HAL
open science

# Apprentissage automatique à partir de traces multi-sources hétérogènes pour la modélisation de connaissances perceptivo-gestuelles

Ben-Manson Toussaint

## To cite this version:

Ben-Manson Toussaint. Apprentissage automatique à partir de traces multi-sources hétérogènes pour la modélisation de connaissances perceptivo-gestuelles. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. NNT : 2015GREAM063 . tel-01370337

**HAL Id: tel-01370337**

**https://theses.hal.science/tel-01370337v1**

Submitted on 22 Sep 2016

**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 L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Informatique**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par


## Ben-Manson TOUSSAINT


Thèse dirigée par **Vanda LUENGO** et
Co-encadrée par **Evens EMMANUEL**

préparée au sein du **Laboratoire d'Informatique de Grenoble**
dans l'**École Doctorale Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information, Informatique**

# Apprentissage automatique à partir de traces multi-sources hétérogènes pour la modélisation de connaissances perceptivo-gestuelles

Thèse soutenue publiquement le **lundi 12 octobre 2015**,
devant le jury composé de :

**Mme Catherine GARBAY**
Directrice de recherche, CNRS, Université Joseph Fourier, Présidente

**Mme Vanda LUENGO**
Professeure des Universités, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), Directrice

**M. Evens EMMANUEL**
Professeur des Universités, professeur invité à l'Ecole Supérieure d'Infotronique d'Haïti, Co-encadrant

**Mme Agathe MERCERON**
Professeure des Universités, Beuth University of Applied Sciences, Rapporteure

**M. Roger NKAMBOU**
Professeur titulaire, Université du Québec à Montréal, Rapporteur

**M. Sébastien GEORGE**
Professeur des Universités, Université du Maine, Membre

**M. Manuel LOPES**
Chargé de recherche, INRIA de Bordeaux, Membre

# RESUME

Les connaissances perceptivo-gestuelles sont difficiles à capter dans les Systèmes Tutoriels Intelligents. Elles sont multimodales et combinent des connaissances théoriques, des connaissances perceptuelles et gestuelles. Leur enregistrement dans les Systèmes Tutoriels Intelligents implique l'utilisation de plusieurs capteurs couvrant les différentes modalités des interactions qui les sous-tendent. Les « traces » de ces interactions – aussi désignées sous le terme « traces d'activité » – constituent la matière première pour la production de services tutoriels prenant en compte les différentes facettes des connaissances mises en jeu par l'apprenant.

Les analyses de l'apprentissage et les services tutoriels privilégiant une facette de ces connaissances au détriment des autres, sont incomplets. Cependant, en raison de la diversité des périphériques, les traces d'activité enregistrées sont hétérogènes et, de ce fait, difficiles à modéliser et à traiter. Ce projet doctoral adresse la problématique de la production de services tutoriels adaptés aux connaissances perceptivo-gestuelles, plus précisément, aux connaissances perceptivo-gestuelles dans les domaines mal-définis.

Les chapitres 2 et 3 du document présentent une revue de la littérature relative à cette catégorie de domaines ainsi qu'aux connaissances multimodales. Le cas d'étude de la thèse est le Système Tutoriel Intelligent TELEOS, un simulateur dédié à la chirurgie orthopédique percutanée. Les chapitres 4 et 5 leur sont consacrés.

La problématique présentée dans le cadre de cette recherche a été explorée sous trois axes : (1) la formalisation des séquences d'interactions perceptivo-gestuelles ; (2) le développement d'outils capables d'implémenter le modèle conceptuel de leur représentation ; (3) le développement d'algorithmes favorisant l'analyse de ces séquences d'un point de vue didactique. Les propositions formulées sur la base de ces trois axes sont détaillées dans les chapitres 6, 7 et 8 du document. Les expérimentations conduites autour de ces propositions, sont décrites dans les chapitres 9 et 10.

**MOTS-CLES :** Systèmes Tutoriels Intelligents ; Intelligence Artificielle ; Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain ; Modélisation de connaissances ; Connaissances perceptivo-gestuelles ; Datamining ; Datamining éducationnel

# ABSTRACT

Perceptual-gestural knowledge is multimodal: it combines theoretical, perceptual and gestural knowledge. It is difficult to be captured in Intelligent Tutoring Systems. In fact, its capture in such systems involves the use of multiple devices or sensors covering all the modalities of underlying interactions. The "traces" of these interactions -also referred to as "activity traces"- are the raw material for the production of key tutoring services that consider their multimodal nature.

Methods for "learning analytics" and production of "tutoring services" that favor one or another facet over others, are incomplete. However, the use of diverse devices generates heterogeneous activity traces. Those latter are hard to model and treat.

This doctoral project addresses the challenge related to the production of tutoring services that are congruent to this type of knowledge, specifically in the context of "ill-defined domains". The chapters 2 and 3 of the manuscript present a review of the literature on multimodal knowledge as well as ill-defined domains in the field of Intelligent Tutoring Systems development.

The research case study is the Intelligent Tutoring System TELEOS, a simulation platform dedicated to the domain of percutaneous orthopedic surgery. This domain is described in chapter 4 and the platform TELEOS in chapter 5 of the manuscript.

The contributions of this thesis are threefold: (1) the formalization of perceptual-gestural interactions sequences; (2) the implementation of tools for reifying the proposed conceptual model; (3) the conception and implementation of algorithmic tools fostering the analysis of these sequences from a didactic point of view. The proposals put forward on these three axes are detailed in chapters 6, 7 and 8 of the document. The experiment conducted upon them are presented in chapters 9 and 10.

**KEYWORDS :** Intelligent Tutoring Systems ; Artificial Intelligence ; Technology-Enhanced Learning ; Knowledge modeling ; Perceptual-gestural knowledge ; Data mining ; Educational data mining.

*A ma mère, ma femme et ma fille*

# REMERCIEMENTS

S'il ne fallait retenir qu'une chose de cette aventure, c'est qu'un doctorat est une histoire de rencontres. Rencontre tout d'abord avec soi-même car cet exercice académique nous emmène souvent, au-delà de l'intellect, aux frontières de nos capacités mentales et physiques. Pour oser une comparaison, un projet doctoral s'apparente à une course de fond parsemée de sprints. Pour parvenir à la ligne d'arrivée, le concours de certaines personnes est indispensable. J'ai eu le bonheur d'être accompagné par les miens mais aussi la chance et l'honneur de rencontrer de ces personnes qu'on peut qualifier d'extraordinaires. Cette partie du manuscrit leur est spécialement dédiée.

Je formule mes premiers remerciements et toute ma reconnaissance à Pr Vanda Luengo. Grâce à elle, cette expérience a été une aventure humaine et professionnelle des plus enrichissantes et des plus fructueuses. Je la remercie pour les encouragements, les moments d'écoute, sa disponibilité, sa confiance et son ouverture d'esprit inconditionnelle. Je la remercie pour toutes les relectures, les corrections, suggestions et guidage de mon travail tout au long de ces trois années. Je la remercie aussi pour les conseils qui, au-delà de cette thèse, visaient à me donner les bases indispensables à la naissance d'une carrière de chercheur. Je la remercie encore tout spécialement pour son implication dans la mise en place de mes projets d'après-thèse.

Mes remerciements vont ensuite au staff de l'Ecole Supérieure d'Infotronique d'Haïti, spécialement au Directeur Général, M. Patrick Attié, pour sa confiance, son support et son soutien de longue date. Je remercie aussi Pr Evens Emmanuel, co-encadrant de cette thèse, pour son accompagnement sur les aspects méthodologiques de mes travaux. Je tiens aussi à le remercier pour son soutien et ses conseils dans la mise en place de mes futurs projets de recherche.

Je remercie aussi l'Agence Universitaire de la Francophonie pour le financement des 30 premiers mois de cette thèse. Dans le même registre, je remercie l'ESIH pour le complément de bourse accordé pour la 2e et la 3e année de ma thèse et la bourse qui a assuré la poursuite de mes travaux sur les 6 mois suivant la 3e année. Merci aussi, encore une fois, à Vanda Luengo, qui a su toujours trouver les financements complémentaires et indispensables à la conduite de cette thèse dans les meilleures conditions.

Ma reconnaissance va aussi à l'Université Joseph Fourier, le Laboratoire d'Informatique de Grenoble et en particulier les membres de l'équipe MeTAH. Merci de m'avoir accepté parmi vous. Merci pour les échanges et conseils autour d'un café, d'un thé et autour des repas de midi à notre chère cafèt'. Je pense particulièrement aux collègues et amis doctorants, spécialement à Reinaldo Saavedra., Patrick Wang, Catherine Bonnat, Sébastien Lallé, Sébastien Jolivet, Nathalie Brasset. Merci d'avoir été de cette aventure !

Nadine Mandran, Anne Lejeune, merci pour ces précieux échanges, votre écoute, vos conseils… votre amitié ! Claire Wajeman, un spécial et amical merci à toi aussi ! Merci à Elena Elias, Francis Jambon, Michael Ortega ! Merci à Dr Jérôme Tonetti ! Un grand « Merci » à tous ceux qui, au niveau professionnel, ont contribué directement ou indirectement, par leur simple présence ou leur implication, à faire de cette thèse une réussite !

