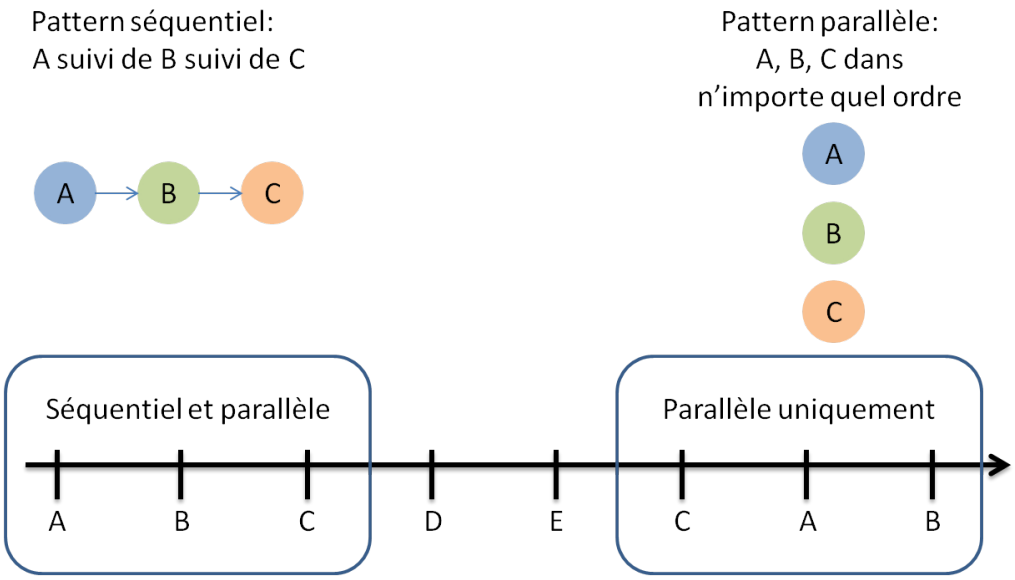


FIGURE 4.1 – Différence de reconnaissance au sein d'une séquence d'un pattern séquentiel et d'un pattern parallèle.

De plus, certaines méthodologies permettent uniquement la reconnaissance de patterns entièrement définis, c'est-à-dire que tous les éléments des patterns sont identifiés, alors, que d'autres autorisent la présence de substitutions, d'insertions ou de délétions, c'est-à-dire que les patterns identifiés prennent en compte la permutation de deux ou plusieurs éléments, l'absence ou l'ajout d'éléments.

Si, dans le pattern parallèle de la figure 4.1, on autorise la substitution de l'élément B par un élément E, nous trouvons 3 occurrences de ce pattern avec substitution : les deux occurrences déjà présentées, mais aussi la séquence E,C,A. Bien évidemment les méthodes permettant la mise en place de telles manipulations sont beaucoup plus complexes que celles qui n'en permettent pas.

4.2 Méthodes

Dans cette section, nous proposons une nouvelle méthode, basée sur la découverte de patterns, afin d'identifier des comportements chirurgicaux ainsi

qu'une nouvelle métrique afin de classifier les chirurgies en fonction de ces comportements.

La méthode de découverte de patterns mise en place est inspirée des travaux de Manilla *et al.* [118] qui proposent une méthode d'extension de patterns afin de découvrir les plus longs patterns fréquents dans des séquences de télécommunication afin de comprendre les signaux d'alarme. Nous avons décidé de nous inspirer de cette méthode principalement grâce à son lemme 1 : "Si un épisode α est fréquent dans une séquence s, alors tous les sous-épisodes $\beta \preceq \alpha$ sont fréquents", sachant que, dans leur article, un épisode correspond à ce que nous nommons un pattern. Ce lemme, nous permet de limiter le nombre de résultats tout en nous assurant que nous ne perdons pas d'informations puisqu'ils sont composés de sous-patterns qui sont eux aussi fréquents.

Nous n'avons pas pu utiliser directement la méthode de Manilla *et al.*, car celle-ci s'applique à des séquences discontinues (le temps entre deux éléments de la séquence peut varier) alors que dans notre cas les séquences sont continues (un élément est directement suivi par un autre). De plus, leur code n'étant pas disponible, il nous a semblé plus aisé de développer notre propre méthode afin qu'elle soit adaptée à nos besoins.

4.2.1 Découverte des plus longs patterns séquentiels fréquents

L'objectif de cette méthode, basée sur l'extension de patterns, est de trouver les plus longs patterns séquentiels fréquents au sein de modèles individuels de procédures chirurgicales (iSPMs) au niveau de granularité des activités. Un pattern est défini comme fréquent s'il est présent au moins un certain nombre de fois dans l'ensemble des séquences. Ce nombre de fois est noté min_fr et est spécifié par l'utilisateur. Les parties suivantes détaillent l'algorithme développé.

4.2.1.1 Algorithme principal

L'algorithme principal (algorithme 0) présente l'ensemble de la méthode. Celle-ci est composée de trois étapes, dont la seconde et la troisième sont répétées afin d'étendre les patterns.

L'étape 1 (algorithme 1, section 4.2.1.2) consiste à créer un vocabulaire des activités fréquentes, c'est-à-dire les activités aux moins présentes min_fr fois dans les iSPMs.

Dans l'étape 2 (algorithme 2, section 4.2.1.3)), des patterns candidats de longueur k sont créés à partir de ce vocabulaire d'activités et des patterns

fréquents de taille $k-1$. Il est important de noter que lors de la première boucle ($k=2$) les patterns fréquents de taille $k-1$ sont les activités fréquentes. Un pattern candidat est un pattern qui peut être fréquent, puisque composé de deux parties qui sont fréquentes.

Dans l'étape 3 (algorithme 3, section 4.2.1.4), le nombre d'occurrences des patterns candidats de taille k est calculé afin de déterminer s'ils sont fréquents. C'est dans cette étape que l'on extrait aussi les plus longs patterns séquentiels fréquents de taille $k-1$. Ces plus longs patterns séquentiels fréquents de taille $k-1$ correspondent à des patterns qui ne peuvent pas être retrouvés dans des patterns fréquents de taille k ou supérieure.

La répétition des étapes 2 et 3 prend fin lorsque nous ne trouvons plus aucun pattern fréquent de taille k.

```
   input  : S : L'ensemble de séquences d'activités. min_fr : Le seuil
            de fréquence.
   output : allLongestFrequentPatterns : L'ensemble des plus longs
            patterns séquentiels fréquents.
 1 begin
 2 |  frequentActivities ← Get Vocabulary Activities(S, min_fr) ;
   |   /* Algorithm 1 */
 3 |  k = 2;                                  /* Longueur des patterns */
 4 |  frequentPatterns_{k-1} ←frequentActivities ;
 5 |  while |frequentPatterns_{k-1} | > 0 do
 6 |  |  candidatePatterns ← Get Candidate
   |  |   Patterns(frequentPatterns_{k-1}, frequentActivities, k);
   |  |   /* Algorithm 2 */
 7 |  |  frequentPatterns_k,allLongestFrequentPatterns ← Get Frequent
   |  |   Patterns(min_fr, k, S, candidatePatterns); /* Algorithm 3
   |  |   */
 8 |  |  k++;
 9 |  |  frequentPatterns_{k-1} ←frequentPatterns_k ;
10 |  end
11 |  return allLongestFrequentPatterns ;
12 end
```

Algorithme 0 : Algorithme principal.

La figure 4.2 illustre les plus longs patterns fréquents (AC et ABA) trouvés à partir des deux séquences et d'un seuil de fréquence min_fr de 2. Nous reviendrons sur les différentes étapes permettant d'obtenir ces résultats dans les sections suivantes.

FIGURE 4.2 – Illustration des plus longs patterns séquentiels découverts à partir de 2 séquences pour un seuil de 2. *S est l'ensemble de séquence, min_fr est le seuil de fréquence.*

4.2.1.2 Constitution du vocabulaire des activités fréquentes

L'objectif de l'algorithme 1 est d'identifier les activités présentes au moins min_fr fois dans l'ensemble de séquences S afin de constituer un vocabulaire. Cela permet de s'assurer que toutes les activités qui constitueront les patterns sont fréquentes.

Dans l'exemple en figure 4.3, nous avons deux séquences composées de 5 activités différentes. Cet algorithme compte donc le nombre de fois que chaque activité est présente et conserve celles qui dépassent le seuil de 2. Ainsi, l'activité A est conservée, car elle apparaît 5 fois dans ces deux séquences, alors que l'activité E qui n'est présente qu'une seule fois n'est pas incluse dans le vocabulaire.

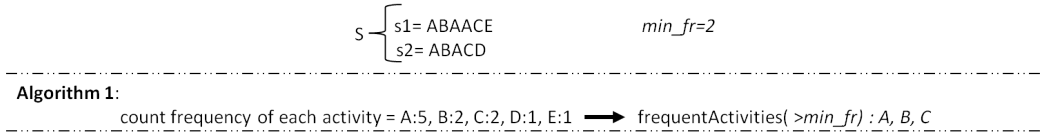


FIGURE 4.3 – Illustration de la constitution du vocabulaire des activités fréquentes. *S est l'ensemble de séquence, min_fr est le seuil de fréquence.*

```
1  Get Vocabulary Activities(S, min_fr) input  : S : L'ensemble
             de séquence d'activités. min_fr : Le seuil de fréquence.
   output : frequentActivities : L'ensemble des activités fréquentes.
2  begin
3      /* Compte la fréquence d'apparition de chaque activité
          */
4      foreach sequence s of S do
5          for i=1 to |s| do
6              if s[i]∉activitiesMap then
7                  activitiesMap.insert(s[i],1) ;   /* activitiesMap contient
                    les activités (keys) et leurs fréquences
                    d'apparition (values) */
8              end
9              else activitiesMap [s[i]]++ ;
10         end
11     end
12     /* Conserve les activités fréquentes dans
          frequentActivities.                                          */
13     foreach activity a of activitiesMap do
14         if a.value ≥min_fr then
15             frequentActivities.insert(a.key);
16         end
17     end
18     return frequentActivities ;
19 end
```

Algorithme 1 : Algorithme retournant les activités fréquentes ($>min_fr$) présentes dans l'ensemble de séquences S.

4.2.1.3 Création des patterns candidats

L'objectif de l'algorithme 2 est de créer les patterns candidats de taille k grâce aux patterns fréquents de taille $k-1$ et aux activités fréquentes.

Pour ce faire, nous ajoutons une des activités fréquentes à la fin d'un des patterns fréquents de taille $k-1$ (ligne 5), ce qui nous donne un candidat potentiel de taille k. Ce candidat potentiel de taille k peut être partagé en deux sous-patterns de taille $k-1$, le premier composé des activités 1 à $k-1$ et le second des activités 2 à k. Afin que le candidat potentiel puisse être un candidat valide, il faut que ces deux sous-patterns soient fréquents. Comme nous savons déjà que le sous-pattern constitué des activités 1 à $k-1$ est fréquent, il ne nous reste qu'à vérifier que le sous-pattern constitué des

activités 2 à k l'est aussi (ligne 7). Cette vérification permet de ne prendre en compte que les candidats qui peuvent être fréquents. En effet si le sous-pattern constitué des activités 2 à k ne l'était pas, d'après le lemme 1 de Manilla *et al.* [118], le candidat ne pourrait pas non plus être fréquent.

```
1  Get Candidate Patterns(patterns_{k-1}, frequentActivities, k)
   input  : patterns_{k-1} : L'ensemble des patterns fréquents de longueur
            k-1. frequentActivities : L'ensemble des activités fréquentes.
            k : La longueur des patterns à créer.
   output : candidatePatterns : L'ensemble des patterns candidats de
            taille k.
2  begin
3      for i=1 to |patterns_{k-1} | do
4          foreach activity a of frequentActivities do
5              potentialCandidate ← Concatenation(patterns_{k-1} [i], a);
                /* Ajouter l'activité a à la fin du i^me pattern
                de patterns_{k-1} */
6              if potentialCandidate [2,k ] ∈ patterns_{k-1} then
7                  /* Si le sous-pattern de taille k-1 contenant
                      a est fréquent                              */
8                  candidatePatterns.insert (potentialCandidate);
9              end
10         end
11     end
12     return candidatePatterns ;
13 end
```

Algorithme 2 : Algorithme pour créer les patterns candidats de taille k grâce aux patterns fréquents de taille k-1 ($patterns_{k-1}$) et aux activités fréquentes.

La figure 4.4 illustre la création des patterns candidats. Pour $k = 2$, les patterns fréquents de taille $k-1$ sont les activités fréquentes, ainsi nous avons 9 candidats potentiels qui sont aussi les patterns candidats. Pour $k = 3$, les patterns fréquents de taille $k - 1$ sont au nombre de 3 : AB, AC et BA (nous expliquerons comment ceux-ci sont obtenus dans la section 4.2.1.4), ainsi en ajoutant chacune des 3 activités fréquentes à la fin de ces patterns, nous obtenons 9 candidats potentiels. Deux de ces candidats potentiels sont ABA et ACC. Pour le pattern ABA, nous testons uniquement si le sous-pattern BA est un pattern fréquent de taille $k-1$. Puisque c'est le cas, ABA est un candidat valide. Le pattern ACC n'est pas un candidat valide, car le sous-pattern CC n'est pas fréquent.

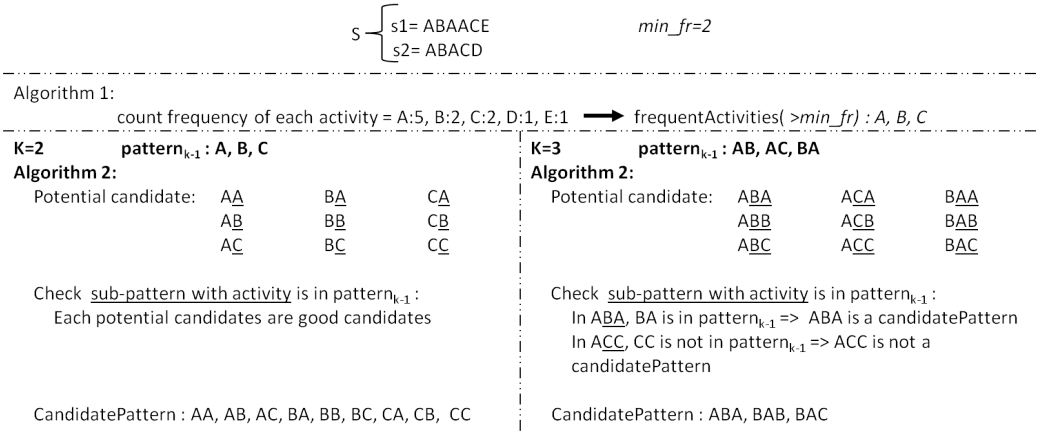


FIGURE 4.4 – Illustration de la création des patterns candidats. *S est l'ensemble des séquences, min_fr est le seuil de fréquence, K est la longueur des patterns candidats à créer, $pattern_{k-1}$ sont les patterns fréquents de longueur $k-1$.*

4.2.1.4 Détermination des patterns fréquents de k activités et des plus longs patterns fréquents de k-1 activités

L'algorithme 3, page 157, a deux objectifs : 1) déterminer les patterns fréquents d'une longueur k ; 2) déterminer les plus longs patterns fréquents de longueur k-1.

Dans un premier temps, l'algorithme calcule le nombre d'occurrences des patterns candidats dans les séquences S (ligne 4 à ligne 13). Cependant, les séquences ne sont pas entièrement parcourues pour chaque candidat. En effet, le nombre de candidats peut être très important, particulièrement lorsque $k = 2$. Par exemple s'il existe 100 activités fréquentes, il existe 10 000 candidats (100 * 100) d'une longueur de 2 activités. Pour améliorer le temps de calcul, on déplace une fenêtre de taille k le long de la séquence (ligne 7). Pour calculer le nombre d'occurrences d'un candidat c, on calcule le nombre d'apparitions de ce candidat dans la fenêtre (ligne 8). Si un candidat est trouvé à la position i de la fenêtre, il est inutile de chercher si les candidats suivants correspondent à cette position, car un seul candidat peut correspondre à la fenêtre. Puis, nous décalons la fenêtre (ligne 9), avant de reprendre le calcul du nombre d'occurrences. Ce déplacement de fenêtre est illustré en figure 4.5.

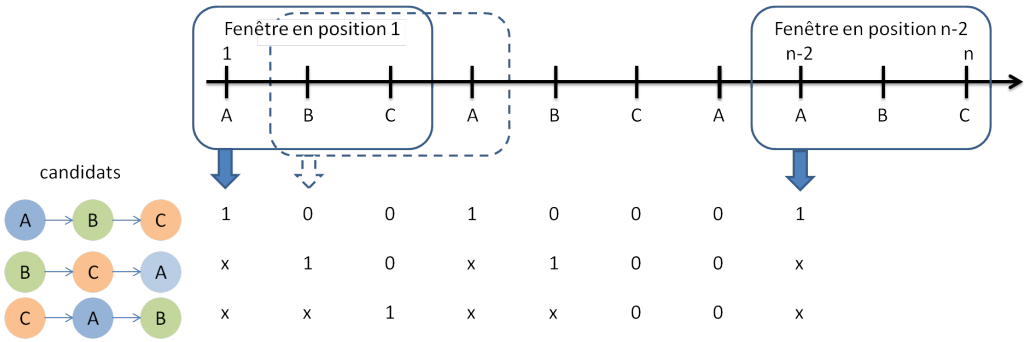


FIGURE 4.5 – Illustration du déplacement d'une fenêtre le long d'une séquence pour calculer le nombre d'occurrences des candidats. *Lorsque la fenêtre trouve un candidat valide à une position, les autres candidats ne sont pas testés (noté x).*

Dans un second temps (ligne 14 à 18), nous vérifions que le nombre d'occurrences de chaque candidat est supérieur au seuil min_fr. Cette étape sépare les candidats en patterns fréquents de k activités, qui seront utilisés dans la prochaine boucle de l'algorithme principal, et en candidats non-fréquents.

Ces candidats non-fréquents sont les patterns qui nous intéressent le plus, car ce sont eux qui nous permettent de détecter les plus longs patterns fréquents de taille $k-1$, c'est-à-dire les patterns qui ne peuvent pas être retrouvés dans des patterns fréquents de taille k ou supérieure. En effet, de par leur construction (section 4.2.1.3), ils sont composés de sous-patterns de taille k-1 qui eux sont fréquents. Dans la dernière étape (ligne 20 à 27), nous vérifions si ces sous-patterns de taille $k-1$ sont présents dans les patterns fréquents de taille k (sous la forme de sous-pattern de taille $k-1$). Les patterns de taille $k-1$ que l'on ne retrouve pas dans les patterns fréquents de taille k forment les plus longs patterns fréquents de taille $k-1$.

Dans l'exemple récapitulatif de la figure 4.6, lorsque $k=2$, les candidats sont au nombre de 9, cependant seulement les patterns AB, AC et BA sont présents au moins min_fr fois. Ceux-ci constituent donc les patterns fréquents de taille 2 et seront utilisés comme entrée pour l'algorithme 2 pour $k=3$. Les 6 autres candidats sont non-fréquents, nous testons donc si leurs sous-patterns sont des sous-patterns des patterns fréquents de taille 2. Ce qui est le cas pour tous.

Pour $k=3$, l'algorithme 2 fournit trois candidats valides : ABA, BAB et BAC. Seul ABA est présent au moins min_fr fois. Ainsi, il n'y a qu'un seul pattern fréquent de taille 3. Nous testons donc si les sous-patterns des

candidats non-fréquents (BAB et BAC), c'est-à-dire BA, AB et AC, sont des sous-patterns de ABA (pattern fréquent de taille 3). Ce n'est pas le cas de AC qui est donc le plus long pattern fréquent de taille 2.