Enfin, un tendre, affectueux, profond et spécial MERCI à ma femme, Anne-Laure, pour avoir supporté les longues absences, pour avoir été là dans les moments de préoccupation et de doute, pour avoir supporté les bas et partagé les hauts ! Un tendre, affectueux, profond et spécial MERCI à ma fille : mon oasis et mon havre de paix ! Tu as illuminé mes journées dans les moments les plus difficiles de ce long projet. Un tendre, affectueux, profond et spécial MERCI à ma mère pour son support inconditionnel, sa présence en dépit de la distance et sa confiance toute maternelle. A ces femmes de ma vie, cette thèse est entièrement dédiée !

Je tiens aussi à adresser un spécial merci à Jacques et Sylvie Duffieux, mes beaux-parents, pour avoir généreusement contribué à l'organisation de ma soutenance.

# TABLES DES MATIERES

Résumé ..... 2
Abstract ..... 3
Remerciements ..... 5
Tables des Matières ..... 7
Liste des Figures ..... 12
Liste des Tableaux ..... 14
**INTRODUCTION ..... 16**
Chapitre 1. ..... 18
Introduction ..... 18
**1.1. Concepts-clés ..... 19**
1.1.1. Systèmes Tutoriels Intelligents ..... 19
1.1.2. Connaissances perceptivo-gestuelles ..... 19
1.1.3. Domaines mal-définis ..... 20
1.1.4. Fouille de données éducationnelles ..... 20
**1.2. Contexte général ..... 21**
1.2.1. Cas d'étude de la thèse ..... 21
1.2.2. Verrous scientifiques et techniques ..... 21
1.2.3. Problématique ..... 21
**1.3. Méthodologie de la recherche ..... 22**
1.3.1. Hypothèses et Questions de Recherche ..... 22
1.3.2. Stratégie de recherche ..... 23
**1.4. Organisation du Manuscrit ..... 24**
**PARTIE 1 ..... 28**
**ETAT DE L'ART ..... 28**
Chapitre 2. ..... 30
Acquisition et Modélisation des Connaissances dans les Systèmes Tutoriels Intelligents ..... 30
**2.1. Les Système Tutoriels Intelligents ..... 31**
2.1.1. Introduction ..... 31
2.1.2. Le module de communication ..... 32
2.1.3. Le module « modèle de l'apprenant » ..... 32
2.1.4. Le module « modèle du domaine » ..... 33
2.1.5. Le module « modèle pédagogique » ..... 33
2.1.6. Positionnement ..... 34
**2.2. Traitement des Perceptions ..... 35**
2.2.1. Perceptions, cognition et métacognition ..... 35
2.2.2. Perceptions et émotions ..... 36
2.2.3. Perceptions et gestes ..... 37
2.2.4. Connaissances perceptivo-gestuelles ..... 38
2.2.5. Positionnement ..... 39
**2.3. Acquisition des Connaissances ..... 39**
2.3.1. Acquisition des connaissances par l'analyse cognitive de tâches ..... 39
2.3.2. Acquisition automatique des connaissances ..... 40
2.3.3. Fouille de données éducationnelles ..... 41
2.3.4. Positionnement ..... 42
**2.4. Modélisation des Connaissances du Domaine et de l'Apprenant ..... 42**
2.4.1. Traçage de modèle ..... 42

2.4.2. Modélisation orientée contraintes ..... 44
2.4.3. Modélisation orientée contrôles ..... 45
2.4.4. Diagnostic des connaissances de l'apprenant ..... 45
2.4.5. Positionnement ..... 47
**2.5. Résumé et Conclusion ..... 47**
Chapitre 3. ..... 50
Systèmes Tutoriels Intelligents et Domaines Mal-Définis ..... 50
**3.1. Limites des Paradigmes Classiques ..... 51**
3.1.1. Limites du traçage de modèle ..... 51
3.1.2. Limites des modélisations par contraintes et par contrôles ..... 51
**3.2. Les Paradigmes Adaptés ..... 52**
3.2.1. Fournir une structure aux domaines mal-définis ..... 52
3.2.2. L'approche hybride : Fournier-Vigier *et al.* ..... 53
3.2.3. Discussion et positionnement ..... 54
**3.3. Conclusion ..... 54**
**PARTIE 2 ..... 56**
**CAS D'ETUDE ..... 56**
Chapitre 4. ..... 58
Le Domaine de la Chirurgie Orthopédique Percutanée et le Système Tutoriel Intelligent TELEOS ..... 58
**4.1. La Chirurgie Orthopédique Percutanée ..... 59**
4.1.1 L'enseignement du domaine ..... 59
4.1.2 Le caractère perceptivo-gestuel des connaissances ..... 60
4.1.3 Le caractère mal-défini du domaine ..... 61
**4.2. Le Système Tutoriel Intelligent TELEOS ..... 62**
4.2.1 Architecture et fonctionnement ..... 63
4.2.2 Représentation des connaissances ..... 64
4.2.3 Diagnostic des connaissances ..... 65
4.2.4 Rétroactions épistémiques ..... 67
**4.3. Discussion et Conclusion ..... 68**
Chapitre 5 ..... 70
La Nature des Traces d'Interaction du Simulateur TELEOS ..... 70
**5.1. Enregistrement de Traces d'Interaction sur TELEOS ..... 71**
**5.2. Les Actions Ponctuelles ..... 71**
**5.3. Les Gestes et Perceptions Haptiques ..... 73**
**5.4. Les Perceptions Visuelles ..... 74**
**5.5. Positionnement et Conclusion ..... 77**
**PARTIE 3 ..... 80**
**CONTRIBUTIONS ..... 80**
Chapitre 6. ..... 82
Formalisation des Séquences Perceptivo-Gestuelles ..... 82
**6.1. Introduction ..... 83**
**6.2. Motivation ..... 83**
**6.3. Jonction entre Actions, Gestes et Perceptions ..... 83**
6.3.1. Interaction perceptivo-gestuelle de type *« contrôle a priori »* ..... 84
6.3.2. Interaction perceptivo-gestuelle de type *« contrôle a posteriori »* ..... 84
6.3.3. Interaction perceptivo-gestuelle de type *« mixte »* ..... 84
6.3.4. Bilan ..... 84
**6.4. Différenciation des Perceptions ..... 84**
6.4.1. Les perceptions visuelles de contrôle ..... 85

6.4.2. Les perceptions visuelles d'exploration ... 85
6.4.3. Bilan ... 85
**6.5. Caractérisation de l'Etat de la Simulation ... 86**
**6.6. Représentation d'une Séquence Perceptivo-Gestuelle ... 86**
6.6.1. Items, itemsets et séquences ... 86
6.6.2. Prendre en compte les « interactions du système » ... 87
6.6.3. Formalisation des séquences perceptivo-gestuelles ... 87
**Synthèse ... 90**
Chapitre 7. ... 92
Présentation de PeTRA : Un Framework Dédié au Traitement de Traces Perceptivo-gestuelles ... 92
**7.1. Introduction ... 93**
**7.2. Préparation des Traces ... 94**
7.2.1. L'opérateur de nettoyage ... 94
7.2.2. L'opérateur de filtrage ... 94
**7.3. Transformation des Traces ... 95**
7.3.1. L'opérateur de fusion ... 95
7.3.2. L'opérateur de sémantisation ... 97
7.3.3. L'opérateur d'annotation ... 99
7.3.4. L'opérateur de répartition de phases ... 101
7.3.5. L'opérateur de codage/décodage ... 103
**7.4. Analyse des Séquences perceptivo-Gestuelles ... 103**
7.4.1. L'opérateur d'analyse du parcours de résolution ... 104
7.4.2. L'opérateur d'analyses statistiques ... 105
**7.5. Extraction de Connaissances Perceptivo-Gestuelles ... 105**
7.5.1. Les opérateurs d'extraction de patterns de connaissances ... 105
7.5.2. L'opérateur de sélection de patterns ... 108
**7.6. Limites du framework PeTRA ... 109**
7.6.1. Limites générales du framework ... 109
7.6.2. Limites des opérateurs ... 109
**7.7. Bilan et Conclusion ... 111**
**Synthèse ... 114**
Chapitre 8. ... 116
Présentation de PhARules : un Algorithme Dédié à l'Extraction de Règles Perceptivo-Gestuelles Orientées Phase ... 116
**8.1. Notions Préliminaires ... 117**
8.1.1. Patterns fréquents ... 117
8.1.2. Règles d'association ... 117
8.1.3. Patterns et règles perceptivo-gestuels ... 119
8.1.4. Applications ciblées des patterns et règles perceptivo-gestuels ... 119
**8.2. Hétérogénéité Interne des Données ... 120**
**8.3. Etat de l'Art des Propositions Adressant l'Hétérogénéité Interne des Données 121**
8.3.1. Hétérogénéité induite par la fréquence des items ... 121
8.3.2. Hétérogénéité induite par la description des items ... 123
8.3.3. Hétérogénéité induite par les liens entre les items ... 124
8.3.4. Positionnement ... 124
**8.4. Caractérisation des Phases de Résolution ... 125**
**8.5. Extraction de Règles Séquentielles Orientées Phases avec PhARules ... 127**
8.5.1. L'algorithme CMRules ... 127
8.5.2. L'algorithme PhARules ... 128
8.5.3. Complexité computationnelle ... 132