Puisqu'il existe encore un pattern fréquent de taille 3 (ABA), l'algorithme principal continu. À la fin de la troisième boucle, l'algorithme 3 retourne le pattern ABA comme le plus long pattern fréquent de taille 3 et aucun pattern fréquent de taille 4. Ainsi, l'algorithme principal s'arrête en retournant AC et ABA comme les plus longs patterns fréquents. On remarque qu'avec ces deux patterns, nous pourrions avoir le pattern ABAC, cependant celui-ci n'est présent qu'une seule fois dans la séquence s2, donc il ne respecte pas le seuil de fréquence.

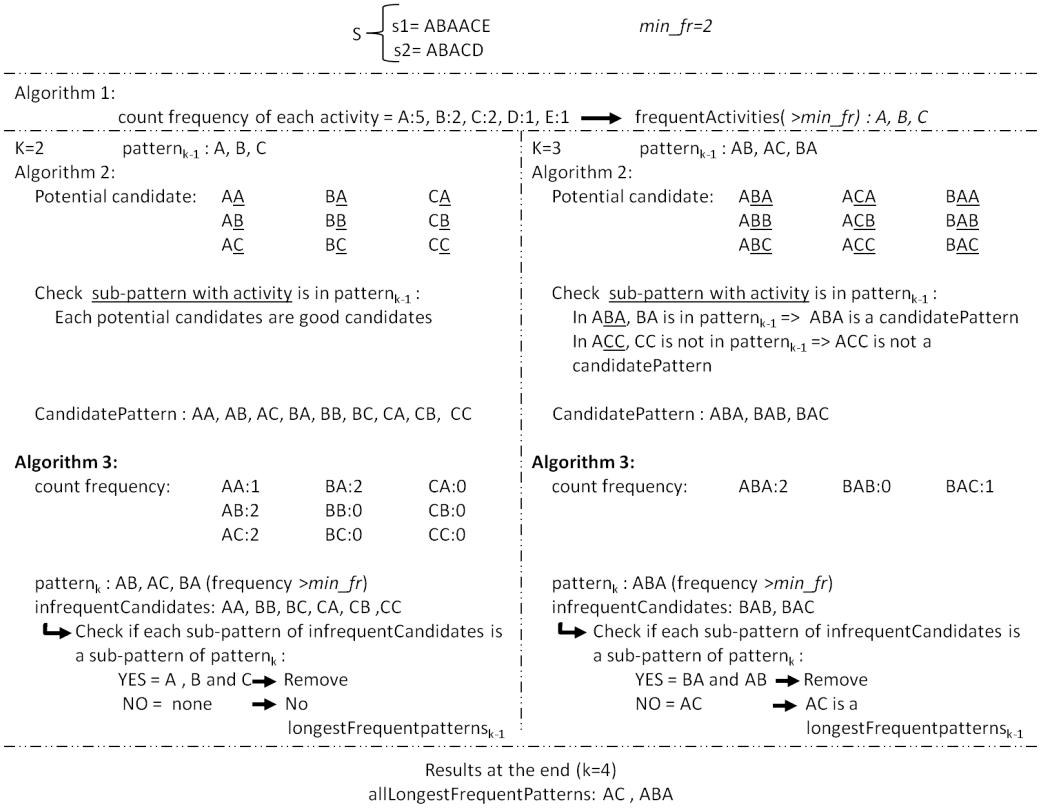


FIGURE 4.6 – Illustration de la détermination des patterns fréquents de k activités et des plus longs patterns fréquents de $k-1$ activités. *S est l'ensemble d'iSPM, min_fr est le seuil de fréquence.*

```
1  Get Frequent Patterns(min_fr, k, S, candidatePatterns)
   input  : min_fr : Le seuil de fréquence. k : La longueur des patterns
            à créer. S : L'ensemble de séquences d'activités.
            candidatePatterns : L'ensemble des patterns candidats de
            taille k
   output : patterns_k : L'ensemble de patterns fréquents de k activités.
            longestFrequentpatterns_{k-1} : L'ensemble des patterns
            fréquents de k-1 activités n'étant pas un des sous-patterns
            de patterns_k.
2  begin
3      /* Compte la fréquence d'apparition de chaque pattern
          candidat c de candidatePatterns dans S                    */
4      foreach sequence s of S do
5          for start=1 to |s|−k do
6              foreach candidate c of candidatePatterns do
7                  if s[start, start+k ]=c then
8                      c.freq++;
9                      start++ ; Stop and go to line 5
10                 end
11             end
12         end
13     end
14     foreach candidate c of candidatePatterns do
15         /* Sauvegarde les patterns candidats fréquents dans
              patterns_k                                            */
16         if c.freq ≥ min_fr then patterns_k.insert(c);
17         else infrequentCandidates.insert(c);
18     end
19     /* Sauvegarde les sous-patterns de infrequentCandidates qui
          ne sont pas des sous-patterns de patterns_k               */
20     foreach infrequent candidate i of infrequentCandidates do
21         for start=1 to 2 do
22             subPattern←i[start, k-2+start];
23             if !Contains Sub-pattern(patterns_k, subPattern) then
24                 longestFrequentpatterns_{k-1}.insert(subPattern);
25             end
26         end
27     end
28     return patterns_k, longestFrequentpatterns_{k-1} ;
29 end
```

Algorithme 3 : Algorithme permettant de retourner les patterns fréquents de k activités ($patterns_k$) et l'ensemble des plus longs patterns fréquents de k-1 activités ($longestFrequentpatterns_{k-1}$).

4.2.2 Classification ascendante hiérarchique

Pour différencier les comportements chirurgicaux, nous avons décidé de mettre en place une classification ascendante hiérarchique qui exploitera la méthode de découverte de patterns. La classification ascendante hiérarchique consiste en la création d'ensembles d'objets similaires, nommés clusters, par une méthode bottom-up [128]. À l'origine, chaque objet constitue son propre cluster, et les deux clusters les plus proches sont regroupés pour former un cluster de plus haut niveau. Afin de déterminer quels sont les clusters les plus proches, il faut avoir défini une métrique de similarité et une méthode d'agrégation. Cette méthode d'agrégation permettra de déterminer la distance entre un cluster regroupant plusieurs objets et les autres clusters.

La métrique de similarité entre clusters dépend de l'application. Celle-ci peut être, entre autres, la distance euclidienne dans le cadre de données numériques, ou la distance de Levenshtein (mesure de similarité entre deux chaînes de caractères) pour des données non-numériques.

Il existe plusieurs méthodes d'agrégations, illustrées en figure 4.7, pour effectuer une classification ascendante hiérarchique. Voici les principales :

- le saut minimal (single linkage) : la distance du cluster agrégé aux autres clusters est la distance la plus petite parmi les éléments du cluster agrégé. Dans la figure 4.7 C1 et C2 sont agrégés afin de former un nouveau cluster, la distance entre ce nouveau cluster et C3 est la distance entre C1 et C3 (2) puisqu'elle est plus petite que celle entre C2 et C3 (6) ;
- le saut maximal (complete linkage) : la distance du cluster agrégé aux autres clusters est la distance la plus grande parmi les éléments du cluster agrégé. Dans la figure 4.7, la distance entre le nouveau cluster et C3 est la distance entre C2 et C3 (6) puisqu'elle est plus grande que celle entre C1 et C3 (2) ;
- le saut moyen (average linkage) : la distance du cluster agrégé aux autres clusters est la distance moyenne des éléments du cluster agrégé. Dans la figure 4.7, la distance entre le nouveau cluster et C3 est la moyenne des distances de C1 et C2 à C3 ((2+6)/2).

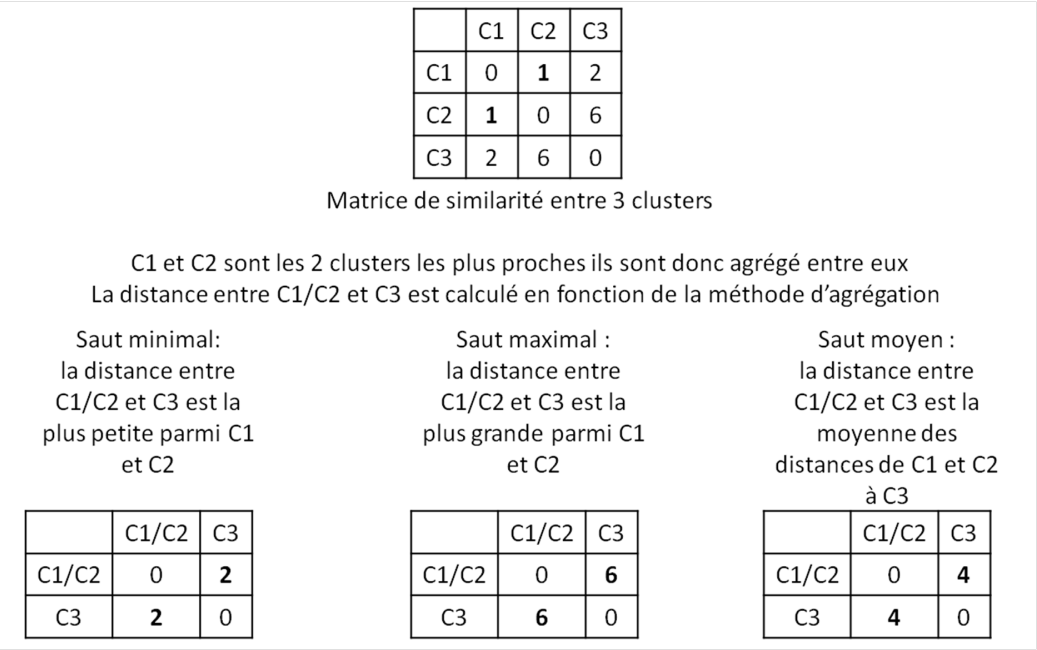


FIGURE 4.7 – Représentation des trois méthodes d'agrégations entre trois clusters.

Dans notre cas, nos données sont les plus longs patterns séquentiels fréquents, c'est-à-dire des données non-numériques. Nous avons donc mis en place une nouvelle métrique afin de pouvoir déterminer la similarité entre les iSPMs. Cette métrique, nommée SLFSP (pour Shared Longest Frequent Sequential Pattern), est basée sur le nombre des plus longs patterns séquentiels fréquents partagés entre deux iSPMs. Un pattern est partagé entre deux iSPMs lorsqu'il possède une occurrence dans chacun d'eux. La métrique SLFSP est définie par :

$$SLFSP(A,B) = \frac{|shared_{A,B}|}{|patterns_A| + |patterns_B| - |shared_{A,B}|} \ , \qquad (4.1)$$

avec A et B deux iSPMs, $|shared_{A,B}|$ le nombre de patterns partagés entre A et B, et $|patterns_A|$ et $|patterns_B|$ le nombre de patterns identifiés dans A et B.

La méthode d'agrégation que nous avons utilisée est le saut moyen avec l'algorithme UPGMA, pour Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean [129]. Ainsi la distance entre les clusters C_1 et C_2 est mise à jour de la manière suivante :

$$d(C_1, C_2) = \frac{1}{|C_1||C_2|} \sum_{i=1}^{|C_1|} \sum_{j=1}^{|C_2|} SLFSP(spm_i, spm_j) \ , \tag{4.2}$$

avec $|C_n|$ le nombre d'iSPMs dans le cluster n.

4.3 Validation

L'objectif de notre méthode est d'identifier des comportements chirurgicaux spécifiques. Or des méthodologies avec un objectif similaire existent déjà en utilisant des méthodes d'alignement temporel ou en créant des gSPMs. Ainsi afin de valider notre méthode, nous avons décidé de l'évaluer en la comparant à deux autres méthodes, avant de l'appliquer à nos données de rectopexies.

4.3.1 Comportements chirurgicaux en fonction des sites chirurgicaux, des niveaux d'expertise et des chirurgiens

La première étude à laquelle nous nous comparons est celle de Forestier *et al.* [114]. Dans un premier temps, nous présenterons les données utilisées dans cette étude. Ensuite, nous comparerons les performances des deux méthodes.

4.3.1.1 Données

Les données utilisées consistent en 41 chirurgies du Rachis Cervical par Voie Antérieure (RCVAs) sur un niveau. Une RCVA sur un niveau consiste à enlever un disque cervical par une approche antérieure. Ces chirurgies ont été réalisées dans trois sites chirurgicaux différents : l'hôpital universitaire de Rennes (France), l'hôpital universitaire de Leipzig (Allemagne) et l'Institut et hôpital neurologiques de Montréal (Canada). Pour la suite, les sites chirurgicaux sont anonymisés.

Parmi les 41 chirurgies, 11 ont été réalisées sur le site A, 12 sur le site B et 18 sur le site C par des chirurgiens possédant des niveaux d'expertises différents. Forestier *et al.* [114] ont défini 2 niveaux d'expertise : expert et intermédiaire. Un expert est un chirurgien qui a réalisé plus de 200 RCVAs, alors qu'un intermédiaire est un chirurgien en ayant fait moins de 100. Le tableau 4.1 présente le nombre de chirurgies par site et le nombre de chirurgiens experts et intermédiaires par site.

Site chirurgical	A	B	C
Nombre de chirurgies	11	12	18
Nombre d'experts	3	3	2
Nombre d'intermédiaires	1	0	2

TABLE 4.1 – Répartition du nombre de chirurgies et de l'expertise des chirurgiens par site.

Les données ont été annotées on-line par un chirurgien expert pour les sites A et C, et par un chirurgien intermédiaire sur le site B. Les deux opérateurs possédaient le même niveau d'expertise dans l'annotation de procédure avec le logiciel d'annotation : le Surgical Workflow Editor [130]. Cependant, Forestier *et al.* [114] ont trouvé une hétérogénéité des termes utilisés entre le site B et les deux autres sites (moins de 50 % de similarité). Pour limiter l'impact d'un vocabulaire différent, les termes ont été harmonisés par un chirurgien expert.

Afin d'être dans les mêmes conditions pour la comparaison et grâce à l'aide de M. Forestier, nous avons utilisé le même vocabulaire harmonisé.

4.3.1.2 Précédente étude

La méthode de Forestier *et al.* [114] utilise la distance de déformation temporelle dynamique (DTW) pour déterminer la similarité entre les iSPMs. Grâce à cette distance, les auteurs créent une matrice de similarité utilisée pour faire une classification ascendante hiérarchique avec comme méthode d'agrégation le saut moyen avec l'algorithme UPGMA.

Les auteurs ont fait trois niveaux d'analyse à partir de cette classification ascendante hiérarchique : les sites chirurgicaux, le niveau d'expertise et les chirurgiens.

La figure 4.8 présente leurs résultats. Au niveau de la classification des sites chirurgicaux, la méthode a un taux de séparabilité de 97,5 % (40/41). Seule une chirurgie du site A est classée avec les chirurgies du site C (cluster C_1).

La distinction de l'expertise est représentée par les clusters notés $C_i^{(j)}$ avec i le numéro du cluster par site chirurgical. Cette distinction a été possible uniquement pour les sites A et C puisque les 12 chirurgies du site B ont été réalisées par des experts. Au sein du cluster C_1, il a été possible d'identifier 3 clusters. Sur les 19 chirurgies de C_1, 3 chirurgies n'ont pas pu être classifiées par le niveau d'expertise. Le cluster $C_1^{(1)}$ représente des chirurgies faites par des experts, $C_1^{(2)}$ par des intermédiaires et $C_1^{(3)}$ majoritairement par des experts, mais une chirurgie a été réalisée par un intermédiaire. Pour le site

chirurgical A (C_2), le cluster $C_2^{(1)}$ englobe des chirurgies d'intermédiaires, $C_2^{(2)}$ et $C_2^{(3)}$ des chirurgies d'experts. Ainsi, le taux de séparabilité du niveau d'expertise est de 86,2 % (25/29).

La dernière classification est par chirurgien et reprend les mêmes clusters que pour le niveau d'expertise. Le cluster $C_1^{(1)}$ représente les chirurgies réalisées par le chirurgien 9 à l'exception d'une par le chirurgien 8. Dans le cluster $C_1^{(2)}$, toutes les chirurgies ont été réalisées par le chirurgien 11. Dans $C_1^{(3)}$, la majorité des chirurgies est réalisée par le chirurgien 8 à l'exception de deux, une par le chirurgien 9 et une par le chirurgien 10. Le cluster $C_2^{(1)}$ représente celles du chirurgien 1, $C_2^{(2)}$ celle du chirurgien 2. Le cluster $C_2^{(3)}$ regroupe 2 chirurgies du chirurgien 3 et 2 du chirurgien 4. Cette étude n'a pas non plus été faite pour le site B, car il n'y a aucun sous-cluster distinct dans C_3. Ainsi, le taux de séparabilité des chirurgiens est de 72,4 %(21/29) pour les sites A et C.

Pour obtenir ces résultats, les auteurs annoncent quelques minutes pour calculer la matrice de similarité.

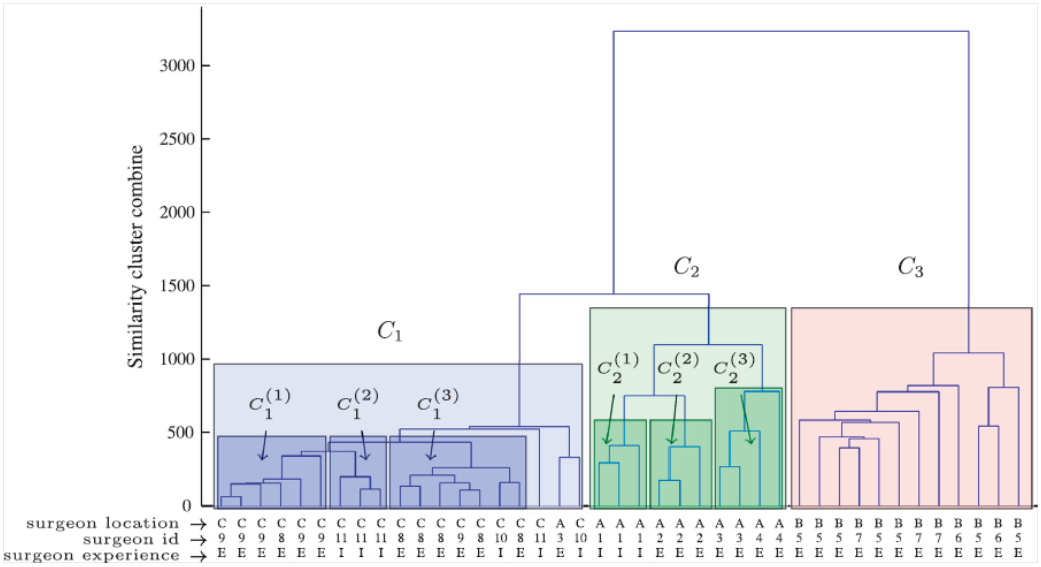


FIGURE 4.8 – Dendrogramme des résultats de la classification obtenue par Forestier *et al.* [114]. *Pour chaque chirurgie, il est spécifié le site chirurgical (A, B ou C), l'identificateur du chirurgien (1-11) et son niveau d'expertise (E pour expert et I pour intermédiaire).*

4.3.1.3 Résultats

Notre objectif est de comparer les résultats de notre méthode à ceux que nous venons de présenter. Cependant, dans notre méthode, nous devons spécifier à partir de quel seuil nous considérons un pattern comme fréquent. Afin de choisir le seuil optimal, nous avons testé l'ensemble des seuils entre 2 et 78 pour déterminer celui qui permettait d'avoir le meilleur compromis entre le recouvrement temporel, c'est-à-dire le pourcentage de la durée des 41 iSPMs couvert par les patterns identifiés (ou leurs sous-patterns), et le temps d'exécution pour obtenir les patterns et calculer la matrice de similarité.