8.5.4. Bilan ..... 134
**8.6. Conclusion ..... 134**
**Synthèse ..... 135**
**PARTIE 4 ..... 136**
**EXPERIMENTATIONS ..... 136**
Chapitre 9. ..... 138
Expérimentations ..... 138
**9.1. Introduction générale ..... 139**
**9.2. Evaluation du Modèle de Représentation des Séquences Perceptivo-Gestuelles 139**
9.2.1. Introduction ..... 139
9.2.2. Méthodologie ..... 140
9.2.3. Résultats ..... 142
9.2.4. Bilan ..... 144
**9.3. Exploration d'une Extension du Modèle par la Détection Automatique du Parcours de Résolution de l'Apprenant ..... 144**
9.3.1. Introduction ..... 144
9.3.2. Méthodologie ..... 145
9.3.3. Expérimentation ..... 149
9.3.4. Bilan ..... 153
**9.4. Evaluation de l'Extraction de Règles Orientées Phases de Résolution ..... 153**
9.4.1. Introduction ..... 153
9.4.2. Mise en place de l'expérimentation ..... 154
9.4.3. Partie 1 : Evaluation des performances computationnelles de PhARules ..... 154
9.4.4. Partie 2 : Evaluation de la pertinence des règles extraites ..... 159
**9.5. Généricité du Modèle de Représentation et du Framework de Traitements ..... 167**
**9.6. Conclusion et Perspectives ..... 167**
**Synthèse des Expérimentations ..... 168**
Chapitre 10. ..... 170
Généricité du Modèle de Représentation et du Framework de Traitement de Traces ..... 170
**10.1. Introduction ..... 171**
**10.2. Le Domaine d'Application : l'Aviation ..... 171**
10.2.1. L'enseignement dans le domaine ..... 171
10.2.2. Le caractère multimodal des connaissances du domaine ..... 172
**10.3. Le Simulateur PILOTE 2 ..... 173**
10.3.1. L'environnement de simulation ..... 173
10.3.2. Architecture du système ..... 175
10.3.3. Description des traces ..... 175
**10.4. Intégration de Services Tutoriels dans le Simulateur PILOTE 2 ..... 177**
10.4.1. Exercice de référence pour les simulations de pilotage ..... 177
10.4.2. Compétences ciblées dans le cadre de l'expérimentation ..... 178
10.4.3. Création des variables de situation ..... 178
**10.5. Evaluations ..... 180**
10.5.1. Introduction ..... 180
10.5.2. Collecte des données ..... 180
10.5.3. Traitement des traces de simulations de vol ..... 181
10.5.4. Discussion ..... 183
**10.6. Conclusion ..... 186**
**Synthèse ..... 186**
**CONCLUSION ..... 188**

Chapitre 11. ..... 190
Conclusions et Perspectives ..... 190
**11.1. Survol de la thèse ..... 191**
**11.2. Contributions ..... 191**
11.2.1. Un modèle de représentation des séquences perceptivo-gestuelles ..... 192
11.2.2. Le framework PeTRA ..... 192
11.2.3. L'algorithme PhARules ..... 193
11.2.4. Preuve de concept de la généricité des contributions de la thèse ..... 194
11.2.5. Publications ..... 195
**11.3. Limites et Perspectives ..... 195**
11.3.1. Extension des expérimentations ..... 196
11.3.2. Production de services tutoriels épistémiques ..... 196
11.3.3. Formalisation de la validation des données produites ..... 197
11.3.4. Amélioration des performances de l'algorithme PhARules ..... 198
Références ..... 200
**ANNEXES ..... 214**
Annexe A. Glossaire ..... 216
Annexe B. Acronymes ..... 218
Annexe C. Questionnaire d'évaluation des règles extraites par PhARules ..... 220

# LISTE DES FIGURES

**Figure 1.1.** Les grandes lignes de la stratégie de recherche adoptée, structurée par axe (catégorie d'activité) et par phase (évolution du travail) ..... 23
**Figure 2.1.** Architecture générale d'un Système Tutoriel Intelligent (adaptée de Nwana, 1990]) ..... 32
**Figure 4.1.** Vue « point d'entrée » (radiographie de face) et vue « progression » (radiographie de profil) du trocart. ..... 60
**Figure 4.2.** Exemples de trajectoires d'insertion du trocart (la 1e et la 2e image illustrent une approche transpédiculaire oblique et la 3e, une approche inter-costo-vertébrale) ..... 62
**Figure 4.3.** Méthodologie de mise en place de la plateforme ..... 62
**Figure 4.4.** Interface du simulateur VS Environnement réel de travail ..... 63
**Figure 4.5.** Architecture du simulateur TELEOS ..... 64
**Figure 4.6.** Structure du réseau bayésien utilisé pour le diagnostic des connaissances mises en jeu au cours d'une simulation sur TELEOS ..... 66
**Figure 5.1.** Radiographies de face d'après deux inclinaisons différentes du fluoroscope ..... 72
**Figure 5.2.** Fragement d'un fichier de traces d'interactions enregistrées à partir de l'interface du simulateur ..... 73
**Figure 5.3.** *(i), (ii)* Instrumentations pour le recueil des données gestuelles et haptiques relatives à la manipulation du trocart. *(iii)* Bras haptique et dispositif matériel dans l'environnement de simulation. ..... 74
**Figure 5.4.** Fragement d'un fichier de traces enregistrées par le bras haptique ..... 74
**Figure 5.5.** L'interface du simulateur TELEOS ..... 75
**Figure 5.6** Identification et annotation des points d'intérêt des vertèbres ..... 75
**Figure 5.7.** Codes des zones et points d'intérêt enregistrés au cours des simulations de vertébroplastie ..... 76
**Figure 5.8.** Points et zones d'intérêt de l'interface et parcours visuel de l'apprenant ..... 76
**Figure 5.9.** Fragments de fichiers de traces enregistrées par l'oculomètre. ..... 77
**Figure 5.10.** La verbosité des traces multi-sources de TELEOS ..... 78
**Figure 6.1.** Représentation d'une séquence perceptivo-gestuelle ..... 88
**Figure 6.2.** Représentation d'une séquence perceptivo-gestuelle enrichie ..... 89
**Figure 7.1.** Schéma du framework PeTRA ..... 93
**Figure 7.2.** Schéma de l'opération de fusion ..... 96
**Figure 7.3.** Qualificatifs d'orientation et de mouvement dans le système de référence en anatomie ..... 98
**Figure 7.4.** Schéma du processus d'annotation des séquences issues de TELEOS ..... 100
**Figure 7.5.** Processus de traitement avec un exemple réel de traces provenant de TELEOS ..... 107
**Figure 8.1**. Méthodologie d'extractions de patterns d'interactions et applications ..... 120
**Figure 8.1.** L'algortihme CMRules ([Fournier-Vigier, 2010], p. 131) ..... 127
**Figure 8.3.** Répartition des phases par la fonction *phaseDispatcher().* Scénario 1. ..... 131
**Figure 8.4.** Répartition des phases par la fonction *phaseDispatcher().* Scénario 2. ..... 132
**Figure 9.1.** Les opérateurs de PeTRA appliquées sur les traces pour l'analyse du comportement de l'apprenant à travers son parcours de résolution d'un exercice de simulation de vertébroplastie. ..... 141
**Figure 9.2.** Histogramme des variables de situation incorrectes, visualisations et erreurs de validation ..... 143

**Figure 9.3.** Histogramme des séquences liées à une correction et des visualisations accompagnant ces séquences ..... 143
**Figure 9.4.** Histogramme des visualisations de contrôle et d'exploration ..... 144
**Figure 9.5.** Validation de l'affichage d'une vertèbre ..... 146
**Figure 9.6.** Résultats de la similarité cosinus pour les paires de séquences contigues d'une session de vertébroplastie..... 148
**Figure 9.7.** Superposition des résultats de similarité et des intervalles temporels des paires de séquences contiguës d'une session de simulation de vertébroplastie. ..... 149
**Figure 9.8.** Les opérateurs impliqués dans l'expérimentation sur l'évaluation des performances computationnelles de PhARules ..... 155
**Figure 9.9.** Résultats de l'évaluation comparative de PhARules et CMRules pour (a) la consommation mémoire ; (b) le temps d'exécution et (c) le nombre de règles extraites ..... 156
**Figure 9.10.** Exemples de règles extraites par PhARules..... 157
**Figure 9.11.** Règles séquentielles extraites par PhARules pour chaque phase d'une session de simulation pour différents supports minimums..... 158
**Figure 9.12.** Un exemple de règle perceptivo-gestuelle extraite par PhARules ..... 159
**Figure 9.13.** Scores moyens attribués aux règles perceptivo-gestuelles par les experts ..... 161
**Figure 9.15.** Classement des règles par score moyen global (a) tous évaluateurs et toutes variables confondus et (b) tous évaluateurs et toutes variables confondus hormis la variable « originalité ». ..... 163
**Figure 9.16.** Les trois règles les mieux classées par les experts chirurgiens toutes variables confondues..... 165
**Figure 9.17.** Les trois règles les moins bien classées par les experts chirurgiens toutes variables confondues..... 166
**Figure 10.1.** Décollage d'avion : concepts théoriques VS procédure ..... 172
**Figure 10.2.** L'environnement de simulation de la plateforme PILOTE 2 ..... 173
**Figure 10.3.** Monitoring des visualisations du pilote en temps réel ..... 174
**Figure 10.4.** Architecture de la plateforme de simulation PILOTE 2 ..... 175
**Figure 10.5.** Représentation conceptuelle d'un message sur le bus de données de PILOTE 2 .. 176
**Figure 10.6.** Exemples de traces brutes envoyées par l'interface de simulation de PILOTE 2 .. 176
**Figure 10.7.** Exemple de traces brutes envoyées par l'oculomètre..... 176
**Figure 10.8.** L'exercice du tour de piste en aviation ..... 177
**Figure 10.7.** Traces générées par l'analyseur des variables de situation sur PILOTE 2 ..... 181
**Figure 10.9.** Exemples de séquences perceptivo-gestuelles enrichies générées à partir des traces de simulation de vol. ..... 182
**Figure 10.10.** Exemples de règles perceptivo-gestuelles extraites à partir des séquences de simulation de vol. ..... 183
**Figure 10.11.** Les opérateurs de PeTRA impliqués dans le traitement des séquences de simulation de vol. ..... 184