Les résultats pour les seuils de 2 à 10 sont présentés dans le tableau 4.2. Nous n'avons pas présenté les résultats pour les seuils supérieurs, car le recouvrement temporel est inférieur à 60%. Ce tableau présente aussi le nombre de patterns identifiés, le taux de recouvrement numérique et le taux de recouvrement temporel de ces patterns. Le taux de recouvrement représente le pourcentage d'activité couvert par les patterns. Le taux de recouvrement temporel représente le pourcentage de la durée des séquences recouvert par les patterns. Ainsi, un taux de recouvrement numérique de 50% signifie que les patterns identifiés (et leurs sous-patterns) décrivent 50% des successions d'activités des 41 séquences. Dans le cadre d'un recouvrement temporel, ceci signifie que 50% de la durée des 41 séquences est décrite par les patterns identifiés (et leurs sous-patterns). Cette distinction est essentielle, car toutes les activités n'ont pas la même durée.

Seuil	Nb patterns	Recouvrement numérique (%)	Recouvrement temporel (%)	Temps d'exécution (s)
2	785	91,13	89,66	218
3	476	84,17	83,83	79
4	337	79,12	78,36	45
5	264	75,44	75,46	31
6	207	71,35	70,73	22
7	169	67,35	66,85	19
8	132	63,10	63,13	14
9	117	61,19	61,43	13
10	100	58,96	59,32	10

TABLE 4.2 – Résultats de la découverte de patterns en fonction du seuil min_fr.

Nous observons grâce à ce tableau que le nombre de patterns est, à l'origine, très important et qu'il décroît rapidement. Pour le recouvrement numérique et le recouvrement temporel, on observe que pour un faible seuil, nous avons de nombreux patterns peu significatifs. En effet pour un seuil de 2, nous avons plus de 750 patterns pour des recouvrements d'environ 90 %, alors que pour un seuil de 5, nous avons que 264 patterns pour des recouvrements d'environ 75 %. Sachant que chacun des patterns du seuil 5 est aussi découvert comme pattern (ou sous-pattern) pour un seuil de 2, cela signifie que plus de 500 patterns apportent uniquement 15 % d'informations supplémentaires.

Ainsi, il est nécessaire de se demander si ces 15 % d'informations se justifient, d'autant plus que le temps d'exécution pour obtenir ces informations supplémentaires est 7 fois plus important (218 secondes pour un seuil de 2 contre 31 secondes pour un seuil de 5). Ceci dépend de l'application que l'on désire faire des patterns découverts. Dans notre cas, nous ne désirons pas obtenir l'ensemble des patterns pouvant exister, mais uniquement ceux qui, étant partagés, permettent de différencier les chirurgies. Ainsi multiplier les patterns peu significatifs risque d'entraîner du bruit.

Nous avons choisi le seuil 6, permettant d'obtenir 207 patterns, car il présentait selon nous le meilleur compromis entre temps d'exécution (22 secondes) et recouvrement temporel (70,73%). La figure 4.9 présente le dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique pour ce seuil.

Sur cette figure, nous avons identifié 3 clusters (Cl^A, Cl^B et Cl^C), un pour chaque site chirurgical. En réalité Cl^C n'est pas un unique cluster, mais 3 clusters distincts avec le même site chirurgical. Nous avons ici un taux de séparabilité de 100%.

Chacun de ces clusters peut être divisé en sous-clusters où les chirurgies sont réalisées par un chirurgien spécifique. Ces clusters sont notés Cl^n, où n est l'identificateur du chirurgien majoritairement présent dans ce cluster. Seulement trois chirurgiens ont des chirurgies qui ne sont pas classifiées dans un cluster possédant leurs identificateurs :

1. Les deux chirurgies du chirurgien 10 sont classifiées dans le cluster Cl^9 ;
2. Une chirurgie du chirurgien 3 est classée dans Cl^4 ;
3. Le chirurgien 6 a une chirurgie dans Cl^5, une dans Cl^7 et une qui est isolée.

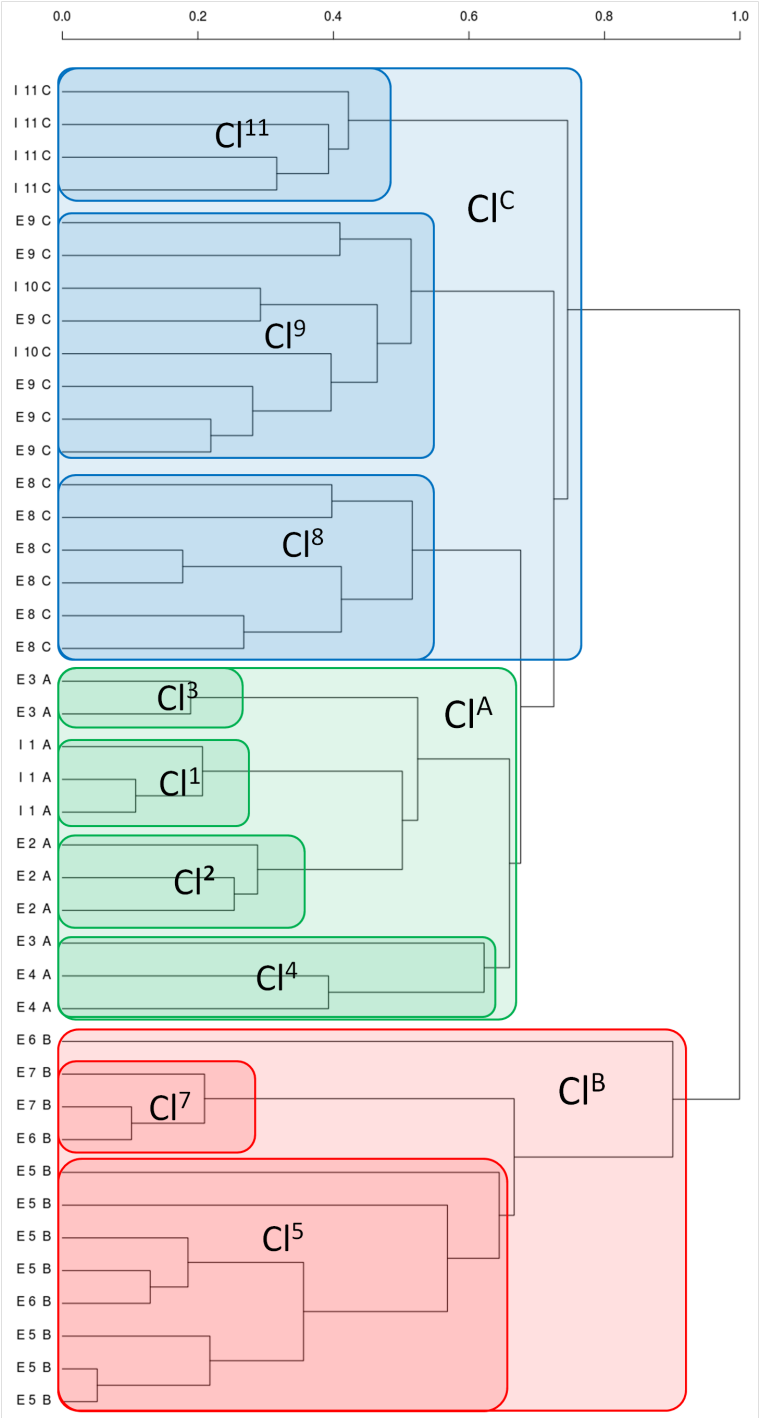


FIGURE 4.9 – Dendrogramme des résultats de la classification obtenue par notre méthode pour un seuil de 6. *Pour chaque chirurgie, il est spécifié le site chirurgical (A, B ou C), l'identificateur du chirurgien (1-11) et son niveau d'expertise (E pour expert et I pour intermédiaire).*

Ainsi, notre méthode a un taux de séparabilité des chirurgiens de 85,4 % (35/41) pour l'ensemble des sites chirurgicaux. Cependant, dans l'étude de Forestier *et al.* [114], l'analyse par chirurgien était uniquement faite sur les sites A et C. En ne prenant en compte que ces deux sites, notre taux de séparabilité est de 89,6 % (26/29).

La dernière classification est par niveau d'expertise. Comme pour l'étude de Forestier *et al.* [114], nous ne l'avons pas faite pour le site B, car toutes les chirurgies sont réalisées par des experts. Dans nos résultats, seul le cluster Cl^9 partage les deux niveaux d'expertises, le chirurgien 10 étant un intermédiaire et le 9 un expert. Ainsi, notre méthode a un taux de séparabilité du niveau d'expertise de 93,1 % (27/29).

4.3.1.4 Comparaison des résultats

Le tableau 4.3 synthétise les résultats des deux méthodes présentées dans la section 4.3.1. Dans tous les cas, nos résultats sont meilleurs que ceux de Forestier *et al.* [114]. De plus, notre méthode a permis de différencier les chirurgiens du site B, ce qui était impossible avec la méthode de Forestier *et al.*

Type de distinction	Sites chirurgicaux	Niveaux d'expertise	Chirurgiens (sites A et C)	Chirurgiens (tous les sites)
Taux de séparabilité pour l'étude de Forestier *et al.* (%)	97.5	86.2	72.4	Nr
Taux de séparabilité pour notre méthode (%)	100	93.1	89.6	85.4

TABLE 4.3 – Taux de séparabilité pour les sites chirurgicaux, les niveaux d'expertise et les chirurgiens par les deux méthodes. *L'étude pour les niveaux d'expertises a uniquement été faite sur les sites A et C. Nr : étude non réalisée.*

4.3.2 Comportements chirurgicaux en fonction du type de procédures au sein de la même chirurgie

La seconde étude à laquelle nous avons comparé notre méthodologie est celle de Neumuth *et al.* [115]. Cette étude présente les différences pouvant exister entre une procédure ambulatoire et une procédure avec hospitalisation sur des chirurgies de la cataracte.

La différence principale mise en avant dans cet article est la durée d'exécution, mais notre méthode n'ayant pas pour objectif de comparer les procédures en fonction du temps, nous n'aborderons pas cette partie de l'article. Cependant, les auteurs ont présenté des profils de traitements par chirurgien, c'est sur cette partie que nous comparerons nos résultats.

Puisque dans cette étude aucune classification n'a été réalisée, nous utiliserons la méthode de découverte de patterns, mais sans la classification ascendante hiérarchique.

4.3.2.1 Données

Les données de cette étude sont 105 chirurgies de la cataracte réalisées à l'hôpital universitaire de Leipzig (Allemagne) par 3 chirurgiens différents. Parmi ces 105 chirurgies, 54 sont des procédures ambulatoires effectuées par les chirurgiens 1 et 2 (respectivement 36 et 18 chirurgies), les 51 autres chirurgies sont des procédures avec hospitalisation effectuées par le chirurgien 3. Ces chirurgies ont été enregistrées grâce au Surgical Workflow Editor [130] par des étudiants en médecine.

4.3.2.2 Précédente étude

Dans leur étude, Neumuth *et al.* [115] comparent les profils de traitement des chirurgiens pour une phase particulière : l'ouverture du sac de la lentille par un instrument nommé rhexis cannula. Grâce aux profils de traitement, les auteurs ont identifié des séquences d'activités expliquant le déroulement opératoire généralement suivi par chaque chirurgien. Ces profils de traitement sont présentés en figure 4.10.

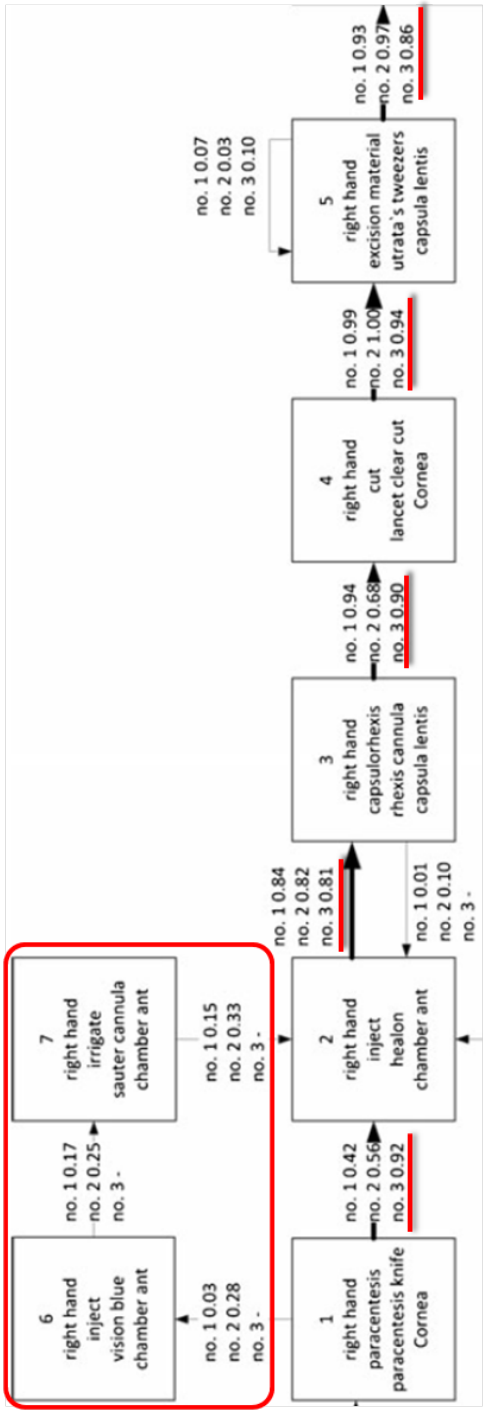


FIGURE 4.10 – Représentation des profils de traitement des chirurgiens de la main droite identifiés par Neumuth *et al.* [115]. *Les chiffres du type "no. 3 0.92" représentent le numéro du chirurgien (no. 3) et la probabilité de transition (0.92). Source : Neumuth et al.* [115]. Les activités entourées en rouge sont les activités optionnelles dans le cadre d'une procédure ambulatoire (chirurgien 1 et 2).

Nous remarquons que pour le chirurgien 3 (procédure avec hospitalisation) la séquence décrivant le déroulement généralement suivi est la suivante :

1. Paracentesis - Paracentesis Knife - Cornea
2. Inject - Healon - Chamber anterior
3. Capsulorhexis - Rhexis cannula - Capsula lentis
4. Cut - Lancet clear cut - cornea
5. Excision material - Utratas tweezers - Capsula lentis

Pour les procédures ambulatoires, les auteurs ont identifié la possibilité de passer par deux activités optionnelles (activités 6 et 7 entourées dans la figure 4.10) entre les activités 1 et 2. Cette modification du déroulement est l'unique différence mise en avant dans cette étude entre le déroulement des deux types de procédures.

4.3.2.3 Résultats

Notre objectif est de retrouver, grâce à notre méthode de découverte de patterns, des comportements similaires à ceux mis en évidence par Neumuth *et al.* [115], en fonction du type de procédure.

Pour cela, nous avons choisi un seuil de 30 pour avoir un recouvrement temporel de 70,55 % similaire à celui de l'étude précédente (70,73% , voir section 4.3.1.3). Ceci nous a permis d'identifier 11 patterns. Contrairement aux travaux de Neumuth *et al.* [115], nous avons étudié l'ensemble de la procédure et non uniquement la phase d'ouverture du sac de la lentille par le rhexis cannula.

Ces patterns sont présents dans un seul type de procédure et pour certains dans les deux. Le tableau 4.4 présente à quel type de procédure appartiennent les patterns identifiés.

Parmi les 11 patterns, 5 sont spécifiques aux procédures ambulatoires et 3 aux procédures avec hospitalisation. Certains patterns sont très courts, comme le premier qui n'est composé que de deux activités, et n'apporte donc que très peu d'informations. Cependant, nous avons 2 patterns spécifiques aux chirurgies avec hospitalisation et un pattern spécifique aux procédures ambulatoires qui sont respectivement composés de 7 et 8 activités. Ces patterns ont donc beaucoup plus d'intérêt, d'autant plus qu'environ 60 % des chirurgies en sont pourvues.

Pattern id	Longueur du pattern	Type de procédure	Nombre de chirurgies	% de chirurgie selon le type
1	2	A	30	55,56
2	2	A	43	79,63
3	2	B	37	25,24
4	3	B	65	61,90
5	4	H	30	58,82
6	4	A	30	55,56
7	5	A	31	57,41
8	7	H	33	64,71
9	7	H	31	60,78
10	8	A	32	59,26
11	9	B	37	35,24

TABLE 4.4 – Type de procédure où sont retrouvés les 11 patterns identifiés pour la chirurgie de la cataracte. *A : procédure ambulatoire, H : procédure avec hospitalisation, B : deux types de procédures. Le pourcentage de chirurgie représente le nombre de chirurgies possédant le pattern sur le nombre de chirurgies du type (54 chirurgies ambulatoires, 51 chirurgies avec hospitalisation et 105 en tout).*

Lorsque l'on observe en détail les patterns 9 et 10, on remarque une forte similarité entre eux. Les patterns sont les suivants :

- pattern 9 :
    a) Inject - Healon - Chamber anterior
    b) Capsulorhexis - Rhexis cannula - Capsula lentis
    c) Cut - Lancet clear cut - cornea
    d) Excision material - Utrata's tweezers - Capsula lentis
    e) Hydrodissection - Sauter cannula - Cortex
    f) Inject - Methocel - Cornea
    g) Inject - Methocel - Chamber anterior
- pattern 10 :
    A) Inject - Healon - Chamber anterior
    B) Capsulorhexis - Rhexis cannula - Capsula lentis
    C) Cut - Lancet clear cut - Cornea
    D) Excision material - Utrata's tweezers - Capsula lentis

E) Hydrodissection - Sauter cannula - Cortex

F) Phacoemulsification- Phako ys - Lens

G) Aspirate - Bimanual syst- Lens

H) Irrigate - Bimanual syst- Lens

Les deux patterns ont leurs 5 premières activités identiques, mais les suivantes (activités f et g du pattern 9, et F à H du pattern 10) sont spécifiques au type de procédure.

4.3.2.4 Comparaison des résultats

En comparaison de la méthode de Neumuth *et al.* [115], notre approche apparaît comme plus spécifique. En effet, les patterns 9 et 10 ont leurs 4 premières activités communes (activités a à d du pattern 9 et A à D du pattern 10) avec les profils de traitement trouvés par Neumuth *et al.* (activité 2 à 5). Mais nos patterns donnent davantage d'information, grâce aux autres activités qui les composent, que les profils de traitement trouvés par Neumuth *et al.*. De plus, dans Neumuth *et al.* [115], les deux types de procédures se différencient uniquement grâce à des activités optionnelles pour les procédures ambulatoires. Avec notre méthode, nous avons défini la succession d'activités qui caractérise chaque type de procédure. Enfin, notre méthode permet de déterminer le pourcentage de chirurgies qui sont caractérisées par chaque pattern, par exemple plus de 60% des chirurgies ambulatoires, de notre ensemble d'apprentissage, suivent le pattern 9, alors que le profil de traitement donne uniquement une probabilité de transition entre chaque activité.

4.3.3 Comportements chirurgicaux en fonction de l'historique des patients

Pour cette troisième étude, nous avons étudié la présence de comportements spécifiques en fonction de l'historique des patients dans le cadre d'opérations de rectopexies effectuées par le même chirurgien.