# LISTE DES TABLEAUX

**Tableau 4.1.** Exemples d'éléments de connaissances formalisés selon le modèle CK¢ ..... 65
**Tableau 5.1.** Actions ponctuelles enregistrées à partir de l'interface de simulation ..... 71
**Tableau 7.1.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur de nettoyage dans le framework PeTRA . 94
**Tableau 7.2.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur de filtrage dans le framework PeTRA ..... 95
**Tableau 7.3.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur de fusion dans le framework PeTRA ..... 96
**Tableau 7.4.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur de sémantisation du framework PeTRA . 97
**Tableau 7.5.** Sémantisation des coordonnées des outils ..... 99
**Tableau 7.6.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur d'annotation dans le framework PeTRA ..... 101
**Tableau 7.7.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur de répartition de phase du framework PeTRA ..... 102
**Tableau 7.8.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur de codage/décodage dans le framework PeTRA ..... 103
**Tableau 7.9.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur d'analyse de parcours de résolution du framework PeTRA ..... 104
**Tableau 7.10.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur d'analyses statistiques du framework PeTRA ..... 105
**Tableau 7.11.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur d'extraction de patterns du framework PeTRA ..... 106
**Tableau 7.12.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur de sélection de patterns du framework PeTRA ..... 109
**Tableau 7.13.** Présentation récapitulative des fiches de fonctionnement des opérateurs du framework PeTRA ..... 113
**Tableau 8.1.** Interactions observables sur la plateforme TELEOS, leurs périphériques source et les phases dans lesquelles elles sont réalisées. ..... 128
**Tableau 9.1.** Traces collectées et traitées ..... 142
**Table 9.2.** Distribution des paires de séquences identifiées automatiquement ..... 151
**Tableau 9.3.** Faux négatifs et faux positifs des détections automatiques d'interactions ..... 152
**Tableau 9.4.** Précision, rappel et F-score des détections automatiques d'interactions ..... 153
**Tableau 9.5.** Caractéristiques des données collectées ..... 155
**Tableau 9.6.** Coefficients de corrélation entre chacune des 5 variables étudiées et le score global moyen des règles ..... 163
**Tableau 9.7.** Classements des règles en deux catégories relativement au score global moyen 164
**Tableau 10.1.** Variables de situation du simulateur pilote selon les phases de vol ..... 179

# INTRODUCTION

# CHAPITRE 1.
# INTRODUCTION

*Ce chapitre introduit le travail de recherche conduit dans le cadre de cette thèse. Il commence par une définition des concepts-clés situant le champ du travail de recherche. Ensuite, il présente le contexte général de la thèse en en précisant le cas d'étude, les verrous y afférents et la problématique centrale. Cette section est suivie d'une description de la méthodologie de recherche puis d'un résumé des contributions de la thèse. Enfin, la dernière section décrit l'organisation du document.*

Chapitre 1. ..... 18
Introduction ..... 18
**1.1. Concepts-clés ..... 19**
1.1.1. Systèmes Tutoriels Intelligents ..... 19
1.1.2. Connaissances perceptivo-gestuelles ..... 19
1.1.3. Domaines mal-définis ..... 20
1.1.4. Fouille de données éducationnelles ..... 20
**1.2. Contexte général ..... 21**
1.2.1. Cas d'étude de la thèse ..... 21
1.2.2. Verrous scientifiques et techniques ..... 21
1.2.3. Problématique ..... 21
**1.3. Méthodologie de la recherche ..... 22**
1.3.1. Hypothèses et Questions de Recherche ..... 22
1.3.2. Stratégie de recherche ..... 23
**1.4. Organisation du Manuscrit ..... 24**

## 1.1. CONCEPTS-CLES

Cette thèse adresse la problématique de la capture, la représentation et l'analyse des connaissances perceptivo-gestuelles dans les Systèmes Tutoriels Intelligents dédiés aux domaines mal-définis. Cette problématique se pose tant au niveau conceptuel que technique. Au niveau conceptuel, le défi est de proposer des modèles de représentation, de traitements et d'exploitation de ces connaissances dans le respect de leur nature multimodale. Au niveau technique, la problématique se focalise sur la création d'outils capables d'implémenter et d'exploiter ces modèles. Avant de présenter plus en détail le contexte de la recherche conduite en ce sens, nous résumons dans cette section, les concepts-clés autours desquels ce travail gravite.

### 1.1.1. Systèmes Tutoriels Intelligents

Les Systèmes Tutoriels Intelligents (ou STI) sont des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain qui intègrent des paradigmes de l'intelligence artificielle leur permettant d'offrir des services tutoriels adaptatifs à l'apprenant [Nwana, 1990 ; Benyon & Murray, 1993 ; Brusilovskiy, 1994].

Les services tutoriels désignent les fonctionnalités du système émulant les activités d'enseignement d'un tuteur humain. Cela inclut :

- la communication du contenu pédagogique à l'apprenant via une interface,
- le diagnostic et l'évaluation des connaissances,
- les rétroactions telles que les aides, les conseils et les suggestions,
- et le guidage didactique et pédagogique servant à garantir la progression de l'apprentissage.

La dimension d'adaptation se conçoit par la personnalisation du contenu pédagogique et didactique de ces services relativement au profil de l'apprenant, son niveau de connaissances ou son niveau de progression dans le processus d'apprentissage.

### 1.1.2. Connaissances perceptivo-gestuelles

Les connaissances perceptivo-gestuelles sont des connaissances multimodales combinant des connaissances déclaratives, perceptuelles et gestuelles.

Les connaissances déclaratives font référence aux connaissances théoriques d'un domaine pouvant être transmises de manière magistrale à l'apprenant.

Les connaissances perceptuelles désignent des connaissances faisant intervenir les perceptions de manière active. Celles-ci jouent un rôle, non seulement de prise d'information, mais aussi d'interprétation de cette information en relation avec les connaissances déclaratives connexes.

Les connaissances gestuelles font référence aux habiletés motrices nécessaires à la réalisation d'une tâche impliquant éventuellement la manipulation d'un outil.

La combinaison de ces trois modalités constitue les connaissances perceptivo-gestuelles. Elles sont empiriques et souvent tacites car très difficiles à formuler ou à expliciter exclusivement de manière déclarative [Luengo *et al.* 2004]. Elles s'acquièrent par la pratique en milieu d'application réel ou en environnement simulé.

Tout au long du document, nous faisons mention d'interactions perceptivo-gestuelles en référence à l'activité de l'apprenant impliquant des actions, des gestes et des perceptions. Le terme

« interactions » fait donc référence à l'activité de l'apprenant sur le STI, chaque unité d'interaction étant d'une modalité perceptuelle ou gestuelle. Une distinction est aussi faite entre action et geste en ce sens qu'une action est considérée comme une interaction ponctuelle effectuée sur l'interface de simulation et un geste faisant référence à une interaction faisant intervenir une habileté motrice. Il s'agit par exemple, dans notre cas d'étude, de la reproduction du geste d'insertion de l'outil chirurgical reproduit avec le bras haptique de la plateforme de simulation. Nous reviendrons là-dessus plus loin dans le chapitre.

### 1.1.3. Domaines mal-définis

Voss et Post (1988) rapportent diverses définitions des concepts de domaines et de problèmes mal-définis ou mal-structurés. Dans cette recherche, nous nous concentrerons sur la définition proposée par Lynch *et al.* (2006) pour qualifier les domaines pour lesquels les approches traditionnelles de conception de Systèmes Tutoriels Intelligents ne sont pas applicables ou peu adaptés.

Un domaine ou un problème mal-défini satisfait une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- ***Solutions possibles multiples et controversables :*** *il s'agit ici des domaines intégrant beaucoup de solutions potentiellement réfutables et aucune procédure définie pour les évaluer. La plaidoirie du point de vue de l'argumentation légale en est un exemple.*
- ***Absence de domaine théorique formel et complet :*** *domaines dont aucun bagage théorique clair et complet permet de déterminer les solutions aux problèmes et d'en tester la validité. La composition artistique, par exemple, n'implique pas de théories finies et fermées.*
- ***Structure de tâches mal-définie :*** *domaines faisant appel à des habiletés de création (composition textuelle, composition musicale) et analytiques (diagnostic médical). Ces domaines sont mal-définis quoique des règles et principes généraux puissent en déterminer une ligne conductrice.*
- ***Domaine aux concepts poreux :*** *les concepts à texture ouverte sont abstraits, partiellement définis ou sans définition absolue, ce qui rend leur application difficile en situations concrètes. Les ambigüités inhérentes au langage naturel placent les domaines y afférents dans cette catégorie.*
- ***Chevauchement de sous-problèmes :*** *il s'agit de tous les domaines dont les problèmes complexes ne peuvent être décomposés en sous-problèmes indépendants plus faciles à résoudre. La construction en est un exemple : le choix d'un terrain et la conception d'un plan sont deux tâches du domaine qui ne peuvent être exécutées séparément sans compromettre le succès de la tâche globale.*

### 1.1.4. Fouille de données éducationnelles

La problématique de modélisation des domaines mal-définis quant à la difficulté d'expliciter les connaissances de manière déclarative, requiert l'utilisation de paradigmes d'acquisition automatique des connaissances. Les techniques d'apprentissage automatique proposées par le domaine de l'intelligence artificielle en général et les techniques de fouille de données (Data Mining) en particulier offrent d'excellentes pistes d'exploration de solutions adaptées à cette problématique.

La fouille de données éducationnelles constitue le corps de recherche qui consiste à adapter les paradigmes du Data Mining aux données éducationnelles, principalement les traces d'activité

générées par l'utilisation d'Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain tels que les Systèmes Tutoriels Intelligents, les MOOCS et autres plateformes d'apprentissage virtuelles.

## 1.2. CONTEXTE GENERAL

### 1.2.1. Cas d'étude de la thèse

Le cas d'étude de la thèse est le domaine de la chirurgie orthopédique percutanée, spécifiquement la vertébroplastie. Cette dernière est une opération chirurgicale mini-invasive réalisée pour traiter les fractures des vertèbres par l'injection d'un ciment médical dans les vertèbres affectées grâce à un outil d'insertion. Cette opération est dite mini-invasive car effectuée à travers la peau du patient contrairement aux opérations classiques nécessitant une ouverture.

Les expérimentations conduites exploitent le Système Tutoriel Intelligent TELEOS *(Technology Enhanced Learning Environment for Orthopaedic Surgery)*. Il s'agit d'un Système Tutoriel basé sur la simulation, dédié à la chirurgie orthopédique percutanée. [Luengo *et al.* 2004 ; Luengo *et al.* 2006]. Ce domaine est mal-défini et implique la mise en jeu de connaissances perceptivo-gestuelles.

### 1.2.2. Verrous scientifiques et techniques

TELEOS intègre, en plus d'un logiciel de simulation, un bras haptique qui enregistre la reproduction des gestes de l'apprenant et un oculomètre traçant les points fixés par l'apprenant tout au long d'une intervention. Ces outils permettent de couvrir les interactions perceptivo-gestuelles de l'apprenant sous-tendant les connaissances ciblées par les services tutoriels du STI. La diversité de ces sources génère des traces hétérogènes difficiles à traiter.

Le principal verrou scientifique à soulever se réfère à la représentation des interactions sous forme de séquences reconstituant de manière cohérente leurs différentes facettes perceptuelles et gestuelles.

Au niveau informatique, le verrou à soulever est la création d'outils de traitements capables d'une part de prendre en charge la transformation des traces multi-sources hétérogènes en séquences respectant le modèle de représentation adéquat, et d'autre part, de permettre l'exploitation de ces séquences à des fins didactiques.

### 1.2.3. Problématique

La problématique centrale de ce travail de recherche est traduite par la question suivante : ***« Comment structurer la représentation et l'exploitation de traces multi-sources et hétérogènes sous-tendant des connaissances perceptivo-gestuelles pour la production de services tutoriels dans un STI dédié à un domaine mal-défini ? »***.

Comme annoncé dans la section précédente, cette question implique une double analyse conceptuelle et computationnelle. Il convient à la fois d'analyser le paradigme approprié à la modélisation des connaissances ciblées et les outils informatiques capables d'implémenter le modèle dans un premier temps et en permettre l'exploitation par la suite pour la production de services tutoriels reflétant les caractéristiques multimodales des connaissances.

Quel paradigme de modélisation permet de cerner les contraintes posées par des connaissances perceptivo-gestuelles se rapportant à un domaine mal-défini ? Quels outils informatiques permettent de structurer leur traitement ?

La réponse à ces questions requiert une analyse fine des traces d'activités générées par le STI de notre cas d'étude. Les principaux défis à relever se résument dans les grands points suivants :

- fusionner de manière cohérente des traces d'activité hétérogènes
- dégager les connaissances pertinentes (écarter les bruits) d'un ensemble de traces brutes
- distinguer les erreurs des bonnes pratiques à partir de ces traces
- extraire des patterns de connaissances pertinents à partir de ces traces

## 1.3. METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

### 1.3.1. Hypothèses et Questions de Recherche

**H1 :** L'intégration des interactions multimodales de l'apprenant dans des séquences perceptivo-gestuelles améliore la précision de l'analyse de ses activités dans un contexte d'apprentissage.

> **QR1 :** *La représentation multimodale des interactions de l'apprenant est-elle pertinente d'un point de vue de l'analyse de l'activité d'apprentissage ?*
>
> **QR2 :** *Quelle est la cohérence entre les actions/gestes de l'apprenant et ses perceptions ?*

**H2 :** L'implémentation du modèle de représentation avec les outils informatiques proposés permet de structurer le traitement et l'analyse de l'activité de l'apprenant en adéquation avec la nature perceptivo-gestuelle de ses connaissances

> **QR3 :** *Les outils proposés permettent-ils d'implémenter le modèle proposé ?*
>
> **QR4 :** *Les outils proposés, permettent-ils de modéliser l'activité de l'apprenant en intégrant les différentes facettes de ses interactions ?*

**H3 :** La prise en compte de l'hétérogénéité interne des traces par les algorithmes au d'extraction de patterns fréquents, permet de mieux cerner l'activité de l'apprenant dans un contexte d'apprentissage.

> **QR5 :** *Les outils algorithmiques proposés pour l'extraction de patterns avec différenciation des phases obtiennent-ils des résultats plus précis que des algorithmes ne prenant pas en compte cette différentiation ?*
>
> **QR6 :** *Les résultats produits par les outils algorithmiques proposés, sont-ils intéressants et pertinents du point de vue des experts du domaine.*

**H4 :** Les contributions de cette recherche sont applicables à des domaines et environnements d'apprentissage autres que le cas d'étude autour duquel elles ont été développées.

> **QR7 :** *Quelle est la généricité du modèle de représentation, du framework et de l'algorithme proposés ?*

## 1.3.2. Stratégie de recherche

La stratégie de recherche adoptée tout au long de cette thèse se résume en une navigation entre trois axes : Théorie, Exploration et Implémentation. Cette approche s'inspire de la stratégie de triangulation de Mackay & Fayard (1997).