4.3.3.1 Données

Les données que nous avons utilisées pour cette étude sont des chirurgies de rectopexies. Il s'agit des mêmes données que celles utilisées dans le chapitre 3 auxquelles nous avons ajouté les chirurgies de femmes non hystérectomisées, ce qui monte l'ensemble de données à 15 chirurgies. Celles-ci ont toutes été effectuées par le même chirurgien, ce qui fait que nous ne mettrons pas en avant des comportements spécifiques aux chirurgiens. Pour chaque chirurgie,

les caractéristiques préopératoires suivantes ont été recueillies : le sexe, l'âge, l'indice de masse corporelle (IMC), si les patients sont multipares ou ont subi une hystérectomie. Le tableau 4.5 présente ces informations.

Pour le patient 20, nous n'avons aucune donnée préopératoire. Néanmoins, grâce à l'absence d'utérus sur la vidéo, nous savons qu'il s'agit d'un homme ou d'une femme hystérectomisée.

Le patient le plus jeune à 16 ans et le plus âgé 81 ans. La majorité des patients ont plus de 60 ans (8 patients), 3 patients ont moins de 30 ans et 3 ont entre 30 et 59 ans.

Concernant l'IMC, 1 patient est en maigreur (IMC <18,5), 9 patients ont une corpulence normale (18,5 <IMC <25) , 4 sont en surpoids (25 <IMC <30).

Sur les 14 patients dont nous avons les données, 4 sont multipares et 3 sont hystérectomisées. Parmi ces trois patientes hystérectomisées, nous ne savons pas si deux d'entre elles sont multipares.

Identifiant du patient	Sexe	Âge	IMC	Multipare	Hystérectomie
1	Femme	71	26,6	x	
2	Femme	81	23,5		
3	Femme	38	21,8		
4	Femme	36	21,5		
5	Femme	60	24,6	x	
6	Femme	75	22,7		x
7	Femme	67	21,5	x	
10	Femme	27	18,1		
11	Femme	68	21,8		
14	Femme	23	19,4		
15	Femme	47	28,3	x	
17	Femme	16	19,1		
18	Femme	65	26,6	?	x
19	Femme	76	28,4	?	x
20	?	?	?	?	?

TABLE 4.5 – Données préopératoires des patients ayant subi une rectopexie. *Un* x *signifie que la patiente est multipare ou a subi une hystérectomie. Un* ? *signifie que la donnée est manquante.*

4.3.3.2 Résultats

Pour déterminer le seuil de fréquence (min_{fr}), nous avons testé plusieurs seuils allant de 2 à 17. Le nombre de patterns identifiés, le recouvrement par nombre d'activité et par durée ainsi que le temps d'exécution sont présentés en tableau 4.6.

Comme pour la première étude, le nombre de patterns identifiés diminue avec le seuil, cependant, on remarque un palier pour les seuils de 13 à 16 où nous avons entre 14 et 15 patterns pour des recouvrements par nombre d'activités d'environ 61 % et des recouvrements temporels d'environ 72 %.

Entre le seuil 14 et 15, nous avons un pattern supplémentaire qui apparaît, alors que nous avons les mêmes taux de recouvrement, ceci signifie qu'un des patterns du seuil 14 était présent uniquement 14 fois, mais que ses deux sous-patterns sont tous deux présents 15 fois ou plus.

Nous avons choisi de prendre le seuil 14, car il présente un taux de recouvrement temporel de 71,56 %, ce qui est l'un des plus proches de ceux des deux études précédentes. Nous avions également envisagé de prendre les seuils 15 ou 16, cependant les patterns identifiés pour un seuil de 15 étaient exactement les mêmes que pour un seuil de 16. C'est-à-dire que pour le seuil de 15, tous les patterns avaient un nombre d'occurrences d'au moins 16. En prenant un seuil supérieur au nombre de séquences (15), nous avons la certitude que si un pattern est présent une seule fois dans chaque séquence, nous ne le détecterons pas.

Seuil	Nb pattern	Recouvrement (%)	Recouvrement temporel (%)	Temps d'exécution (ms)
2	139	91,59	94,43	1779
3	83	86,51	89,99	684
4	69	84,75	89,25	520
5	51	81,22	86,24	306
6	36	76,76	83,03	218
7	31	74,06	81,92	178
8	28	72,72	81,28	150
9	27	71,89	80,42	125
10	25	70,64	79,16	105
11	20	64,32	74,34	83
12	18	62,14	72,75	78
13	14	61,20	72,06	59
14	14	60,58	71,56	59
15	15	60,58	71,56	56
16	15	60,58	71,56	58
17	11	51,86	66,90	50

TABLE 4.6 – Résultats de la découverte de patterns en fonction du seuil min_fr.

La figure 4.11 présente le dendrogramme suite à la classification ascendante hiérarchique. Nous remarquons 2 clusters bien séparés, le cluster C_1 comprenant 7 femmes non hystérectomisées (F) et le cluster C_2 comprenant les 3 femmes hystérectomisées (Y), 4 femmes non hystérectomisées et le patient dont on ne connaît pas le sexe, mais ne possédant pas d'utérus. Ces deux clusters ne séparent jamais complètement, les autres données préopératoires. Le tableau 4.7 présente les extremums des données préopératoires pour chacun des clusters.

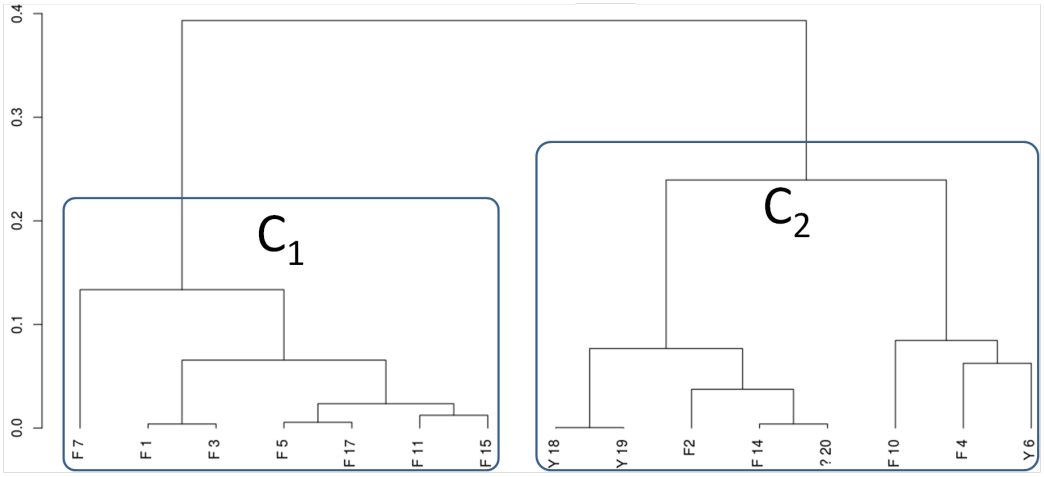


FIGURE 4.11 – Dendrogramme de la classification selon les données préopératoires pour un seuil de 14. *Pour chaque chirurgie, il est spécifié l'identificateur du patient et s'il s'agit d'une femme hystérectomisée (Y) ou non (F). Le patient 20 est associé à un ?, car nous ne savons pas s'il s'agit d'un homme ou d'une femme hystérectomisée.*

Données préopératoire	Cluster C_1	Cluster C_2
Sexe	Femmes non hystérectomisées	Tout
Âge	16 à 71	27 à 81
IMC	19,1 à 28,3	18,1 à 28,4
Multipare	Oui et non	Non et Pas d'information

TABLE 4.7 – Extremums des données préopératoires des clusters identifiés.

Ainsi, les plus longs patterns fréquents partagés entre les iSPMs ne sont pas suffisants pour permettre une classification pour les données préopératoires. Cependant, ceci ne signifie pas pour autant qu'il n'existe pas de patterns spécifiques à certaines des caractéristiques préopératoires. De façon analogue à celle utilisée pour l'étude en section 4.3.2, nous avons observé dans quelle chirurgie apparaissait chaque pattern puis nous les avons reliés aux données préopératoires. Le tableau 4.8 présente à quelles donnés préopératoire les patterns sont spécifiques ainsi que le nombre de chirurgies présentant ce pattern parmi celles possédant cette caractéristique. À noter que nous n'avons pas intégré l'âge dans ce tableau, car aucun pattern n'est spécifique à une tranche d'âge particulière.

Pattern id	Sexe	IMC	Multipare
P1			
P2	F (7/11)	>18,5 (7/13)	
P3	F (7/11)	>18,5 (7/13)	
P4		>18,5 (8/13)	
P5			
P6			
P7			
P8		>18,5 (7/13)	
P9	F (6/11)	>18,5 (6/13)	
P10	F (7/11)	>18,5 (7/13)	
P11		>18,5 (4/13)	Non (2/8)
P12	F (8/11)	>18,5 (8/13)	
P13		<25 (6/10)	
P14		>18,5 (5/13)	

TABLE 4.8 – Données préopératoires des 14 patterns identifiés pour la rectopexie. *Seules les informations spécifiques sont écrites dans ce tableau. F : femmes non hystérectomisées. IMC >18,5 : patient en corpulence normale ou en surpoids. IMC <25 (6/10) patient maigre ou en corpulence normale. Lorsqu'une donnée n'était pas connue pour un patient, nous ne l'avons pas prise en compte pour définir la spécificité de patterns.*

Parmi les 14 patterns :

- cinq patterns (P2, P3, P9, P10 et P12) sont spécifiques aux femmes non hystérectomisées et présents chez 55 %-73 % d'entre elles ;
- neuf patterns (P2 à P4, P8 à P12 et P14) sont spécifiques aux patients qui ont un IMC supérieur à 18,5, c'est-à-dire aux patients qui ont une corpulence normale ou un surpoids. Cependant étant donné qu'un seul patient a un IMC inférieur à 18,5, il est difficile d'être certain de la validité de la spécificité pour ces patterns. D'autant plus que certains de ces patterns ne sont présents que chez peu de patients, par exemple le pattern 11 est uniquement présent que chez 31 % (4/13) des patients avec un IMC supérieur 18,5 ;
- un pattern (P13) est spécifique à 60 % (6/10) des patients maigres ou ayant une corpulence normale (IMC inférieur à 25)
- un pattern (P11) est spécifique aux femmes nullipares (n'ayant jamais été enceintes). Cependant, celui-ci n'étant présent que chez 25 % (4/8) des femmes n'ayant jamais été enceintes, il est difficile d'être certain sa spécificité.

Avec ces patterns spécifiques, il est possible d'extrapoler certaines des données préopératoires du patient 20. Les patterns présents dans la chirurgie de ce patient sont les suivants : P1, P4, P6, P7, P11, P13 et P14. Avec les patterns P4, P11 et P14, on peut supposer que ce patient à un IMC supérieur à 18,5 et avec le pattern P13 qu'il a un IMC inférieur à 25, on peut donc supposer que ce patient a une corpulence normale. Le pattern P11 nous informe aussi qu'il peut s'agir d'un patient nullipare. Cependant, ce pattern n'étant présent que chez 25% des patientes nullipares, l'extrapolation au patient 20 est incertaine. Les informations du patient 20 ont été retrouvées a posteriori et confirment, en partie, nos extrapolations : il s'agissait d'une femme hystérectomisée multipare avec un IMC de 21,53 (corpulence normale). Le pattern P11 n'est donc pas spécifique aux patientes nullipares.

4.3.4 Comportements chirurgicaux spécifiques à l'apparition d'événements indésirables

Notre méthode étant apte à fournir des comportements chirurgicaux spécifiques à de nombreux critères, nous nous sommes penchés sur le cas des comportements chirurgicaux spécifiques aux événements indésirables.

Les données qui comportent l'identification des événements indésirables sont celles de rectopexies. Nous avons séparé, en fonction des EIs, les données en trois groupes : pas d'EIs, EIs courts (moins de 20 secondes) et EIs longs (plus de 20 secondes). Les patterns identifiés sont les mêmes que pour l'étude précédente et les résultats après classification sont présentés en figure 4.12. Comme précédemment, deux clusters (notés Cl) sont identifiables, mais ils comportent différents groupes d'EIs. En observant dans quelle chirurgie apparaissait chaque pattern, nous n'avons trouvé aucun pattern spécifique à un groupe d'EIs.

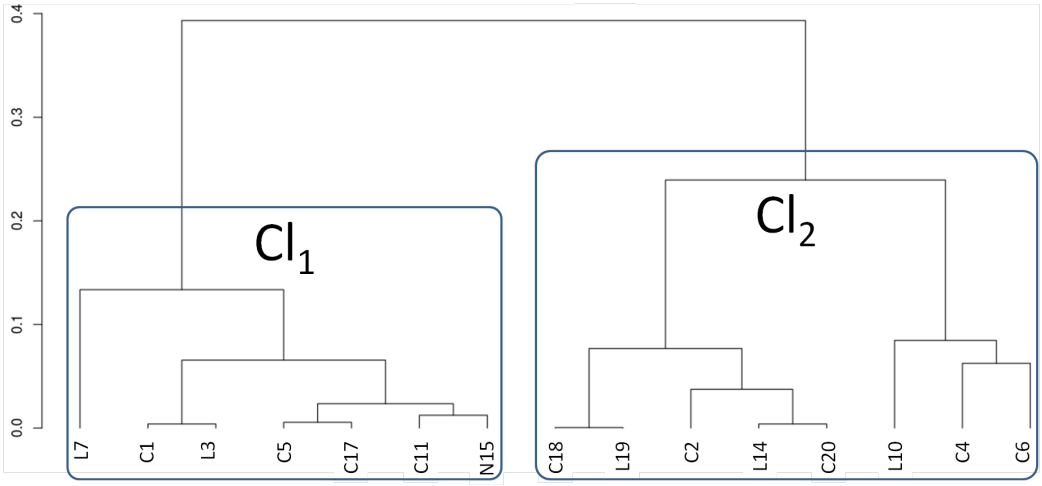
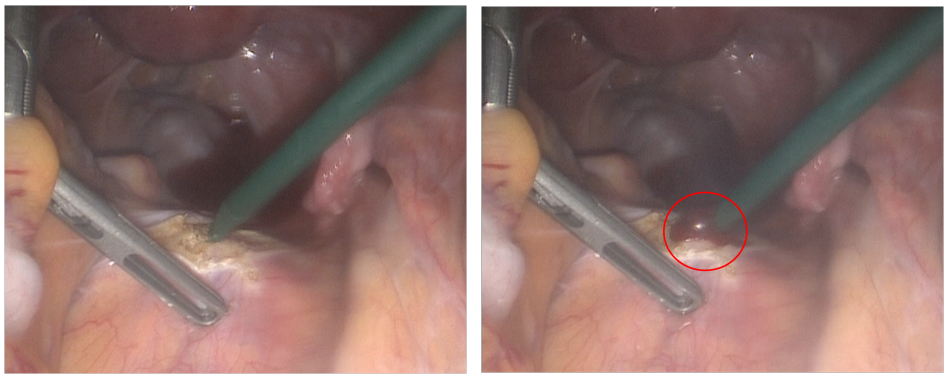


FIGURE 4.12 – Dendrogramme de la classification selon les événements indésirables pour un seuil de 14. *Pour chaque chirurgie, il est spécifié l'identificateur du patient et si cette chirurgie comporte des EIs courts (C), des EIs longs (L) ou aucun EIs (N).*

L'absence de résultats significatifs peut s'expliquer par le fait que les événements indésirables présents dans ces données sont des événements vasculaires, c'est-à-dire que la cause immédiate est la section de vaisseaux sanguins non visibles sur les vidéos. Or, une grande partie des activités d'une rectopexie consiste à couper des structures. Comme l'illustre la figure 4.13, il semble donc impossible de distinguer une activité entraînant un EI d'une activité n'en entraînant pas. Donc, puisqu'il n'y a pas de différence entre ces deux types d'activités, il est impossible pour notre méthode de mettre en évidence des patterns spécifiques à l'apparition d'EIs.



(a) Dissection du promontoire avant l'apparition d'un événement indésirable.

(b) Dissection du promontoire après l'apparition d'un événement indésirable.

FIGURE 4.13 – Dissection du promontoire avant (a) et après (b) l'apparition d'un événement indésirable vasculaire. *L'événement indésirable vasculaire est mis en évidence par le cercle rouge sur la figure (b).*

Une autre solution aurait été de comparer les patterns présents en amont des EIs aux patterns lorsqu'il n'y a pas d'EI, afin de se concentrer principalement sur les patterns spécifiques à l'apparition des EIs. Cependant, le problème des activités entraînant les EIs qui sont impossibles à différencier des autres reste présent. De plus, ceci nécessiterait de définir jusqu'à quel point les activités en amont peuvent avoir une influence sur l'apparition d'un EI.

4.4 Discussion

Dans ce chapitre, nous avons mis en place une méthode de découverte de patterns et une métrique du nom de SLFSP pour réaliser des classifications ascendantes hiérarchiques. Pour valider que notre méthodologie était capable de distinguer différents comportements chirurgicaux, nous l'avons comparée à deux autres études. Enfin, nous l'avons aussi appliquée à nos données de rectopexies.

4.4.1 Comportements chirurgicaux en fonction des sites chirurgicaux, des niveaux d'expertises et des chirurgiens

Pour différencier des comportements chirurgicaux relatifs aux sites chirurgicaux, aux niveaux d'expertise et aux chirurgiens, nous avons comparé notre méthode avec celle de Forestier *et al.* [114].

Sur le jeu de donnée considéré, notre approche donne de meilleurs résultats (tableau 4.3) que la méthode de Forestier *et al.* [114]. De plus, notre méthode a permis de faire la différence entre les chirurgiens du site B, ce qui était impossible avec la méthode de Forestier *et al.*

Bien que sur ces données, nous avons un taux de séparabilité de 100% entre les sites chirurgicaux, ce résultat est à nuancer. En effet, sur la figure 4.9, on remarque que le cluster Cl^8 est plus proche du cluster Cl^A que des autres clusters du site C. Notre méthode obtient donc de tels résultats principalement grâce à sa capacité à différencier des chirurgiens.

Dans le cluster Cl^9, on observe la présence de deux chirurgiens : le chirurgien 9, un expert, et le chirurgien 10, un intermédiaire. Ceci entraîne une diminution du taux de séparabilité pour le niveau d'expertise et pour les chirurgiens. Cependant, il s'avère que le chirurgien 9 est le mentor du chirurgien 10. Ainsi, l'apprentissage par un pair semble conditionner le comportement chirurgical d'un jeune chirurgien.

En plus de fournir de meilleurs résultats, le temps de calcul est moindre que la méthode de Forestier *et al.* [114]. En effet, pour avoir ces résultats la durée d'exécution de notre méthode est d'environ 20 secondes, alors que la méthode de Forestier *et al.* [114] prend plusieurs minutes.

4.4.2 Comportements chirurgicaux en fonction du type de procédures au sein de la même chirurgie

Dans cette étude, seule la partie sur l'identification de pattern a été utilisée, car l'étude de Neumuth *et al.* [115] ne présentait pas de classification.

Avec notre méthode de découverte de patterns, nous avons identifié 5 patterns spécifiques aux procédures ambulatoires et 3 spécifiques aux procédures avec hospitalisation. Nous avons montré que les patterns permettaient de mieux caractériser le comportement chirurgical en fonction du type de procédure qu'avec les profils de traitement mis en évidence par Neumuth *et al.* Ainsi, dans le cas d'une chirurgie où le type de procédure est inconnu, nous pourrions déterminer à quel type elle appartient uniquement en étudiant les patterns spécifiques qu'elle possède.