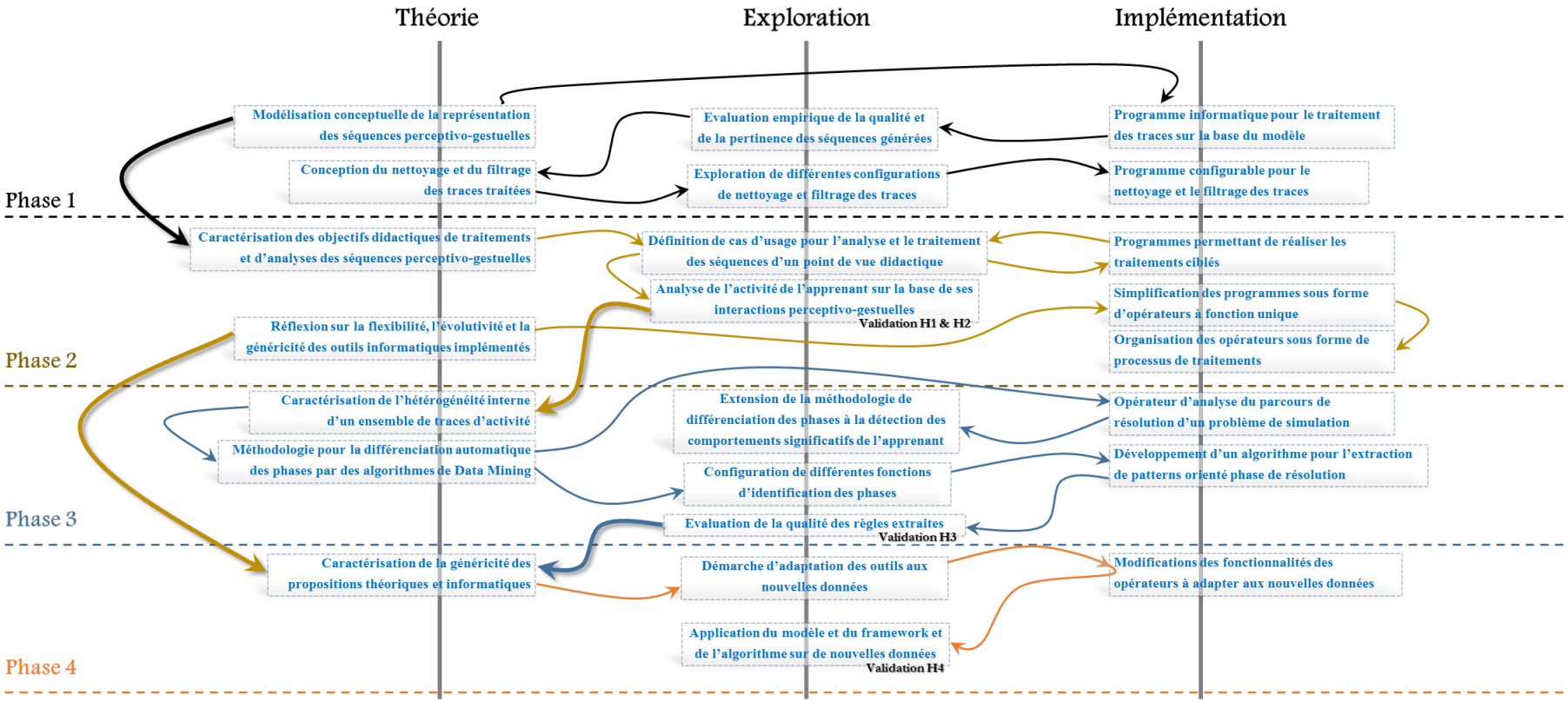



**Figure 1.1.** Les grandes lignes de la stratégie de recherche adoptée, structurée par axe (catégorie d'activité) et par phase (évolution du travail)

Sur la figure 1.1, les flèches noires représentent le flux des activités au cours de la phase 1 de cette thèse, les flèches or, le flux des activités de la phase 2 ; les flèches bleues, celui de la phase 3 et les flèches orange, celui de la phase 4. Les flèches plus épaisses marquent le passage d'une phase à une autre

Dans la phase 1, nous avons formalisé différentes conceptions des séquences d'interactions perceptivo-gestuelles. Nous avons développé des outils permettant d'appliquer les formalisations aux traces multi-sources et hétérogènes de notre cas d'études. A l'issue de l'exploration des implémentations, nous en avons sélectionné une sous l'hypothèse d'une représentation des séquences capable de couvrir toutes les facettes des interactions qui les composent.

Cette hypothèse est mise à l'épreuve dans la phase 2. Le modèle est évalué sous l'angle de la cohérence qu'il offre pour l'analyse de l'activité d'apprentissage à partir des séquences construites sur ses concepts. Dans la phase 2, l'objectif a été aussi d'implémenter des outils capables de construire des séquences perceptivo-gestuelles sur la base du modèle théorique proposé. L'objectif incluait aussi l'évaluation de la capacité des outils à favoriser l'analyse de l'activité d'apprentissage en adéquation avec la nature multimodale des séquences d'interactions de l'apprenant et des connaissances que celles-ci sous-tendent. Dans un souci de flexibilité, nous avons choisi de structurer les outils développés sous la forme d'un processus. L'ensemble des outils forme notre proposition de framework pour le traitement de traces perceptivo-gestuelles, PeTRA.

Dans la phase 3, l'objectif a été de réfléchir sur l'acquisition automatique des connaissances du domaine. Le domaine étant mal-défini et certaines des connaissances étant empiriques et souvent tacites, la piste privilégiée a été l'acquisition automatique des connaissances à partir des traces de simulation enregistrées. Les moyens envisagés étaient les techniques et outils algorithmiques existant en datamining. Au cours de cette phase, nous avons émis l'hypothèse de l'importance de l'hétérogénéité interne des données. Celle-ci est induite par les exercices dont la résolution est structurée autour de plusieurs phases distinctes. Nous avons exploré différentes méthodologies pour la prise en compte de cette intra-hétérogénéité des traces par les algorithmes de datamining. Cette réflexion a abouti à une proposition d'algorithme conçu pour la prise en charge de cette spécificité. Nous en avons évalué les performances computationnelles ainsi que la pertinence de ses résultats.

Dans la phase 4 de nos recherches, nous avons voulu mettre à l'épreuve nos propositions en les confrontant à de nouvelles données. Le domaine choisi, l'aviation, implique des connaissances procédurales et perceptivo-gestuelles. L'objectif dans cette phase, a été de fournir la preuve de concept de la généricité des propositions formulées dans les phases précédentes.

## 1.4. Organisation du Manuscrit

Cette section présente la structure du document et synthétise le contenu principal de chaque chapitre.

**Etat de l'Art**

### Chapitre 2.

- *Survol des fonctionnalités de base des STI.*
- *Revue de la littérature des propositions sur l'exploitation de capteurs sensoriels et gestuels dans les environnements de simulation.*

- *Revue de la littérature sur les principales méthodes proposées pour l'acquisition et la modélisation des connaissances du domaine et de l'apprenant dans les STI.*

Chapitre 3.

- *Description des limites des paradigmes classiques pour la modélisation des connaissances se rapportant aux domaines mal-définis.*
- *Etat de l'art sur les techniques et méthodes spécifiques de production de services tutoriels dans les STI dédiés à ces domaines.*

**CAS D'ETUDE DE LA THESE**

Chapitre 4.

- *Présentation du domaine de la chirurgie orthopédique percutanée.*
- *Description du caractère mal-défini du domaine et de la nature perceptivo-gestuelle de ses connaissances.*
- *Présentation de la plateforme TELEOS, le STI basé sur la simulation dédiée au domaine.*
- *Description des modules et services tutoriels du STI.*

Chapitre 5.

- *Description détaillée de la nature des traces d'activité enregistrées dans l'environnement d'apprentissage TELEOS, au cours des sessions de simulation de vertébroplastie.*
- *Présentation détaillée de la structure des traces et des périphériques qui les génèrent.*

**CONTRIBUTIONS**

Chapitre 6.

- *Présentation de la contribution théorique de la thèse : un modèle de représentation conceptuelle des séquences perceptivo-gestuelles et des patterns de connaissances correspondants.*
- *Présentation de la méthodologie de conception du modèle et définition des concepts-clés abordés.*

Chapitre 7.

- *Présentation de la première contribution informatique de la thèse : le framework PeTRA.*
- *Description détaillée de chaque opérateur composant le framework incluant son rôle, son fonctionnement et ses liens avec les autres opérateurs.*

Chapitre 8.

- *Présentation de la seconde contribution informatique de la thèse : l'algorithme PhARules.*
- *Survol de l'état de l'art des propositions adressant la problématique en datamining, de l'hétérogénéité interne des données.*
- *Description détaillée du fonctionnement de l'algorithme, notamment de sa fonction de différentiation des phases de résolution des séquences dans un ensemble de traces relatives à un cas de résolution de problème.*

**EXPERIMENTATIONS**

Chapitre 9.

- *Présentation des expérimentations conduites pour l'évaluation des propositions de la thèse.*
- *Présentation et évaluation d'une proposition d'extension de l'analyse des traces par une méthode automatisée.*

### Chapitre 10.

- *Présentation approfondie des travaux conduits pour établir la preuve de concept de la généricité des contributions de la thèse.*
- *Survol du domaine exploité comme cas d'usage (l'aviation), des fonctionnalités et des traces du simulateur dédié (PILOTE 2).*
- *Description de l'application de nos outils sur ces nouvelles données et des résultats des traitements.*

**CONCLUSION**

### Chapitre 11.

- *Conclusion de la thèse.*
- *Présentation des limites et des perspectives relatives à l'extension des expérimentations, à l'extension et l'amélioration solutions proposées.*

# PARTIE 1
# ETAT DE L'ART

# CHAPITRE 2.

# ACQUISITION ET MODELISATION DES CONNAISSANCES DANS LES SYSTEMES TUTORIELS INTELLIGENTS

*Ce chapitre présente un état de l'art sur les approches classiques d'acquisition et de modélisation du domaine et de l'apprenant dans les Systèmes Tutoriels Intelligents (STI). Avant d'aborder ce sujet spécifique, nous présentons la structure globale des STI. Puis, nous passons en revue les approches relatives à l'exploitation des perceptions et des gestes dans la conception de services tutoriels dans les STI. Nous présentons ensuite les méthodologies d'acquisition des connaissances du domaine dans le but d'en cerner le contenu didactique à transmettre à l'apprenant et, enfin, nous abordons la problématique de la modélisation de ces connaissances dans les modules des STI.*