Il convient de noter que, dans les données utilisées, il existe un biais. En effet, les chirurgies ont été effectuées par différents chirurgiens, deux pour les procédures ambulatoires et un pour les procédures avec hospitalisation. On peut donc se demander si les patterns spécifiques que nous avons identifiés sont uniquement dus à des comportements spécifiques au type de procédure ou alors sont spécifiques aux chirurgiens. L'ensemble des patterns spécifiques aux procédures ambulatoires est présent chez les deux chirurgiens ayant fait ce type de procédure, mais il est cependant possible que l'un ait été le mentor de l'autre. Or, nous avons vu avec la précédente étude qu'un chirurgien acquiert les comportements chirurgicaux de son mentor.

4.4.3 Comportements chirurgicaux en fonction de l'historique des patients

Lors de la classification ascendante hiérarchique, nous n'avons pas réussi à mettre en évidence des comportements chirurgicaux spécifiques en fonction des données préopératoires. Même la distinction entre les femmes hystérectomisées ou non est difficile à faire, puisque bien qu'un cluster comporte uniquement des femmes non hystérectomisées, le second comporte aussi bien celles qui le sont que celles qui ne le sont pas.

Nous avons discuté de ce point avec un chirurgien, et pour lui, cela signifie que les données préopératoires ne modifient pas le comportement du chirurgien qui a effectué les opérations.

Cependant en observant s'il existait des patterns spécifiques à des données préopératoires, nous avons observé que certains patterns étaient spécifiques à des données préopératoires, par exemple nous avons 5 patterns spécifiques aux femmes non hystérectomisées. Avec ces patterns spécifiques, nous avons

réussi à extrapoler correctement une partie des données préopératoire du patient 20. Il semble donc que la découverte de patterns puisse être utilisée pour extrapoler les données préopératoires manquantes. Mais, au vu du faible nombre de données (15) et au faible pourcentage de spécificité que nous avons, il semble important de vérifier cette possibilité par la mise en place d'une étude par validation croisée.

4.4.4 Comportements chirurgicaux spécifiques à l'apparition d'événements indésirables

Comme nous l'a montré la figure 4.13, nos données ne semblent pas adaptées à la découverte de comportements chirurgicaux spécifiques à l'apparition d'événements indésirables.

Actuellement, ces données sont uniquement composées des trois éléments des activités : le verbe d'action, la cible et l'instrument chirurgical. Afin de pouvoir mettre en évidence des comportements chirurgicaux spécifique à l'apparition des événements indésirables, il nous semble nécessaire de compléter ces données avec d'autres informations pour pouvoir différencier les activités produisant des EIs de celle n'en produisant pas. Par exemple, en mettant en évidence les structures qui sont actuellement invisibles et en estimant la distance entre ces structures et les instruments. Les structures invisibles peuvent être mises en évidence grâce à des méthodes de recalage avec des données préopératoire [131] ou par des techniques de fluorescence. En effet, le sang ayant des fréquences d'excitation caractéristiques sous fluorescence [132], une sonde de fluorescence similaire à celle mise en place dans le cadre du projet DEPORRA [111] permettrait de déterminer la position des vaisseaux sanguins. Enfin grâce au tracking tri-dimensionnel des instruments [112, 133], la distance entre l'instrument et les vaisseaux sanguins pourrait être déterminée.

4.4.5 Méthode

Notre méthode permet de mettre en évidence différents types de comportements chirurgicaux, mais elle présente plusieurs limites.

La limite principale de la découverte de patterns est la nécessité de définir le seuil à partir duquel un pattern est considéré comme fréquent. Cependant, comme nous l'avons montré dans la première étude comparative (tableau 4.2), bien que le temps de calcul soit de plusieurs minutes pour un seuil de 2 (218 secondes), celui-ci décroît rapidement. Il est donc envisageable d'effectuer plusieurs tests afin de déterminer le seuil optimal.

La seconde limite de la découverte de patterns est que nous nous sommes uniquement intéressés à des patterns fixes, ne prenant pas en compte de pos-

sibles substitutions. Dans notre méthode, si deux activités diffèrent uniquement par leur instrument, ces deux activités sont considérées comme complètement différentes. Si les deux instruments ont la même fonction, par exemple “couper une structure”, il pourrait être logique de considérer les activités associées comme équivalentes. Étendre notre méthode pour permettre des substitutions, en accord avec des règles ontologiques, pourrait donc être intéressant pour améliorer les résultats.

La classification ascendante hiérarchique présente aussi une limite dans la manière dont notre métrique SLFSP est définie. Pour celle-ci, nous n'avons pris en compte que les patterns les plus longs ; or ces patterns sont composés de sous-patterns qui sont eux aussi fréquents. Ainsi, prendre en compte ces sous-patterns pourrait donner beaucoup plus d'informations et ainsi améliorer les résultats.

4.5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de mettre en place une méthode d'identification de comportements chirurgicaux spécifiques à des caractéristiques des opérations, entre autres l'apparition d'événements indésirables.

Notre méthode basée sur la découverte des plus longs patterns séquentiels fréquents nous a permis de mettre en évidence, sur différents jeux de données, des comportements chirurgicaux spécifiques aux sites chirurgicaux, aux niveaux d'expertise, aux types de procédures et aux chirurgiens. Ces comportements chirurgicaux étaient plus discriminants que ceux mis en avant dans de précédentes études. Cependant, il nous a été impossible de détecter des patterns spécifiques aux événements indésirables.

Le résultat pour les types de procédures est cependant à nuancer, car chaque type a été réalisé par des chirurgiens différents, il est délicat d'affirmer que ces patterns sont effectivement propres au type de procédure et non aux chirurgiens. Afin de s'assurer que les procédures comportent des patterns spécifiques, il faudrait que les deux types de procédures soient réalisés par le même chirurgien.

Avec la classification ascendante hiérarchique, nous n'avons pas réussi à différencier les chirurgies en fonction de données préopératoires. L'hypothèse soulevée par l'un des chirurgiens, avec lequel nous avons travaillé, est qu'un chirurgien ne modifie pas drastiquement son comportement en fonction des données préopératoires. Cette hypothèse semble être invalidée par l'identification de patterns spécifiques à certaines données préopératoires, même si ce point doit être validé sur davantage de chirurgies (un pattern sur les 14 a été faussement identifié comme spécifique aux patientes nullipares suite aux informations retrouvées a posteriori).

En plus de mettre en évidence des comportements chirurgicaux, l'identification de patterns peut être une alternative intéressante pour les méthodes de détection d'étapes ou de phases de processus chirurgicaux. Par exemple, Charrière *et al.* [30] proposent une méthode, basée sur l'extraction de points d'intérêts de vidéo et du flux optique, pour identifier les étapes d'une chirurgie en effectuant une comparaison avec une base de données grâce à une version adaptée de la mesure de similarité de Piciarelli [134]. En déterminant des patterns spécifiques à chaque étape (ou phase) et en les reconnaissant dans une nouvelle chirurgie, il serait possible de déterminer automatiquement les étapes (ou phases) en cours.

Chapitre 5

Discussion générale

5.1 Modélisation des connaissances

Dans cette thèse, nous avons exploité la modélisation des connaissances pour mieux comprendre le déroulement normal d'une rectopexie ainsi que l'ensemble des événements indésirables pouvant y être associé. Grâce à cela, nous avons mis en place une représentation hiérarchique de l'opération ainsi que deux ébauches d'ontologies, l'une pour la rectopexie et la seconde pour les événements indésirables intraopératoires. De plus, la mise en place d'un vocabulaire formel nous a permis d'avoir un outil permettant d'acquérir les SPMs, mais aussi de communiquer avec les chirurgiens.

Dans les différents travaux présentés, nous n'avons pas utilisé la capacité de raisonnement des ontologies, car les ontologies mises en place nécessitent encore du travail avant d'être suffisamment matures pour que cette capacité soit pleinement exprimée. Cependant, nous sommes convaincus qu'une ontologie mature peut permettre d'obtenir de meilleurs résultats que ce soit pour la détection de déviation à travers l'alignement de séquences et l'utilisation d'un modèle semi-Markovien caché, ou pour la détection de patterns pour l'identification de comportements chirurgicaux.

5.1.1 Apports de la modélisation des connaissances pour la construction et l'utilisation des modèles de processus chirurgicaux

5.1.1.1 Création d'un vocabulaire homogénéisé

L'apport le plus évident de la modélisation des connaissances est de permettre l'homogénéisation des termes utilisés pour la création de modèles de processus chirurgicaux (SPM) grâce à la constitution d'un vocabulaire. Cela

permet l'utilisation de SPMs ayant été acquis dans différents centres et par différentes personnes. En effet sans la mise en place d'un tel vocabulaire, il est nécessaire de définir des équivalences entre les termes utilisés, comme dans l'étude de Forestier *et al.* [50], où uniquement 50% des termes étaient communs entre les deux observateurs (voir section 4.3.1.1). De plus, grâce au vocabulaire mis en place avec des experts du domaine étudié, les SPMs sont compréhensibles autant par les spécialistes de la modélisation que par ceux du domaine médical. La modélisation des connaissances est donc essentielle afin de pouvoir communiquer sans ambiguïté entre ces deux mondes : le monde de la pratique chirurgicale, et celui de la modélisation.

5.1.1.2 Utilisation des connaissances pour l'amélioration des méthodes d'analyse des modèles de processus chirurgicaux

L'intérêt de la modélisation des connaissances ne réside pas uniquement dans la création d'un vocabulaire commun. En effet, la modélisation des connaissances peut aussi fournir beaucoup d'informations pour les méthodes d'analyse utilisant les SPMs, principalement grâce à la capacité de raisonnement des ontologies et des règles qui dictent ce raisonnement.

Comme nous l'avons vu, de nombreuses études autour des SPMs ont pour objectif de détecter automatiquement les phases [32, 44, 45], les étapes [30, 35, 36, 38], les activités [29, 34, 39] ou les surgemes [48]. La capacité de raisonnement des ontologies peut permettre d'améliorer de telles méthodes en fournissant un cadre formel pour restreindre les éléments possibles pour la méthode de détection.

Prenons pour exemple la méthode de Lalys *et al.* [29]. Celle-ci utilise uniquement la reconnaissance d'instruments chirurgicaux et de zones anatomiques afin de déterminer une activité. Or, il manque l'information du verbe d'action pour déterminer l'ensemble des composants de l'activité. Dans leur méthode, les auteurs apportent de la connaissance a priori en posant l'hypothèse que la majorité des activités sont spécifiques à une ou deux phases, ce qui limite le nombre de choix possibles. Ceci est une hypothèse valable, comme le montrent leurs résultats. Cependant, celle-ci n'est pas toujours vérifiée. Ces connaissances a priori peuvent être déterminées manuellement ou grâce à la mise en place d'un gSPM multi-échelles, comme proposé par Charrière [135]. L'utilisation d'une ontologie peut permettre de s'abstraire des connaissances a priori. En effet, grâce à la détection de l'instrument chirurgical, l'ontologie peut nous fournir les fonctions attachées à cet instrument. Ces fonctions étant en relation avec les verbes d'action, le nombre de verbes

d'actions possibles est donc limité. De plus, l'ontologie peut nous dire quelles sont les actions que peut subir une zone anatomique, ainsi le nombre de verbes d'actions possibles peut encore être restreint. Ce principe peut aussi servir pour ôter un doute dans la reconnaissance des outils ou des zones anatomiques en vérifiant si les associations sont possibles.

De plus, parmi ces méthodes de détection automatique d'éléments des SPMs, de nombreuses méthodologies [32, 33, 35, 36, 44, 45] utilisent des modèles de Markov (HMMs) ou dérivés. C'est aussi le cas de notre méthodologie de détection de déviations (voir chapitre 3). Cependant, l'un des problèmes majeurs des HMMs est l'existence d'observations qui ne sont pas présentes dans l'ensemble d'apprentissage, et le HMM attribue arbitrairement un état caché à ces observations. Pour remédier à ce problème, une solution proposée par Meire *et al.* [113] consiste à remplacer les observations absentes de l'ensemble d'apprentissage par des observations proches. Cette solution peut être adaptée à de nombreuses méthodologies utilisant des HMMs, il suffit pour cela de mettre en place un critère permettant de déterminer la similarité entre les observations présentes et absentes de l'ensemble d'apprentissage. Dans le cas où les observations sont basées sur des composants détaillés dans une ontologie, il est possible d'utiliser les connaissances de celle-ci afin de déterminer les observations qui sont les plus proches.

Il s'agit ici de deux illustrations de l'intérêt de la capacité de raisonnement d'une ontologie dans les applications basées sur les SPMs. Selon nous, cette capacité de raisonnement est la plus grande force des ontologies. Il peut sembler contraignant de mettre en place une ontologie pour utiliser cette capacité de raisonnement, et ainsi certains préféreront la mise en place de règles d'équivalences définies manuellement. De telles règles d'équivalences permettent, par exemple, de considérer l'instrument A comme équivalent à l'instrument B. Cependant, il est peu probable que ces deux instruments soient toujours similaires, ou alors il s'agit uniquement de deux manières différentes de nommer le même instrument.

Par exemple, un trocart est un instrument chirurgical dont l'une des fonctions est de permettre l'introduction dans la cavité abdominale d'instruments. Ainsi, il est possible de considérer comme équivalent un trocart de 5 mm (dont la lumière fait 5 mm de diamètre) et un trocart de 10 mm en créant une règle d'équivalence. Cette règle est vérifiée lorsque l'instrument à faire rentrer dans la cavité abdominale à un diamètre de 5 mm ou moins, mais dans le cas d'un instrument dont le diamètre est de 7 mm l'équivalence n'est plus valable. Prendre en compte l'ensemble de ces subtilités peut être compliqué avec de simples règles d'équivalence. De plus, dans le cas d'un nouvel instrument, par exemple un trocart de 8 mm, il est alors nécessaire de mettre à jour l'ensemble de ces règles. Or dans le cas d'une ontologie,

les règles sont beaucoup plus subtiles. Pour chaque trocart, on définit les fonctions, mais aussi les limites dues à leur diamètre. Selon le cas, l'ontologie pourra nous dire si ces deux instruments sont similaires. Et dans le cas d'un nouveau trocart, il est juste nécessaire de renseigner ses caractéristiques (fonctions et diamètre).

5.1.2 Limites de la modélisation des connaissances

La modélisation des connaissances est un élément important pour permettre l'amélioration des méthodologies basées SPMs. Cependant, il existe certaines limites à cette modélisation.

5.1.2.1 Modélisation des connaissances dépendante des participants

La première limite de la modélisation des connaissances, est que, quelle que soit la représentation choisie, cette modélisation représente uniquement le point de vue des personnes ayant participé à sa création. Ainsi, elle ne peut pas englober l'ensemble des réalités. Ceci est d'autant plus vrai pour les chirurgies, où il n'existe pas de vérité universelle. Pour une opération, bien que l'objectif et que la majorité du déroulement opératoire sont définis, chaque chirurgien a ses habitudes provenant de ses préférences personnelles et de son expertise, ce qui fait que leurs chirurgies différeront. Ces différences se retrouveront dans le modèle créé suite à la modélisation des connaissances.

Par exemple, certaines équipes chirurgicales préconisent d'associer une sigmoïdectomie (geste constituant à enlever la partie gauche du colon et de rétablir la continuité digestive avec le haut du rectum) à la rectopexie, ce qui n'est pas le cas dans les rectopexies faites à Grenoble. D'après les chirurgiens de Grenoble, l'absence de sigmoïdectomie associée à une rectopexie permet, entre autres, de limiter les douleurs postopératoires [10].

5.1.2.2 Difficulté de capturer les connaissances procédurales

Une autre limite de la modélisation des connaissances est que celle-ci se concentre principalement sur les connaissances théoriques des experts. L'objectif de l'élicitation est d'amener les experts à exprimer l'ensemble de leurs connaissances. Cependant, il existe différents types de connaissances, les connaissances théoriques et les connaissances procédurales. Les connaissances

théoriques représentent l'ensemble des connaissances extraites de la littérature, il s'agit de connaissances qui sont formalisées et facilement accessibles. Les connaissances procédurales représentent le savoir-faire, c'est-à-dire ce que l'expertise a permis d'apprendre, au contraire des connaissances théoriques celles-ci sont non formalisées et peuvent être inconscientes. Faire ressortir les connaissances théoriques, même celles étant devenues un automatisme pour l'expert, est relativement aisé. Cependant, extraire les connaissances procédurales est beaucoup plus compliqué et il est possible que le processus d'élicitation n'arrive pas à toutes les extraire.

Cette difficulté a été mise en évidence dans le chapitre 3 par les différences entre le modèle hiérarchique de la rectopexie obtenu à l'étape de modélisation des connaissances (figure 3.22a) et celui observé suite à la création du modèle spécifique de processus chirurgicaux (figure 3.22b). Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que le modèle extrait de la modélisation de connaissances s'axe principalement sur un processus de réflexion et sur les connaissances théoriques, pour mettre en avant le déroulement normal de l'opération. Au contraire le sSPM, créé à partir des opérations effectivement réalisées par le chirurgien s'axe principalement sur les connaissances procédurales, qui décrivent le déroulement réel de l'opération. Bien évidemment, les deux types de connaissances apparaissent au sein des deux modèles, car les connaissances procédurales se construisent, au fur et à mesure de l'expertise, sur les connaissances théoriques.

Cette difficulté nous a permis de mettre en avant que les modèles de processus chirurgicaux peuvent eux aussi apporter de l'information à la modélisation des connaissances. Selon nous, la mise en place d'un premier modèle grâce à la modélisation des connaissances est essentielle afin de pouvoir créer des SPMs. Mais, il nous semble tout aussi important de retourner, avec les connaissances acquises par l'analyse de SPMs, vers la modélisation des connaissances pour enrichir le modèle. Après de multiples itérations de cet aller-retour entre modélisation des connaissances et analyse des SPMs, en élargissant le nombre de participants, le modèle créé ne représentera plus une unique vision de la procédure chirurgicale, mais une grande partie de ses particularités.

5.2 Vers la détection d'événements indésirables

L'analyse des causes immédiates et profondes des événements indésirables est essentielle pour mettre en place des stratégies de gestion de risque adaptées (section 1.1.3), afin de réduire les nombres d'occurrences d'événements indésirables, et ainsi améliorer la sécurité des patients. Malgré la mise en place

des telles stratégies, il est toujours possible que des événements indésirables surviennent. Ceci peut être dû à des stratégies qui ne sont plus adaptées suite à l'évolution ou l'introduction de nouvelles technologies, suite à l'introduction de nouvelles approches chirurgicales, ou qui ne sont pas respectées suite à une erreur humaine.

La majorité de cette analyse étant aujourd'hui réalisée manuellement, l'analyse automatique d'événements indésirables pourrait être un vrai plus pour la mise en place de stratégies adaptées. Afin qu'une méthode d'analyse automatique soit efficace, le premier pas est la mise en place d'une méthode de détection des événements indésirables. C'est ce que nous avons essayé de mettre en place dans le chapitre 3, grâce à une méthodologie associant un alignement temporel non-linéaire multi-dimensionnel (MD-NLTS) avec un modèle semi-Markovien caché (HsMM).

Nous avons étudié l'influence des deux paramètres de cette méthode : (1) le taux d'échantillonnage pour déterminer si celui-ci avait une influence sur les résultats et (2) le poids des composants des activités afin de déterminer si un des éléments pouvait être ignoré.

Nous n'avons pas trouvé d'influence significative du taux d'échantillonnage sur les résultats. Cependant, il semble exister une tendance à l'amélioration lorsque le taux d'échantillonnage est important.