## Sommaire

**2.1. Les Système Tutoriels Intelligents ..... 31**
2.1.1. Introduction ..... 31
2.1.2. Le module de communication ..... 32
2.1.3. Le module « modèle de l'apprenant » ..... 32
2.1.4. Le module « modèle du domaine » ..... 33
2.1.5. Le module « modèle pédagogique » ..... 33
2.1.6. Positionnement ..... 34
**2.2. Traitement des Perceptions ..... 35**
2.2.1. Perceptions, cognition et métacognition ..... 35
2.2.2. Perceptions et émotions ..... 36
2.2.3. Perceptions et gestes ..... 37
2.2.4. Connaissances perceptivo-gestuelles ..... 38
2.2.5. Positionnement ..... 39
**2.3. Acquisition des Connaissances ..... 39**
2.3.1. Acquisition des connaissances par l'analyse cognitive de tâches ..... 39
2.3.2. Acquisition automatique des connaissances ..... 40
2.3.3. Fouille de données éducationnelles ..... 41
2.3.4. Positionnement ..... 42
**2.4. Modélisation des Connaissances du Domaine et de l'Apprenant ..... 42**
2.4.1. Traçage de modèle ..... 42
2.4.2. Modélisation orientée contraintes ..... 44
2.4.3. Modélisation orientée contrôles ..... 45
2.4.4. Diagnostic des connaissances de l'apprenant ..... 45
2.4.5. Positionnement ..... 47
**2.5. Résumé et Conclusion ..... 47**

## 2.1. LES SYSTEME TUTORIELS INTELLIGENTS

### 2.1.1. Introduction

Les *Systèmes Tutoriels Intelligents (STI)* sont des *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH)* intégrant des paradigmes de l'intelligence artificielle [Brusilovskiy, 1994 ; Woolf, 2010]. De manière générale, les EIAH visent à améliorer les méthodes d'apprentissage en mettant en œuvre des connaissances et compétences pluridisciplinaires se rapportant notamment à la modélisation computationnelle et aux modèles d'apprentissage humain. Historiquement, d'autres termes faisant référence aux environnements d'apprentissage ont précédé ce dernier au fil des évolutions de la recherche dans le domaine. L'évolution terminologique d'Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO) à Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur (EIAO) dénotait l'apparition de fonctionnalités interactives [Wenger, 1987]. Le concept d'EIAH élargit le champ d'étude à l'apprentissage humain dans toutes ses déclinaisons tels que l'enseignement, la formation, l'autodidaxie, la diffusion de connaissances, etc. [Cottier *et al.* 2008]. Les termes Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur (EIAO) et Systèmes Tutoriels Intelligents font référence à l'utilisation des techniques de l'Intelligence Artificielle dans les EIAH dans le but de prendre en compte le profil de l'apprenant et d'adapter les services tutoriels en ce sens [Brusilovsky & Peylo, 2003].

L'Association américaine pour l'Avancement de l'Intelligence Artificielle (AAAI) définit les Systèmes Tutoriels Intelligents comme *« des logiciels éducatifs contenant des composants d'intelligence artificielle. Ces logiciels tracent le travail des apprenants pour pouvoir leur fournir des rétroactions et un guidage adaptés. La collecte d'information relative aux performances d'un apprenant permet aux logiciels éducatifs d'inférer ses points forts et ses points faibles et de lui suggérer des travaux additionnels »*. (AAAI, AI Topics/Intelligent Tutoring Systems).

Les Systèmes Tutoriels Intelligents visent en effet à offrir des services tutoriels adaptatifs aux apprenants [Benyon & Murray, 1993]. Cette dimension adaptative se conçoit par la production de services tutoriels au plus proche de l'état des connaissances de l'apprenant. Pour atteindre cet objectif, le système tutoriel doit pouvoir inférer le profil de l'apprenant à partir de ses performances et, éventuellement, de son comportement en situation d'apprentissage. Les données ainsi recueillies servent à construire le modèle de l'apprenant. Le diagnostic et l'évaluation des connaissances de l'apprenant sont réalisés à la lumière des connaissances du domaine représentées dans le module « modèle du domaine ». La transmission des connaissances du domaine à l'apprenant, l'évaluation de leur acquisition et le guidage didactique et pédagogique adéquat se réalisent sur la base d'un paradigme d'enseignement représenté dans le module « modèle pédagogique » du STI. Enfin, une interface utilisateur, le « module de communication » permet à l'apprenant d'interagir avec le système et d'avoir accès aux résultats des interactions entre les modules du système.

Pour résumer, le STI produit des services tutoriels dont le contenu est tiré du modèle du domaine, formaté de manière à correspondre au profil de l'apprenant et présenté selon les stratégies du modèle pédagogique. La figure 2.1 illustre les interactions entre l'apprenant et les différents modules d'un STI et les flux d'échange entre les modules. Ces modules constituent les composants de base de tout STI [Dede, 1986 ; Wenger, 1987 ; Nwana, 1990]. Nous les décrivons plus en détails dans les sections suivantes.

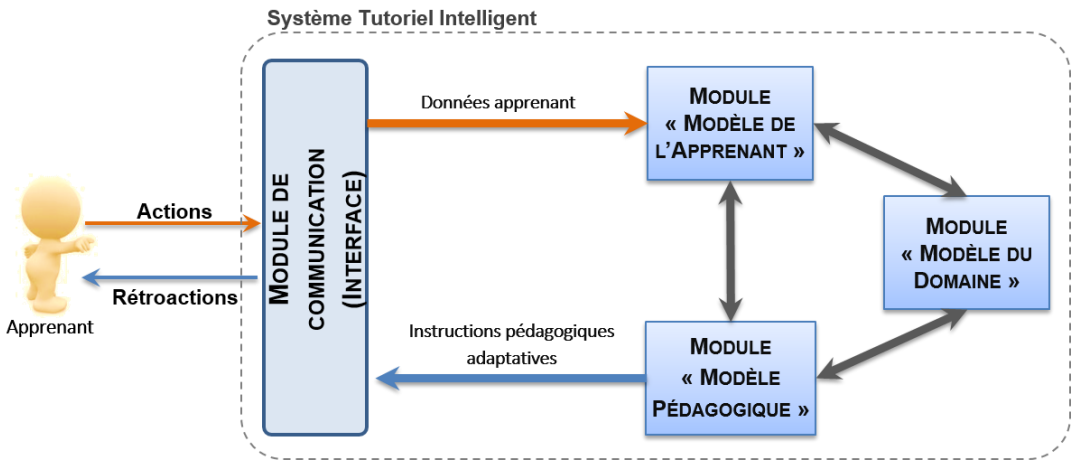



Figure 2.1. Architecture générale d'un Système Tutoriel Intelligent (adaptée de Nwana, 1990])

## 2.1.2. Le module de communication

Le module de communication constitue l'interface du STI à partir de laquelle l'apprenant interagit avec les différents modules du système. Le rôle de ce module est d'offrir les fonctionnalités qui rendent possibles des activités d'apprentissage en cohérence avec le modèle pédagogique (nous décrivons plus loin dans cette section le module « modèle pédagogique » du STI). En fonction du domaine et des services tutoriels visés, l'interface doit pouvoir capter les performances épistémiques et, au besoin, le comportement et les gestes de l'apprenant de manière à pouvoir inférer ses émotions ou ses perceptions [ex : Solis *et al.* 1999 ; Smilek *et al.* 2010 ; Luengo *et al.* 2011 (a) ; Aguirre *et al.* 2014].

Pour faciliter les interactions entre l'apprenant et le système tutoriel, certaines interfaces intègrent des fonctionnalités d'interactions « naturelles » telles que, par exemple, des fonctionnalités de traitement automatique des langues [Burton & Brown, 1986 ; Graesser *et al.* 2008 ; Evens *et al.* 2011]. D'autres interfaces utilisent des périphériques de réalisation de gestes permettant d'enregistrer des interactions liées à des habiletés motrices ou des périphériques de détection sensorielle permettant d'inférer les perceptions liées à l'activité d'apprentissage [ex. : O'Malley *et al.* 2006 ; Zhou *et al.* 2012 ; Lallé & Luengo, 2011] ou encore de produire des rétroactions sensorielles destinées à faciliter l'apprentissage [ex. : Luengo *et al.* 2011 (a) ; Sigrist *et al.* 2012].

Le rôle de l'interface est aussi de permettre à l'apprenant d'avoir accès aux résultats des interactions entre les différents modules du système [Nwana, 1990]. Il s'agit par exemple, de recevoir les rétroactions adaptatives calculées par le modèle pédagogique sur la base des informations fournies par le modèle de l'apprenant ; ou encore, par exemple, dans un apprentissage favorisant la métacognition, de permettre à l'apprenant de consulter les résultats de la modélisation de ses performances par le système [Bull *et al.* 2006].

## 2.1.3. Le module « modèle de l'apprenant »

Le modèle de l'apprenant est une représentation du profil de l'apprenant déduit par le système tutoriel. Le profil de l'apprenant peut se concevoir au niveau épistémique et au niveau comportemental [Wenger, 1987]. Au niveau épistémique ; les données recueillies dans l'environnement d'apprentissage servent à inférer l'état des connaissances de l'apprenant. Ces dernières incluent les connaissances théoriques et déclaratives, les connaissances procédurales

ainsi que les connaissances empiriques et tacites (à l'instar des gestes liés à des habiletés motrices).

Au niveau comportemental, les données visées servent à inférer la métacognition, à savoir la capacité de l'apprenant à autoréguler son activité d'apprentissage [Conati & Merten, 2007]. Elles servent aussi à inférer des émotions liées à l'activité d'apprentissage telles que, par exemple, la frustration ou le découragement dus aux difficultés rencontrées au cours de l'activité d'apprentissage ou encore la motivation démontrée pour l'activité d'apprentissage [ex : Solís *et al.* 2000 ; Smilek *et al.* 2010].