Pour les poids des composants des activités, aucun n'a d'influence significative sur les résultats. Il s'avère que, dans notre méthode, l'instrument n'a pas d'influence sur les résultats. Or il s'agit du composant le plus simple à identifier au sein des chirurgies. Se passer de l'un des deux autres composants de l'activité semble donc plus pertinent. Néanmoins, ignorer le verbe d'action ou la cible tend à entraîner davantage de fausses détections d'événements indésirables. Bien que ces éléments soient plus compliqués à détecter, il existe des méthodes pour les détecter, comme celle de Despinoy *et al.* [48] sur banc d'essai pour les verbes d'action, ou celle de Lalys *et al.* [29] pour les cibles.

En plus des études de l'influence de ces paramètres, nous avons mis en place une propagation de l'information temporelle à travers l'ensemble de la méthode. Bien que les résultats soient similaires pour les chirurgies alignées ou dans le domaine temporel, cette propagation permet de mettre en place un filtrage des résultats et de faire un lien avec les données vidéo. Selon nous, il est tout aussi important de travailler sur une méthode efficace que sur une représentation pouvant être interprétée par l'ensemble des acteurs du monde médical, cette possibilité de revenir à la vidéo nous semble une bonne solution puisqu'elle permet d'étudier ce qui s'est réellement passé au cours de la chirurgie.

Nous avons aussi essayé de voir si un couplage total entre les deux mains du chirurgien permettait d'améliorer les résultats. En effet, dans toutes les autres études, nous nous sommes contentés de la main principale du chirurgien, or les deux mains travaillent de concert, ainsi les informations de la seconde main pourraient permettre une meilleure identification. Malheureusement, le couplage total des mains entraînait un grand nombre d'observations qui n'avait jamais été rencontré dans l'ensemble d'apprentissage, d'où des résultats moins bons.

En raison de ces limites, notre méthode est loin d'être applicable dans le milieu opératoire à l'heure actuelle. Cependant, elle montre la faisabilité de la mise en place d'une méthode de détection automatique des événements indésirables.

L'une des limites principales provient de la manière dont est créée la chirurgie de référence à partir de l'activité la plus fréquente, à chaque instant t, parmi les chirurgies d'apprentissages alignés. Bien que les chirurgies de références données par cette méthode aient été validées par un chirurgien, il nous semble important de modifier cette chirurgie afin de pouvoir prendre en compte différentes possibilités lorsque la majorité des chirurgies de l'ensemble d'apprentissage ne font pas la même action.

Notre modèle nécessite aussi des modifications pour diminuer le nombre de "déviations événementielles" mal détectées. Nos espoirs se portent 1) sur l'utilisation des informations provenant des deux mains du chirurgien par la mise en place de modèles couplés. Pour ce faire, la méthodologie doit être modifiée afin de permettre un alignement temporel non-linéaire multidimensionnel pour chaque main avec un couplage par une méthode similaire à un DTW indépendant. Pour le modèle semi-markovien caché, il existe déjà des solutions permettant de mettre en place un couplage pour chaque main ; 2) sur la combinaison de la capacité de raisonnement d'une ontologie avec la méthode de Meire *et al.* [113] pour diminuer le nombre d'observations qui n'apparaissent jamais apparues dans l'ensemble d'apprentissage en les remplaçant par les observations existantes les plus proches.

Enfin, il est aussi nécessaire de mettre en place une solution temps réel pour détecter des événements indésirables pour être compatible avec des applications utiles dans le bloc opératoire ou pour l'apprentissage sur simulateur. Actuellement, notre méthode nécessite d'avoir accès à la totalité de la chirurgie pour mettre en place l'alignement temporel non-linéaire multidimensionnel, mais Forestier *et al.* [62] ont proposé une méthode qui nous permettrait de faire un alignement en temps réel.

En soi une simple méthode de détection des événements indésirables

donne peu d'informations à un chirurgien expert qui est capable de déterminer rapidement la gravité d'un événement indésirable. Mais, une telle méthode peut être un outil intéressant dans le cadre de l'apprentissage, en permettant au chirurgien novice d'analyser et de comprendre quels sont les gestes qu'il a réalisés en amont de ces événements indésirables. À plus long terme, cette compréhension peut permettre de prédire et de prévenir l'apparition d'événements indésirables.

5.3 L'identification de comportements chirurgicaux

Les événements indésirables peuvent être expliqués par les causes immédiates et profondes. Alors que les causes profondes font intervenir beaucoup d'éléments extérieurs au contexte chirurgical, les causes immédiates y sont directement reliées, par exemple la cause immédiate d'un événement vasculaire est la section involontaire d'un vaisseau sanguin. Cependant, il peut exister des précurseurs de l'apparition de ces causes immédiates, sous l'expression de successions d'activités particulières. Dans d'autres domaines, la découverte de patterns a réussi à mettre en évidence des patterns spécifiques à des propriétés biologiques [116] ou à des signaux d'alarme en télécommunication [118]. Nous avons donc émis l'hypothèse que des comportements chirurgicaux pouvaient être spécifiques à certaines caractéristiques, dont l'apparition d'événements indésirables. S'il existe des comportements chirurgicaux spécifiques à l'apparition d'événements indésirables, leurs identifications permettraient de mettre en place un système capable d'alerter le chirurgien que les gestes qu'il effectue comportent un risque.

Pour cela nous avons mis en place une méthode afin de découvrir les plus longs patterns fréquents au sein d'un ensemble de chirurgies, ainsi qu'une métrique, nommée SLFSP, pour permettre la classification des chirurgies en fonction de leurs patterns partagés.

Dans un premier temps, afin de nous assurer que notre méthode était capable d'identifier des comportements chirurgicaux, nous l'avons comparée à deux méthodes de l'état de l'art. La première est celle de Forestier *et al.* [50]. Nous avons montré que notre méthode était capable de classifier des chirurgies en fonction des sites chirurgicaux, du niveau d'expertise et des chirurgiens, grâce à des comportements chirurgicaux communs entre ces différentes catégories. La seconde étude est celle de Neumuth *et al.* [115]. Nous avons montré que notre méthode pouvait identifier des patterns spécifiques

à deux types de procédures de la même chirurgie.

Ces deux études nous ont permis de valider notre méthode de découverte de patterns. De plus, ces études montrent que chaque chirurgien a sa manière de réaliser une opération. Elles nous ont aussi permis de mettre en évidence, de façon préliminaire, qu'au cours de son apprentissage un chirurgien adopte des comportements chirurgicaux similaires à ceux de son mentor. Ceci semble logique, car bien que les connaissances théoriques permettent à un jeune chirurgien d'apprendre le principe d'une procédure, il n'est pas autorisé à réaliser une opération seul avant une formation basée sur l'observation et l'accompagnement par un ou plusieurs experts.

Dans un second temps, nous avons essayé de voir si notre méthode était aussi capable de déterminer des comportements chirurgicaux en fonction des caractéristiques préopératoires. Bien que la classification n'ait pas donné de résultat concluant, nous avons réussi à montrer que certains patterns étaient présents uniquement chez les patients partageant des caractéristiques. Ceci montre que bien qu'un chirurgien conserve le même comportement chirurgical, certains patterns chirurgicaux semblent dépendants des données préopératoires du patient. Au cours d'une étude faisant intervenir des données préopératoires, certaines d'entre elles peuvent être manquantes, ainsi cette méthode de découverte de patterns peut permettre d'extrapoler les informations manquantes.

Pour finir, nous avons proposé de comparer les patterns existant avant l'apparition des événements indésirables avec ceux lorsqu'il n'y en a pas. Cependant, nos données, constituées uniquement des trois composants des activités (verbe d'action, cible et instrument), n'étaient pas adaptées pour mettre en évidence des comportements chirurgicaux différents puisque les activités sont les mêmes dans les deux cas. Selon nous, il est nécessaire d'ajouter de l'information sur le contexte entourant les activités, soit par la fusion avec d'autres modalités [111], le recalage avec de l'information préopératoire [131] ou l'estimation de la position dans l'espace des instruments [112, 133].

Notre méthode présente deux limites principales :

1. les sous-patterns des plus longs patterns fréquents ne sont pas pris en compte dans la métrique SLFSP permettant de définir le critère de similarité entre 2 chirurgies. Modifier la métrique SLFSP pour les prendre en compte nous semble important, cependant dans ce cas, il serait nécessaire de pondérer l'importance donnée à chaque sous-pattern, car un pattern composé de deux activités est moins spécifique d'un comportement chirurgical qu'un autre composé d'une dizaine d'activités ;

2. la méthode de détection de pattern n'autorise pas les substitutions ce qui entraîne que deux activités avec le même verbe et la même cible sont considérées comme aussi différentes que deux activités n'ayant aucun composant en commun. La capacité de raisonnement d'une ontologie nous semble essentielle afin de pouvoir autoriser des substitutions qui ont un sens fonctionnel.

Chapitre 6

Conclusion

L'objectif de cette thèse était de montrer la possibilité d'utiliser les modèles de processus chirurgicaux afin de détecter et de comprendre l'apparition des événements indésirables au sein d'une chirurgie.

La détection des événements indésirables intraopératoires n'est pas forcément un outil pertinent pour le chirurgien, car de par son expertise, il est déjà capable de les détecter et de les anticiper dans la majorité des cas. Toutefois, lorsqu'il les détectera, il ne pourra que les corriger par une stratégie adaptée. Par contre, cette détection est essentielle pour l'apprentissage et pour pouvoir comprendre les causes immédiates et les causes profondes des EIs. La compréhension de telles causes permettrait ainsi à un système automatique de fournir des informations aux chirurgiens afin que ceux-ci agissent avant l'apparition des événements indésirables. C'est-à-dire qu'au lieu d'être dans une stratégie de correction, le chirurgien pourrait être dans une stratégie de prévention.

C'est dans cet objectif à long terme que nous avons développé la première méthode permettant de détecter et de différencier des déviations dues à l'apparition d'événements indésirables de celles dues à d'autres facteurs. Il s'agit à l'heure actuelle d'un travail préliminaire qui nécessite encore beaucoup d'améliorations. Cependant, nous avons montré la faisabilité d'une telle approche.

Dans un second temps, nous avons mis en place une méthode de découverte de patterns afin de déterminer si des comportements spécifiques pouvaient être à l'origine de l'apparition des événements indésirables. Les résultats obtenus sur nos données de rectopexies ne sont pas probants, du fait que nos données ne semblent pas adaptées pour différencier les activités correctement réalisées de celles présentant des risques. Il nous semble essentiel

d'extraire davantage d'informations du contexte qui entoure les activités afin d' identifier des comportements chirurgicaux spécifiques à l'apparition d'EIs. Cette extraction peut être possible grâce à la fusion avec d'autres modalités [111], du recalage avec de l'information préopératoire [131] et de position dans l'espace des instruments [112, 133]. Malgré cela, nous avons montré que notre méthode était capable de mettre en évidence de nombreux comportements chirurgicaux spécifiques.

Grâce à l'identification de comportements chirurgicaux spécifique à l'apparition des événements indésirables, il est envisageable de mettre en place un système de prédiction d'apparition des EIs en identifiant les patterns à risques pendant leur réalisation. Cependant, quelle que soit la taille de l'ensemble d'apprentissage, il est toujours possible que notre méthode n'ait pas identifié l'ensemble des comportements à risques. Ainsi, combiner la détection d'événements indésirables à l'identification de comportements chirurgicaux, permettrait au système de prédiction d'apprendre de nouveaux comportements à risques. En effet, si un événement indésirable est détecté sans avoir été prédit en amont, le système d'identification de patterns peut permettre d'étudier s'il existe un nouveau pattern spécifique qui n'a pas été précédemment identifié.

En allant plus loin, on peut aussi imaginer que ce système étudie les comportements chirurgicaux mis en place afin d'éviter l'apparition d'un événement indésirable qui a été prédit. Ceci permettrait, peut-être, d'identifier les patterns de stratégie de prévention qui sont les plus efficaces. Un tel système pourrait permettre de proposer, en temps réel, les différentes solutions possibles au chirurgien.

Publications

Journaux

A. Huaulmé, S. Voros, L. Riffaud, G. Riffaud, G. Forestier, A. Moreau-Gaudry et P. Jannin. Distinguishing surgical behavior by sequential pattern discovery *Journal of Biomedical Informatics,* 67 :34-41, 2017

O. Dergachyova, D. Bouget, **A. Huaulmé**, X. Morandi, and P. Jannin. Automatic data-driven real-time segmentation and recognition of surgical workflow. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2016.

Conférence nationale (poster)

A. Huaulmé, S. Voros, F. Reche, J-L. Faucheron,P. Jannin et A. Moreau-Gaudry. Surgical Process Model of laparoscopic rectopexy. *Proceedings of Surgetica'2014* :239-241, 2014

Bibliographie

[1] HAS. Tableau de bord du déploiement du dispositif de l'accréditation des médecins et des équipes médicales au 25/04/16. Technical report, April 2016.

[2] HAS. Evolutions de l'accréditation : Acteurs - Enseignements pratiques - Indicateurs au 31 décembre 2011. Technical report, January 2013.

[3] Comité éditorial JAM. Signalement des événements indésirables : pour quoi faire et à qui ? *Journal d'Acréditation des Médecins*, page 1, 2009.

[4] HAS. Mettre en oeuvre la gestion des risques associés aux soins en établissement de santé. Technical report, April 2012.

[5] Décret n 2010-1408 du 12 novembre 2010 relatif à la lutte contre les événements indésirables associés aux soins dans les établissements de santé, November 2010.

[6] World Health Organization. WHO draft guidelines for adverse event reporting and learning systems, 2005.

[7] R. Rosenthal, H. Hoffmann, K. Dwan, P.-A. Clavien, and H. C. Bucher. Reporting of Adverse Events in Surgical Trials : Critical Appraisal of Current Practice. *World Journal of Surgery*, 39(1) :80–87, January 2015.

[8] J.-L. Cardin and H. Johanet. Intraoperative events and their outcome : Data from 4007 laparoscopic interventions by the French "Club Cœlio". *Journal of Visceral Surgery*, 148(4) :e299–e310, September 2011.

[9] F. Chung, G. Mezei, and D. Tong. Pre-existing medical conditions as predictors of adverse events in day-case surgery. *British Journal of Anaesthesia*, 83(2) :262–270, August 1999.

[10] J. L. Faucheron, D. Voirin, F. Reche, and A. Dubreuil. Résultats techniques de la rectopexie au promontoire par voie cŒlioscopique pour prolapsus total du rectum : Evaluation prospective chez 100 patients consécutifs. *Le Journal de coelio-chirurgie*, (63) :40–43, September 2007.

[11] A. J. Greenstein, A. S. Wahed, A. Adeniji, A. P. Courcoulas, G. Dakin, D. R. Flum, V. Harrison, J. E. Mitchell, R. O'Rourke, A. Pomp, J. Pender, R. Ramanathan, and B. M. Wolfe. Prevalence of Adverse Intraoperative Events during Obesity Surgery and Their Sequelae. *Journal of the American College of Surgeons*, 215(2) :271–277.e3, August 2012.

[12] H. M.A. Kaafarani, M. N. Mavros, J. Hwabejire, P. Fagenholz, Daniel D. Yeh, M. Demoya, D. R. King, H B. Alam, Y. Chang, M. Hutter, D. Antonelli, A. Gervasini, and G. C. Velmahos. Derivation and Validation of a Novel Severity Classification for Intraoperative Adverse Events. *Journal of the American College of Surgeons*, 218(6) :1120–1128, June 2014.

[13] P. Kambakamba, D. Dindo, A. Nocito, P. A. Clavien, B. Seifert, M. Schäfer, and D. Hahnloser. Intraoperative adverse events during laparoscopic colorectal resection—better laparoscopic treatment but unchanged incidence. Lessons learnt from a Swiss multi-institutional analysis of 3,928 patients. *Langenbeck's Archives of Surgery*, 399(3) :297–305, March 2014.

[14] S. Kheterpal, M. O'Reilly, M. J. Englesbe, A. L. Rosenberg, A. M. Shanks, L. Zhang, E. D. Rothman, D. A. Campbell, and K. K. Tremper. Preoperative and Intraoperative Predictors of Cardiac Adverse Events after General, Vascular, and Urological Surgery :. *Anesthesiology*, 110(1) :58–66, January 2009.

[15] P. Kirchhoff, S. Dincler, and P. Buchmann. A Multivariate Analysis of Potential Risk Factors for Intra- and Postoperative Complications in 1316 Elective Laparoscopic Colorectal Procedures :. *Annals of Surgery*, 248(2) :259–265, August 2008.

[16] M. N. Mavros, G. C. Velmahos, A. Larentzakis, D. D. Yeh, P. Fagenholz, M. de Moya, D. R. King, J Lee, and H. M.A. Kaafarani. Opening Pandora's box : understanding the nature, patterns, and 30-day outcomes of intraoperative adverse events. *The American Journal of Surgery*, 208(4) :626–631, October 2014.

[17] L. Morgan, E. Robertson, M. Hadi, K. Catchpole, S. Pickering, S. New, G. Collins, and P. McCulloch. Capturing intraoperative process deviations using a direct observational approach : the glitch method. *BMJ open*, 3(11) :e003519, 2013.

[18] M. Nathan, J. M. Karamichalis, H. Liu, P. del Nido, F. Pigula, R. Thiagarajan, and E. A. Bacha. Intraoperative adverse events can be compensated by technical performance in neonates and infants after cardiac surgery : A prospective study. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 142(5) :1098–1107.e5, November 2011.

[19] Y. R. Rampersaud, E. R. P. Moro, M. A. Neary, K. White, S. J. Lewis, E. M. Massicotte, and M. G. Fehlings. Intraoperative Adverse Events and Related Postoperative Complications in Spine Surgery : Implications for Enhancing Patient Safety Founded on Evidence-Based Protocols :. *Spine*, 31(13) :1503–1510, June 2006.

[20] C. B. Samaranayake, C. Luo, A. W. Plank, A. E. H. Merrie, L. D. Plank, and I. P. Bissett. Systematic review on ventral rectopexy for rectal prolapse and intussusception. *Colorectal Disease*, 12(6) :504–512, 2010.

[21] D. Dindo, N. Demartines, and P.-A. Clavien. Classification of Surgical Complications : A New Proposal With Evaluation in a Cohort of 6336 Patients and Results of a Survey. *Annals of Surgery*, 240(2) :205–213, August 2004.

[22] P. A. Clavien, J. Barkun, M. L. de Oliveira, J. N. Vauthey, D. Dindo, R. D. Schulick, E. de Santibañes, J. Pekolj, K. Slankamenac, C. Bassi, Rolf Graf, René Vonlanthen, Robert Padbury, John L. Cameron, and Masatoshi Makuuchi. The Clavien-Dindo Classification of Surgical Complications : Five-Year Experience. *Annals of Surgery*, 250(2) :187–196, August 2009.

[23] ISO 31000 :2009 - Management du risque – Principes et lignes directrices, 2009.

[24] J. Reason. *Human Error*. Cambridge University Press, October 1990.

[25] A. J. Forster, H. J. Murff, J. F. Peterson, T. K. Gandhi, and D. W. Bates. The incidence and severity of adverse events affecting patients after discharge from the hospital. *Annals of internal medicine*, 138(3) :161–167, 2003.

[26] F. Lalys and P. Jannin. Surgical process modelling : a review. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 9(3) :495–511, September 2013.

[27] T. Neumuth, N. Durstewitz, M. Fischer, G. Strauss, A. Dietz, J. Meixensberger, P. Jannin, K. Cleary, H. U. Lemke, and O. Burgert. Structured recording of intraoperative surgical workflows. pages 61450A–61450A–12, March 2006.

[28] T. Neumuth, P. Jannin, J. Schlomberg, J. Meixensberger, P. Wiedemann, and O. Burgert. Analysis of surgical intervention populations using generic surgical process models. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 6(1) :59–71, June 2010.

[29] F. Lalys, D. Bouget, L. Riffaud, and P. Jannin. Automatic knowledge-based recognition of low-level tasks in ophthalmological procedures. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 8(1) :39–49, April 2012.

[30] K. Charrière, G. Quellec, M. Lamard, G. Coatrieux, B. Cochener, and G. Cazuguel. Automated surgical step recognition in normalized cataract surgery videos. In *2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pages 4647–4650, August 2014.

[31] S. Agarwal, A. Joshi, T. Finin, Y. Yesha, and T. Ganous. A Pervasive Computing System for the Operating Room of the Future. *Mob. Netw. Appl.*, 12(2-3) :215–228, March 2007.

[32] B. Bhatia, T. Oates, Y. Xiao, and P. Hu. Real-time identification of operating room state from video. volume 2, pages 1761–1766, 2007.

[33] S. A. Ahmadi, T. Sielhorst, R. Stauder, M. Horn, H. Feussner, and N. Navab. Recovery of surgical workflow without explicit models. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2006*, pages 420–428. Springer, 2006.

[34] S. A. Ahmadi, N. Padoy, K. Rybachuk, H. Feussner, S. M. Heinin, and N. Navab. Motif discovery in OR sensor data with application to surgical workflow analysis and activity detection. 2009.

[35] T. Blum, N. Padoy, H. Feußner, and N. Navab. Workflow mining for visualization and analysis of surgeries. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 3(5) :379–386, November 2008.

[36] L. Bouarfa, P. P. Jonker, and J. Dankelman. Discovery of high-level tasks in the operating room. *Journal of Biomedical Informatics*, 44(3) :455–462, June 2011.

[37] J. A. Ibbotson, C. L. MacKenzie, C. G. L. Cao, and A. J. Lomax. Gaze patterns in laparoscopic surgery. *Studies in health technology and informatics*, 62 :154–160, December 1998.

[38] A. James, D. Vieira, B. Lo, A. Darzi, and G.-Z. Yang. Eye-gaze driven surgical workflow segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention MICCAI 2007*, pages 110–117. Springer, 2007.

[39] S.-Y. Ko, J. Kim, W.-J. Lee, and D.-S. Kwon. Surgery task model for intelligent interaction between surgeon and laparoscopic assistant robot. *International Journal of Assitive Robotics and Mechatronics*, 8(1) :38–46, 2007.

[40] H.C. Lin, I. Shafran, D. Yuh, and G. D. Hager. Towards automatic skill evaluation : Detection and segmentation of robot-assisted surgical motions. *Computer Aided Surgery*, 11(5) :220–230, 2006.

[41] C. L MacKenzie, J. A. Ibbotson, C. G. L. Cao, and A. J. Lomax. Hierarchical decomposition of laparoscopic surgery : a human factors approach to investigating the operating room environment. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*, 10(3) :121–127, January 2001.

[42] T. Neumuth, P. Jannin, G. Strauss, J. Meixensberger, and O. Burgert. Validation of Knowledge Acquisition for Surgical Process Models. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 16(1) :72–80, January 2009.

[43] S. Nomm, E. Petlenkov, J. Vain, J. Belikov, F. Miyawaki, and K. Yoshimitsu. Recognition of the surgeon's motions during endoscopic operation by statistics based algorithm and neural networks based ANARX models. *Proc Int Fed Automatic Control*, 17(1), 2008.

[44] N. Padoy, T. Blum, H. Feussner, M.-O. Berger, and N. Navab. On-line Recognition of Surgical Activity for Monitoring in the Operating Room. pages 1718–1724, 2008.

[45] N. Padoy, T. Blum, S.-A. Ahmadi, H. Feussner, M.-O. Berger, and N. Navab. Statistical modeling and recognition of surgical workflow. *Medical Image Analysis*, 16(3) :632–641, 2010.

[46] W. S. Sandberg, B. Daily, M. Egan, J. E. Stahl, J. M. Goldman, R. A. Wiklund, and D. Rattner. Deliberate Perioperative Systems Design Improves Operating Room Throughput :. *Anesthesiology*, 103(2) :406–418, August 2005.

[47] C. Cao, C. L. MacKenzie, and S. Payandeh. Task and motion analyses in endoscopic surgery. pages 583–590, 1996.

[48] F. Despinoy, D. Bouget, G. Forestier, C. Penet, N. Zemiti, P. Poignet, and P. Jannin. Unsupervised trajectory segmentation for surgical gesture recognition in robotic training. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 63(6) :1280–1291, 2016.

[49] O. Dergachyova, D. Bouget, A. Huaulmé, X. Morandi, and P. Jannin. Automatic data-driven real-time segmentation and recognition of surgical workflow. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2016.

[50] G. Forestier, F. Lalys, L. Riffaud, B. Trelhu, and P. Jannin. Classification of surgical processes using dynamic time warping. *Journal of biomedical informatics*, 45(2) :255–264, 2012.

[51] P. Jannin, M. Raimbault, X. Morandi, and B. Gibaud. Modeling Surgical Procedures for Multimodal Image-Guided Neurosurgery. In W. J. Niessen and M. A. Viergever, editors, *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2001*, number 2208 in Lecture Notes in Computer Science, pages 565–572. Springer Berlin Heidelberg, 2001.

[52] P. Jannin and X. Morandi. Surgical models for computer-assisted neurosurgery. *NeuroImage*, 37(3) :783–791, September 2007.

[53] B. Trelhu, F. Lalys, L. Riffaud, X. Morandi, and P. Jannin. Analyse de données pour la construction de modèles de procédures neurochirurgicales. *Revue des Nouvelles Technologies de l Information*, pages 427–432, 2009.

[54] B. Gibaud, C. Penet, and P. Jannin. OntoSPM : a core ontology of surgical procedure models. In *Proceedings of Surgetica'2014*, pages 175–177. Chambery, France, December 2014.

[55] C. E. Reiley and G. D. Hager. Task versus subtask surgical skill evaluation of robotic minimally invasive surgery. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, pages 435–442. Springer, 2009.

[56] F. Meng, L. W. D'Avolio, A. A. Chen, R. K. Taira, and H. Kangarloo. Generating models of surgical procedures using UMLS concepts and multiple sequence alignment. volume 2005, page 520. American Medical Informatics Association, 2005.

[57] D. Katić, A.-L Wekerle, F. Gärtner, H. Kenngott, B. P. Müller-Stich, R. Dillmann, and S. Speidel. Ontology-based prediction of surgical events in laparoscopic surgery. page 86711A, March 2013.

[58] P. F. Hu, Y. Xiao, D. Ho, C. F. Mackenzie, H. Hu, R. Voigt, and D. Martz. Advanced Visualization Platform for Surgical Operating Room Coordination : Distributed Video Board System. *Surgical Innovation*, 13(2) :129–135, June 2006.

[59] C. Mello-Thoms and D. Gur. Remote vs. head-mounted eye-tracking : a comparison using radiologists reading mammograms. page 65150C, March 2007.

[60] L. Rabiner and B.-H. Juang. An introduction to hidden Markov models. *IEEE ASSP Magazine*, 3(1) :4–16, January 1986.

[61] H. Sakoe and S. Chiba. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 26(1) :43–49, 1978.

[62] G. Forestier, F. Petitjean, L. Riffaud, and P. Jannin. Optimal Sub-Sequence Matching for the Automatic Prediction of Surgical Tasks. In *Artificial Intelligence in Medicine*, volume 9105, pages 123–132. Springer International Publishing, Cham, 2015.

[63] L. Bouarfa and J. Dankelman. Workflow mining and outlier detection from clinical activity logs. *Journal of Biomedical Informatics*, 45(6) :1185–1190, 2012.

[64] R. Wolf. *Quantification de la qualité d'un geste chirurgical à partir de connaissances a priori.* PhD thesis, Université de Grenoble, 2013.

[65] G. Claude, V. Gouranton, B. Caillaud, B. Gibaud, B. Arnaldi, P. Jannin, V. K. Narayanan, F. Pasteau, M. Marchal, A. Krupa, and others. Synthesis and Simulation of Surgical Process Models. *Studies in health technology and informatics*, 220 :63–70, 2016.

[66] A. Hughes-Hallett, P. Pratt, J. Dilley, J. Vale, A. Darzi, and E. Mayer. Augmented reality : 3d image-guided surgery. *Cancer Imaging*, 15(1) :1–2, 2015.

[67] J. Loygue, B. Nordlinger, O. Cunci, M. Malafosse, C. Huguet, and R. Parc. Rectopexy to the promontory for the treatment of rectal prolapse. *Diseases of the colon & rectum*, 27(6) :356–359, 1984.

[68] D. Lechaux. Traitement des prolapsus du rectum par abord laparoscopique. *EMC - Techniques chirurgicales - Appareil digestif*, 2(1) :1–7, January 2007.

[69] C. Rosse and J.L.V. Mejino. A reference ontology for biomedical informatics : the Foundational Model of Anatomy. *Journal of Biomedical Informatics*, 36(6) :478–500, December 2003.

[70] Y. He, S. Sarntivijai, Y. Lin, Z. Xiang, A. Guo, S. Zhang, D. Jagannathan, L. Toldo, C. Tao, and B. Smith. OAE : The Ontology of Adverse Events. *Journal of Biomedical Semantics*, 5 :29–29, July 2014.

[71] J. Souvignet, G. Declerck, H. Asfari, M. C. Jaulent, and C. Bousquet. OntoADR a semantic resource describing adverse drug reactions to support searching, coding, and information retrieval. *Journal of Biomedical Informatics*, 63 :100–107, October 2016.

[72] M. C. Jaulent and J. Alecu. Evaluation of an ontological resource for pharmacovigilance. *Studies in Health Technology and Informatics*, 150 :522–526, 2009.

[73] D. B. Lenat and R. V. Guha. *Building Large Knowledge-Based Systems ; Representation and Inference in the Cyc Project.* Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1st edition, 1989.

[74] M. Uschold and M. King. *Towards a methodology for building ontologies.* Citeseer, 1995.

[75] M. Grüninger and M. S. Fox. Methodology for the Design and Evaluation of Ontologies. 1995.

[76] A. Bernaras, I. Laresgoiti, and J. Corera. Building and Reusing Ontologies for Electrical Network Applications'. In *ECAI*, pages 298–302. PITMAN, 1996.

[77] B. Swartout, R. Patil, K. Knight, and T. Russ. Toward distributed use of large-scale ontologies. In *Proc. of the Tenth Workshop on Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems*, pages 138–148, 1996.

[78] M. Fernández-López, A. Gómez-Pérez, and N. Juristo. Methontology : from ontological art towards ontological engineering. 1997.

[79] S. Staab, R. Studer, H.-P. Schnurr, and Y. Sure. Knowledge processes and ontologies. *IEEE Intelligent systems*, 16(1) :26–34, 2001.

[80] F. Neuhaus, A. Vizedom, K. Baclawski, M. Bennett, M. Dean, M. Denny, M. Grüninger, A. Hashemi, T. Longstreth, Leo Obrst, and others. Towards ontology evaluation across the life cycle. *Applied Ontology*, 8(3) :179–194, 2013.

[81] Ó. Corcho, M. Fernández-López, A. Gómez-Pérez, and Ó. Vicente. WebODE : An Integrated Workbench for Ontology Representation, Reasoning, and Exchange. In As. Gómez-Pérez and V. R. Benjamins, editors, *Knowledge Engineering and Knowledge Management : Ontologies and the Semantic Web*, number 2473 in Lecture Notes in Computer Science, pages 138–153. Springer Berlin Heidelberg, October 2002. DOI : 10.1007/3-540-45810-7_16.

[82] R. E. Clark, D. F. Feldon, J. J. G. van Merriënboer, K. A. Yates, and S. Early. Cognitive task analysis. *Handbook of research on educational communications and technology*, 3 :577–593, 2008.

[83] R. E. Clark. Design document for a guided experiential learning course. *Final report on contract DAAD*, pages 19–99, 2004.

[84] G. A. Klein, R. Calderwood, and D. MacGregor. Critical decision method for eliciting knowledge. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 19(3) :462–472, May 1989.

[85] A. D'Hoore and F. Penninckx. Laparoscopic ventral recto(colpo)pexy for rectal prolapse : surgical technique and outcome for 109 patients. *Surgical Endoscopy*, 20(12) :1919–1923, December 2006.

[86] N. Wijffels, C. Cunningham, A. Dixon, G. Greenslade, and I. Lindsey. Laparoscopic ventral rectopexy for external rectal prolapse is safe and effective in the elderly. Does this make perineal procedures obsolete? *Colorectal Disease*, 13(5) :561–566, May 2011.

[87] F. Cadeddu, P. Sileri, M. Grande, E. De Luca, L. Franceschilli, and G. Milito. Focus on abdominal rectopexy for full-thickness rectal prolapse : meta-analysis of literature. *Techniques in Coloproctology*, 16(1) :37–53, February 2012.

[88] G. Portier, S. Kirzin, P. Cabarrot, M. Queralto, and F. Lazorthes. The effect of abdominal ventral rectopexy on faecal incontinence and constipation in patients with internal intra-anal rectal intussusception. *Colorectal Disease*, 13(8) :914–917, 2011.

[89] K.M. Elsayes and S. A. A. Oldham, editors. *Introduction to Diagnostic Radiology*. McGraw-Hill Education / Medical, 1 edition edition, August 2014.

[90] e-cancer. Le rectum - Cancer du rectum | Institut National Du Cancer, 2016.

[91] FDA. FDA Adverse Events Reporting System (FAERS) - FDA Adverse Event Reporting System (FAERS) Statistics, November 2015.

[92] Journal officiel des Communauté européennes. Directive 93/42/CEE relative aux dispositifs médicaux, 1993.

[93] S. N. Jadhav and K. Bhandari. Anomaly Detection Using Hidden Markov Model. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, page 28, 2013.

[94] X. Tan and H. Xi. Hidden semi-Markov model for anomaly detection. *Applied Mathematics and Computation*, 205(2) :562–567, November 2008.

[95] G. Forestier, F. Petitjean, L. Riffaud, and P. Jannin. Non-linear temporal scaling of surgical processes. *Artificial Intelligence in Medicine*, 62(3) :143–152, November 2014.

[96] M. Shokoohi-Yekta, J. Wang, and E. Keogh. On the Non-Trivial Generalization of Dynamic Time Warping to the Multi-Dimensional Case. In *Data Mining. Proceeding of the 2015 International Conference on*, pages 39–48. SIAM, 2015.

[97] F. Petitjean, A. Ketterlin, and P. Gançarski. A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering. *Pattern Recognition*, 44(3) :678–693, March 2011.

[98] L. E. Baum and T. Petrie. Statistical Inference for Probabilistic Functions of Finite State Markov Chains. *The Annals of Mathematical Statistics*, 37(6) :1554–1563, 1966.

[99] L. E. Baum and J. A. Eagon. An inequality with applications to statistical estimation for probabilistic functions of Markov processes and to a model for ecology. *Bull. Amer. Math. Soc*, 73(3) :360–363, 1967.

[100] L. E. Baum and G. Sell. Growth transformations for functions on manifolds. *Pacific Journal of Mathematics*, 27(2) :211–227, November 1968.

[101] L. E. Baum, T. Petrie, G. Soules, and N. Weiss. A Maximization Technique Occurring in the Statistical Analysis of Probabilistic Functions of Markov Chains. *The Annals of Mathematical Statistics*, 41(1) :164–171, 1970.

[102] L. R. Rabiner. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. *Proceedings of the IEEE*, 77(2) :257–286, February 1989.

[103] T. V. Duong, H. H. Bui, D. Q. Phung, and S. Venkatesh. Activity recognition and abnormality detection with the switching hidden semi-Markov model. In *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, volume 1, pages 838–845 vol. 1, June 2005.

[104] T. V. Duong, D. Q. Phung, H. H. Bui, and S. Venkatesh. Efficient Coxian Duration Modelling for Activity Recognition in Smart Environments with the Hidden semi-Markov Model. In *2005 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, pages 277–282, December 2005.

[105] T. V. Duong, D. Q. Phung, H. H. Bui, and S. Venkatesh. Human Behavior Recognition with Generic Exponential Family Duration Modeling in the Hidden Semi-Markov Model. In *18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*, volume 3, pages 202–207, 2006.

[106] N. T. Nguyen, D. Q. Phung, S. Venkatesh, and H. Bui. Learning and detecting activities from movement trajectories using the hierarchical hidden Markov model. In *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, volume 2, pages 955–960 vol. 2, June 2005.

[107] G. D. Forney. The viterbi algorithm. *Proceedings of the IEEE*, 61(3) :268–278, March 1973.

[108] S.-Z. Yu and H. Kobayashi. An efficient forward-backward algorithm for an explicit-duration hidden Markov model. *IEEE Signal Processing Letters*, 10(1) :11–14, January 2003.

[109] C. E. Bonferroni. *Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilità*. Libreria internazionale Seeber, 1936.

[110] O. J. Dunn. Multiple Comparisons Among Means. *Journal of the American Statistical Association*, 56(293) :52, March 1961.

[111] S. Voros, A. Moreau-Gaudry, B. Tamadazte, G. Custillon, R. Heus, M.-P. Montmasson, F. Giroud, O. Gaiffe, C. Pieralli, G. Fiard, J.-A. Long, J.-L. Descotes, C. Vidal, A. Nguyen-Dinh, and P. Cinquin. Devices and systems targeted towards augmented robotic radical prostatectomy. *IRBM*, 34(2) :139–146, April 2013.

[112] A. Agustinos and S. Voros. 2d/3d Real-Time Tracking of Surgical Instruments Based on Endoscopic Image Processing. In X. Luo, T. Reichl, A. Reiter, and G. L. Mariottini, editors, *Computer-Assisted and Robotic Endoscopy*, number 9515 in Lecture Notes in Computer Science, pages 90–100. Springer International Publishing, October 2015. DOI : 10.1007/978-3-319-29965-5_9.

[113] J. Meier, A. Dietz, A. Boehm, and T. Neumuth. Predicting treatment process steps from events. *Journal of Biomedical Informatics*, 53 :308–319, 2015.

[114] G. Forestier, F. Lalys, L. Riffaud, D. Louis Collins, J. Meixensberger, S. N. Wassef, T. Neumuth, B. Goulet, and P. Jannin. Multi-site study of surgical practice in neurosurgery based on surgical process models. *Journal of Biomedical Informatics*, 46(5) :822–829, October 2013.

[115] T. Neumuth, R. Wiedemann, C. Foja, P. Meier, J. Schlomberg, D. Neumuth, and P. Wiedemann. Identification of surgeon\–individual treatment profiles to support the provision of an optimum treatment service for cataract patients. *Journal of Ocular Biology, Diseases, and Informatics*, 3(2) :73–83, June 2010.

[116] D. Y. Chiang, P. O. Brown, and M. B. Eisen. Visualizing associations between genome sequences and gene expression data using genome-mean expression profiles. *Bioinformatics*, 17(suppl 1) :S49–S55, June 2001.

[117] I. Eidhammer, I. Jonassen, and W. R. Taylor. Structure Comparison and Structure Patterns. *Journal of Computational Biology*, 7(5) :685–716, October 2000.

[118] H. Mannila, H. Toivonen, and A. I. Verkamo. Discovery of Frequent Episodes in Event Sequences. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1(3) :259–289, September 1997.

[119] C. I. Ezeife and Y. Lu. Mining Web Log Sequential Patterns with Position Coded Pre-Order Linked WAP-Tree. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 10(1) :5–38, 2005.

[120] Z. Huang, X. Lu, H. Duan, and W. Fan. Summarizing clinical pathways from event logs. *Journal of Biomedical Informatics*, 46(1) :111–127, 2013.

[121] Z. Huang, W. Dong, L. Ji, C. Gan, X. Lu, and H. Duan. Discovery of clinical pathway patterns from event logs using probabilistic topic models. *Journal of Biomedical Informatics*, 47 :39–57, 2014.

[122] I. M. Mullins, M. S. Siadaty, J. Lyman, K. Scully, C. T. Garrett, W. Greg Miller, R. Muller, B. Robson, C. Apte, S. Weiss, I. Rigoutsos, D. Platt, S. Cohen, and W. A. Knaus. Data mining and clinical data repositories : Insights from a 667,000 patient data set. *Computers in Biology and Medicine*, 36(12) :1351–1377, 2006.

[123] B. Brejová, T. Vinar, and M. Li. Pattern Discovery. In S. A. Krawetz and D. D. Womble, editors, *Introduction to Bioinformatics*, pages 491–521. Humana Press, 2003. DOI : 10.1007/978-1-59259-335-4_29.

[124] J. van Helden, B. André, and J. Collado-Vides. Extracting regulatory sites from the upstream region of yeast genes by computational analysis of oligonucleotide frequencies1. *Journal of Molecular Biology*, 281(5) :827–842, September 1998.

[125] R. Agrawal and R. Srikant. Fast Algorithms For Mining Association Rules In Datamining. pages 487–499, 1994.

[126] I. Rigoutsos and A. Floratos. Motif Discovery Without Alignment or Enumeration (Extended Abstract). In *Proceedings of the Second Annual International Conference on Computational Molecular Biology*, RECOMB '98, pages 221–227, New York, NY, USA, 1998. ACM.

[127] C. E. Lawrence, S. F. Altschul, M. S. Boguski, J. S. Liu, A. F. Neuwald, and J. C. Wootton. Detecting subtle sequence signals : a Gibbs sampling strategy for multiple alignment. (262(5131)) :208–214, 1993.

[128] A. K. Jain. Data clustering : 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 31(8) :651–666, 2010.

[129] R. R. Sokal and C. D. Michener. A statistical method for evaluating systematic relationships. *University of Kansas Scientific Bulletin*, 28 :1409–1438, 1958.

[130] T. Neumuth, G. Strauß, J. Meixensberger, H. U. Lemke, and O. Burgert. Acquisition of Process Descriptions from Surgical Interventions. In S. Bressan, J. Küng, and R. Wagner, editors, *Database and Expert Systems Applications*, number 4080 in Lecture Notes in Computer Science, pages 602–611. Springer Berlin Heidelberg, September 2006. DOI : 10.1007/11827405_59.

[131] A. Moreau-Gaudry, D. Girardeau-Montaut, N. Mercier, A. Meneses, D. Saragaglia, P. Gaudin, and P. Cinquin. MITICAO : mesures et interventions pour une thérapeutique innovante du cartilage assistée par ordinateur. *IRBM*, 33(2) :123–128, April 2012.

[132] BH. Li, ZX. Zhang, SS. Xie, and R. Chen. Fluorescence spectral characteristics of human blood and its endogenous fluorophores. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi = Guang Pu*, 26(7) :1310–1313, July 2006.

[133] R. Wolf, J. Duchateau, P. Cinquin, and S. Voros. 3d tracking of laparoscopic instruments using statistical and geometric modeling. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, pages 203–210. Springer, 2011.

[134] C. Piciarelli and G. L. Foresti. On-line trajectory clustering for anomalous events detection. *Pattern Recognition Letters*, 27(15) :1835–1842, November 2006.

[135] K. Charriere. *Real-time analysis and characterization of surgical videos. Application to cataract surgery.* Theses, Télécom Bretagne ; Université de Bretagne Occidentale, November 2015.

Annexe

A Définition des composants des activités de la rectopexie.

Cette annexe présente l'ensemble des définitions des composants des activités que nous avons identifiés lors du processus d'élicitation. Le tableau A.1 présente les définitions des verbes d'action, le tableau A.2 présente celles des instruments et le tableau A.3 celles des cibles.

TABLE A.1 – Définition des verbes d'action des activités

Verbe d'action	Définition
Amener	Apporter un instrument sur le site opératoire
Aspirer	Enlever du site opératoire un liquide par aspiration
Coaguler	Stopper le saignement
Coudre	Rapprocher deux parties d'une structure par suture
Couper	Séparer une structure en une ou plusieurs parties
Dégonfler	Enlever le gaz présent dans une cible rempli de gaz
Exposer	Écarter une cible afin de pouvoir avoir accès à d'autres cibles
Extraire	Retirer du corps du patient une cible
Fixer	Attacher plusieurs cibles ensemble
Gonfler	Augmenter le volume d'une cible en la remplissant d'un gaz
Injecter	Apporter un liquide dans le corps du patient
Insérer	Faire passer à travers
Lâcher	Cesser de tenir une cible
Maintenir	Rester dans la position actuelle
Manipuler	Faire passer une cible d'un instrument à un autre afin de le déplacer

Suite page suivante ...

Verbe d'action	Définition
Nouer	Faire un nœud
Positionner	Déplacer une cible vers un autre endroit
Regarder	Utiliser uniquement la vue afin d'analyser la situation
Saisir	Prendre une cible
Tirer	Exercer une traction sur une cible
Toucher	Exercer une pression sur une cible
Transmettre énergie	Faire passer l'énergie électrique d'un outil vers un autre n'en produisant pas

TABLE A.2 – Définition des instruments des activités

Instrument	Définition
Agrafeuse Endo-Hernia	Agrafeuse permettant d'insérer des agrafes de type Endo-Hernia, c'est-à-dire des agrafeuses permettant une fixation forte
Agrafeuse Taker	Agrafeuse permettant d'insérer des agrafes de type Taker, agrafes en forme de tire-bouchon
Canule	Tube permettant d'injecter ou d'aspirer des liquides
Ciseaux	Outil permettant de couper des structures par rapprochement des deux lames
Crochet monopolaire	Outil permettant de couper ou coaguler une structure grâce à de l'énergie
Optique	Optique fournissant de la lumière et permettant de voir (à travers une colonne cœlioscopique) le site opératoire
Pince crocodile	Pince possédant de petites dents permettant d'agripper la cible, il s'agit d'un instrument traumatique pour les structures anatomiques
Pince de préhension	Pince non-traumatique
Pince fine	Pince non-traumatique possédant un embout fin pour les actions de précision
Porte-aiguille	Outil adapté pour prendre et manipuler une aiguille
Trocart 12mm	Outil permettant le passage d'outils volumineux comme les agrafeuses à travers la paroi abdominale
Trocart 5mm	Outil permettant le passage d'outils à travers la paroi abdominale
Trocart optique	Outil permettant le passage de l'optique à travers la paroi abdominale

Suite page suivante ...

Instrument	Définition

TABLE A.3 – Définition des cibles des activités

Cible	Définition
Adhérence	Tissus cicatriciels reliant les structures anatomiques à la suite d'une opération
Aiguille	Instrument avec une extrémité pointue permettant de passer à travers une structure et un chas à l'autre extrémité permettant de faire passer un fil
Anesthésique local	Produit permettant de limiter la douleur post opératoire
Ballonnet	Élément présent sur certains types de trocarts et qui permet de s'assurer que celui-ci est bien plaqué contre la paroi abdominale
Bandelette	Prothèse permettant de soutenir le rectum
Cavité abdominale	Cavité créée par le pneumopéritoine
Côlon	Organe du système digestif se situant entre le cæcum et le rectum
Compresse	Matériel chirurgical permettant de contrôler une hémorragie
Cul-de-sac de Douglas	Replis du péritoine entre le rectum et le vagin pour les femmes et entre le rectum et la vessie pour les hommes
Eau	
Fil	
Intestin grêle	Organe du système digestif se situant dans la continuité de l'estomac
Paroi abdominale	Groupe musculaires délimitant la cavité abdominale. La paroi abdominale a un rôle de protection des organes internes
Péritoine	Membrane fine protégeant les organes des infections et permettant le glissement des uns par rapport aux autres.
Pince de préhension	Outil chirurgical pouvant être la cible d'une activité avec le verbe d'action "transmettre énergie" afin d'augmenter la surface d'effet de l'énergie

Suite page suivante ...

Cible	Définition
Promontoire	Base du sacrum
Rectum	Organe du système digestif entre le colon et le canal anal permettant le stockage des matières fécales
Trompe de Fallope droite	Partie de l'organe génital féminin reliant l'ovaire droit à l'utérus
Trompe de Fallope gauche	Partie de l'organe génital féminin reliant l'ovaire gauche à l'utérus
Utérus	Partie de l'organe génital féminin permettant le développement embryonnaire.
Vagin	Partie de l'organe génital féminin

B Liste des activités réalisables.

Cette annexe présente l'ensemble des activités pouvant être réalisées pendant une rectopexie avec les composants que nous avons identifiés. Celles-ci sont présentées sous la forme <verbe d'action, instrument, cible(s)>. Plusieurs cibles peuvent être présentes du fait de l'interaction existant entre elles. C'est par exemple le cas de <Agrafer, Agrafeuse Endo-Hernia, Bandelette Rectum>, ici la bandelette est agrafée sur le rectum grâce à l'agrafeuse Endo-Hernia.

<Agrafer, Agrafeuse Endo-Hernia, Bandelette Rectum>
<Agrafer, Agrafeuse Taker, Bandelette Promontoire>
<Amener, Agrafeuse Endo-Hernia, Cavité abdominale>
<Amener, Agrafeuse Taker, Cavité abdominale>
<Amener, Canuler, Cavité abdominale>
<Amener, Ciseaux, Cavité abdominale>
<Amener, Crochet monopolaire, Cavité abdominale>
<Amener, Optique, Cavité abdominale>
<Amener, Pince crocodile, Bandelette>
<Amener, Pince crocodile, Cavité abdominale>
<Amener, Pince crocodile, Compresse>
<Amener, Pince de préhension, Bandelette>
<Amener, Pince de préhension, Cavité abdominale>
<Amener, Pince de préhension, Compresse>
<Amener, Pince fine, Cavité abdominale>
<Amener, Pince fine, Compresse>
<Amener, Porte-aiguille, Aiguille>
<Amener, Porte-aiguille, Cavité abdominale>
<Amener, Porte-aiguille, Compresse>
<Amener, Porte-aiguille, Fil>
<Aspirer, Canuler, Cavité abdominale>
<Coaguler, Crochet monopolaire, Cul de sac de Douglas>
<Coaguler, Crochet monopolaire, Péritoine>
<Coaguler, Crochet monopolaire, Promontoire>
<Coaguler, Pince de préhension, Cul de sac de Douglas>
<Coudre, Pince de préhension, Péritoine Aiguille Fil>
<Coudre, Porte-aiguille, Péritoine Aiguille Fil>
<Couper, Ciseaux, Adhérence>
<Couper, Ciseaux, Bandelette>
<Couper, Ciseaux, Fil>
<Couper, Ciseaux, Péritoine>
<Couper, Ciseaux, Promontoire>
<Couper, Crochet monopolaire, Adhérence>

<Couper, Crochet monopolaire, Cul de sac de Douglas>
<Couper, Crochet monopolaire, Péritoine>
<Couper, Crochet monopolaire, Promontoire>
<Couper, Crochet monopolaire, Rectum>
<Dégonfler, Trocart 12mm, Ballonnet>
<Dégonfler, Trocart 5mm, Ballonnet>
<Exposer, Pince de préhension, Bandelette>
<Exposer, Pince de préhension, Cul de sac de Douglas>
<Exposer, Pince de préhension, Péritoine>
<Exposer, Pince de préhension, Promontoire>
<Exposer, Pince de préhension, Rectum>
<Exposer, Pince de préhension, Utérus>
<Extraire, Agrafeuse Endo-Hernia, Cavité abdominale>
<Extraire, Agrafeuse Taker, Cavité abdominale>
<Extraire, Canuler, Cavité abdominale>
<Extraire, Ciseaux, Cavité abdominale>
<Extraire, Crochet monopolaire, Cavité abdominale>
<Extraire, Optique, Cavité abdominale>
<Extraire, Pince crocodile, Bandelette>
<Extraire, Pince crocodile, Cavité abdominale>
<Extraire, Pince crocodile, Cul de sac de Douglas>
<Extraire, Pince crocodile, Péritoine>
<Extraire, Pince de préhension, Bandelette>
<Extraire, Pince de préhension, Cavité abdominale>
<Extraire, Pince de préhension, Cul de sac de Douglas>
<Extraire, Pince de préhension, Fil>
<Extraire, Pince de préhension, Péritoine>
<Extraire, Pince fine, Cavité abdominale>
<Extraire, Porte-aiguille, Aiguille>
<Extraire, Porte-aiguille, Cavité abdominale>
<Extraire, Porte-aiguille, Compresse>
<Extraire, Porte-aiguille, Fil>
<Extraire, Trocart 12mm, Paroi abdominal>
<Extraire, Trocart 5mm, Paroi abdominal>
<Gonfler, Trocart 12mm, Ballonnet>
<Gonfler, Trocart 5mm, Ballonnet>
<Injecter, Canuler, Anesthésique local>
<Insérer, Trocart 12mm, Paroi abdominal>
<Insérer, Trocart 5mm, Paroi abdominal>
<Lâcher, Pince crocodile, Bandelette>
<Lâcher, Pince crocodile, Compresse>
<Lâcher, Pince de préhension, Aiguille>
<Lâcher, Pince de préhension, Bandelette>

<Lâcher, Pince de préhension, Compresse>
<Lâcher, Pince de préhension, Cul de sac de Douglas>
<Lâcher, Pince de préhension, Fil>
<Lâcher, Pince de préhension, Intestin grêle>
<Lâcher, Pince de préhension, Péritoine>
<Lâcher, Pince de préhension, Rectum>
<Lâcher, Pince fine, Fil>
<Lâcher, Porte-aiguille, Aiguille>
<Lâcher, Porte-aiguille, Compresse>
<Lâcher, Porte-aiguille, Fil>
<Maintenir, Crochet monopolaire, Utérus>
<Maintenir, Pince de préhension, Bandelette Promontoire>
<Maintenir, Pince de préhension, Bandelette Rectum>
<Maintenir, Pince de préhension, Fil>
<Maintenir, Pince de préhension, Intestin grêle>
<Maintenir, Pince de préhension, Utérus>
<Maintenir, Pince de préhension, Utérus>
<Maintenir, Pince fine, Fil>
<Maintenir, Pince fine, Intestin grêle>
<Maintenir, Pince fine, Utérus>
<Maintenir, Porte-aiguille, Fil>
<Manipuler, Pince de préhension, Aiguille>
<Manipuler, Pince de préhension, Fil>
<Manipuler, Porte-aiguille, Aiguille>
<Manipuler, Porte-aiguille, Fil>
<Nouer, Pince de préhension, Fil>
<Nouer, Porte-aiguille, Fil>
<Positionner, Pince crocodile, Bandelette Promontoire>
<Positionner, Pince crocodile, Bandelette Rectum>
<Positionner, Pince de préhension, Bandelette Promontoire>
<Positionner, Pince de préhension, Bandelette Rectum>
<Positionner, Pince de préhension, Intestin grêle>
<Regarder, Optique, Cavité abdominale>
<Regarder, Optique, Paroi abdominal>
<Regarder, Pince fine, Intestin grêle>
<Saisir, Pince crocodile, Bandelette>
<Saisir, Pince crocodile, Compresse>
<Saisir, Pince de préhension, Aiguille>
<Saisir, Pince de préhension, Bandelette>
<Saisir, Pince de préhension, Compresse>
<Saisir, Pince de préhension, Cul de sac de Douglas>
<Saisir, Pince de préhension, Fil>
<Saisir, Pince de préhension, Intestin grêle>

<Saisir, Pince de préhension, Péritoine>
<Saisir, Pince de préhension, Rectum>
<Saisir, Pince fine, Fil>
<Saisir, Porte-aiguille, Aiguille>
<Saisir, Porte-aiguille, Compresse>
<Saisir, Porte-aiguille, Fil>
<Tirer, Pince crocodile, Bandelette>
<Tirer, Pince de préhension, Bandelette>
<Toucher, Crochet monopolaire, Promontoire>
<Toucher, Crochet monopolaire, Rectum>
<Toucher, Pince crocodile, Promontoire>
<Transmettre énergie, Crochet monopolaire, Pince de préhension,>

C Formulaire d'information et de non opposition du patient.

Madame, monsieur,

Le Pr/Dr..... vous propose de participer à une recherche observationnelle. Elle est organisée par le C.H.U. de Grenoble. Vous êtes libre d'accepter ou de refuser de participer à cette recherche et vous avez à tout moment la possibilité de vous retirer de cette recherche sans encourir aucune responsabilité ni aucun préjudice de ce fait.

Afin d'éclairer votre décision voici des informations concernant cette recherche.

Vous allez bénéficier (ou vous aviez bénéficié) d'une intervention chirurgicale de rectopexie par coelioscopie. Votre chirurgien vous propose de participer à une recherche observationnelle appelée "Modélisation de la 'qualité' chirurgicale". L'objectif de cette recherche est d'analyser les données de la chirurgie afin de mieux comprendre le déroulement de l'opération. À terme, cette recherche pourrait permettre au chirurgien d'améliorer sa technique est ainsi limiter les différentes complications.

Pour cette recherche, nous recueillerons :

1. les données de votre dossier médical : sexe, âge, taille, poids, antécédents chirurgicaux,
2. les données recueillies lors de la chirurgie : différentes étapes de la chirurgie,
3. la vidéo du geste chirurgical : il s'agit des images vidéo de la caméra (endoscope) insérée par le chirurgien dans votre corps afin de guider ces gestes lors de l'opération,
4. les données recueillies pendant votre séjour à l'hôpital ainsi que lors de votre consultation à un mois : qualité de vie, incontinence, complications.

Cette recherche ne présente aucun risque pour votre état de santé. Le geste chirurgical s'effectue de façon inchangée suite à l'indication posée par le chirurgien. Cette recherche ne présente pas de contraintes supplémentaires par rapport à la pratique habituelle.

Un traitement de vos données personnelles va être mis en oeuvre. C'est pour permettre d'analyser les résultats de la recherche au regard de l'objectif de cette dernière. À cette fin, les données médicales vous concernant seront transmises à deux laboratoires de recherche Français. Ces données seront identifiées par un numéro de code (votre nom et prénom n'apparaitra pas).

Cette recherche est effectuée conformément à la législation française. Elle a été autorisée par la CNIL. La transmission des données collectées se fera dans les conditions garantissant leur sécurité et leur confidentialité. Si vous retirez votre consentement, les données recueillies avant cet arrêt seront utilisées sauf si vous ne le voulez pas. Vous devrez alors en informer votre chirurgien.

Conformément aux dispositions de la loi 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique aux fichiers et aux libertés, vous avez un droit d'accès et de rectification. Vous avez aussi un droit d'opposition à la transmission des données couvertes par le secret professionnel susceptibles d'être utilisées dans le cadre de cette recherche et d'être traitées.

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _

J'accepte que les données de santé liées à l'intervention chirurgicale de rectopexie soient utilisées pour la recherche présentée ci-dessus.

Nom et prénom du patient :

Date :

Signature du patient :

Nom et prénom de l'investigateur :

Date :

Signature de l'investigateur :