Le modèle de l'apprenant peut aussi inclure des données perceptuelles. En effet, les perceptions peuvent constituer des indicateurs forts de certaines émotions [ex : Steichen *et al.* 2013] ou encore représenter des facettes spécifiques de connaissances multimodales [Luengo et al, 2004 ; Lemole *et al.* 2007 ; Zhou *et al.* 2012].

Nous faisons une revue de la littérature de l'exploitation de ces différents éléments dans la modélisation de l'apprenant dans la section 2.2.

### 2.1.4. Le module « modèle du domaine »

Dans le champ des systèmes tutoriels intelligents, le module « modèle du domaine » ou encore le module « modèle expert », comprend une représentation des connaissances et des compétences expertes d'un domaine pouvant être transmises par des méthodes didactiques et pédagogiques [Nwana, 1990]. Ces connaissances et compétences sont décortiquées de manière à faciliter leur représentation sous forme de faits, principes ou règles suivant une hiérarchie généralement basée sur leur complexité [Tardif, 1998], et de manière à faciliter une acquisition incrémentale dans un processus d'apprentissage [Self, 1987].

Le modèle du domaine fournit aussi au système tutoriel une base de référence pour inférer l'état des connaissances de l'apprenant. Ce service tutoriel constitue le « diagnostic des connaissances » de l'apprenant [Guzmán & Conejo, 2004]. D'autres services tutoriels, tels que les suggestions d'aides à la résolution de problèmes et le guidage didactique et pédagogique, tirent aussi leur contenu du modèle du domaine.

Selon les domaines, la modélisation des connaissances peut être plus ou moins fastidieuse, exhaustive ou ouverte. Par exemple, les domaines impliquant uniquement des connaissances déclaratives (ex : les mathématiques) sont plus faciles à modéliser que des domaines impliquant des connaissances empiriques et/ou procédurales (ex : pilotage d'avion). De même, une modélisation exhaustive peut être réalisée pour des domaines définis par un cadre théorique fixe (ex : la biologie) alors que le modèle de connaissances d'un domaine mal-défini peut être incrémenté indéfiniment (ex : le droit). Nous détaillons les méthodes d'acquisition et de modélisation des connaissances du domaine dans les sections 2.3 et 2.4 du manuscrit.

### 2.1.5. Le module « modèle pédagogique »

Le module « modèle pédagogique » ou encore « modèle tuteur » comprend la formalisation des approches didactiques et pédagogiques devant sous-tendre les services tutoriels que fournit le STI. Ces approches se regroupent principalement sous deux paradigmes : le paradigme d'enseignement et le paradigme d'apprentissage [Clermont *et al.* 2008].

Le paradigme d'enseignement place le tuteur au centre des scénarios pédagogiques en ce sens qu'il est responsable du choix de la pratique pédagogique qu'il juge optimal. Ce paradigme est porté par des théories behavioristes et cognitivistes qui privilégient l'enseignement explicite et systématique visant non seulement l'apprentissage des connaissances, mais également l'apprentissage de stratégies cognitives et métacognitives [Pressley, 1995 ; Rosenshine, 1997].

De l'autre côté, le paradigme d'apprentissage place l'apprenant au centre des scénarios pédagogiques et lui attribue la responsabilité de ses apprentissages. En effet, ce paradigme se base sur la théorie constructiviste qui privilégie des apprentissages qui se réalisent en fonction des intérêts de l'élève et selon son rythme, ses capacités et ses méthodes d'apprentissage [Jonnaert, 1996, Tardif, 1998]. L'apprentissage par simple transmission ou présentation de connaissances du tuteur à l'apprenant est écarté au profit d'une acquisition des connaissances basée sur les expériences et les situations de résolution de problèmes, qui permettent à l'apprenant de découvrir par lui-même l'objet de ses apprentissages et de lui attribuer ainsi une signification qui lui est propre.

Les deux paradigmes s'opposent aussi du point de vue de l'évaluation des connaissances. Le paradigme de l'enseignement pratique une évaluation formative dont l'objectif est d'identifier les acquis des connaissances de l'apprenant et d'y remédier et une évaluation sommative visant à noter l'ensemble des acquis de l'apprenant en vue, éventuellement, d'une certification [Clermont *et al.* 2008]. Le paradigme d'apprentissage pratique une évaluation dite « authentique » [Tardif, 1993]. La mesure de composantes isolées d'une compétence est évitée, ainsi que la mesure de compétences en dehors d'un contexte spécifique. Les évaluations se réalisent sur des tâches complètes et contextualisées telles que par exemple des projets, des simulations ou des problèmes réels à résoudre.

Dans le domaine des systèmes tutoriels intelligents, les approches de modélisation du domaine dites par « traçage de modèles » ou les approches basées sur les systèmes experts exploitent généralement une stratégie pédagogique cognitiviste. Les approches de modélisation orientées contraintes et orientées contrôles privilégient pour leur part une démarche pédagogique constructiviste. Nous discuterons plus en détails de ces approches dans la section 2.4 du manuscrit.

### 2.1.6. Positionnement

Le cas d'étude de cette thèse est TELEOS, un STI dédié à la chirurgie orthopédique percutanée [Luengo *et al.* 2011 (a)]. L'interface de TELEOS offre un espace de simulation permettant à l'apprenant, l'interne en chirurgie, de s'entrainer à la manipulation des outils chirurgicaux. La chirurgie orthopédique percutanée est un domaine mal-défini impliquant des connaissances perceptivo-gestuelles (la section 4.1 présente une description détaillée des spécificités du domaine).

Pour capter les gestes de l'apprenant et son comportement lié aux perceptions, l'interface est complétée de périphériques de détections sensorielles et de simulation des gestes chirurgicaux. Les données exploitées pour la modélisation de l'apprenant sont les traces enregistrées à partir de ces périphériques et de l'interface de simulation. Elles permettent d'inférer les performances épistémiques et les perceptions de l'apprenant. Le modèle du domaine a été conçu par une approche de modélisation orientée contrôles. Nous faisons une présentation générale de cette approche dans la section 2.4.4 et une description détaillée relative à son application dans TELEOS,

dans la section 4.2.2. Par ailleurs, nous discutons des limites des approches classiques de modélisation pour les domaines mal-définis dans le chapitre 3 du document.

La stratégie didactique et pédagogique de TELEOS se base sur le paradigme de l'apprentissage constructiviste. Les services tutoriels sont conçus de manière à ne pas maintenir systématiquement l'apprenant au plus près du comportement expert. L'objectif est de permettre au système d'analyser et de comprendre les conceptions propres de l'apprenant en amont de manière à lui apporter un guidage didactique et pédagogique qui en favorise le renforcement et l'évolution.

## 2.2. TRAITEMENT DES PERCEPTIONS

Les perceptions auxquelles nous nous intéressons dans ce travail sont les modalités sensorielles exploitées dans un contexte d'apprentissage. Hors du cadre pédagogique, cela inclut tous les sens par lesquels chacun récupère les informations nécessaires à l'analyse et la compréhension du phénomène à appréhender. Dans le domaine de l'apprentissage assisté par ordinateur, les perceptions sont utilisées dans de nombreuses études pour analyser différents aspects de l'activité et du processus d'apprentissage.

### 2.2.1. Perceptions, cognition et métacognition

Le concept de métacognition est défini comme un processus cognitif dont l'objectif est de mettre en œuvre une autoréflexion sur l'assimilation du matériel didactique et une autorégulation de l'acquisition de la connaissance par l'apprenant [Schneider, 2011].

Conati & Merten (2007) ont mis en avant l'utilisation des perceptions visuelles pour analyser la capacité de l'apprenant à réaliser cette autorégulation de son apprentissage dans un contexte d'exploration libre de l'interface d'un STI et sa capacité à s'auto-expliquer le matériel didactique disponible. Les évaluations effectuées ont démontré que les informations visuelles recueillies en temps-réel sur l'interface d'un EIAH dédié à l'apprentissage des fonctions mathématiques, permettent de mieux modéliser les habiletés métacognitives de l'apprenant comparées à la seule utilisation des actions exécutées sur l'interface du STI. En effet, cette information perceptuelle supplémentaire permet de réaliser une modélisation plus complète du comportement exploratoire de l'apprenant et par conséquent fournit plus de pistes pour la production d'un support didactique et pédagogique adaptatif et *in fine* l'amélioration de l'acquisition des connaissances.

Le concept du Modèle Ouvert de l'Apprenant *(Open Student Model)* [Bull *et al.* 2006] vise à encourager l'activité métacognitive de l'apprenant en lui permettant de consulter son propre modèle de l'apprenant tel qu'il est produit par un système tutoriel. [Mathews *et al.* 2012] se sont posé la question de la compréhension effective de l'apprenant des modèles mis à sa disposition. Là encore, les perceptions visuelles sont utilisées pour pouvoir déduire la compréhension de l'apprenant de son propre modèle et déterminer ainsi l'efficacité de l'activité métacognitive.

Certains chercheurs orientent plutôt leurs études sur l'utilisation des perceptions comme indices des capacités cognitives de l'apprenant. Par exemple Steichen *et al.* (2013) appliquent l'utilisation des perceptions visuelles à la production d'analyses sur le comportement et la cognition liés au domaine de la visualisation d'information. L'objectif est d'exploiter des données oculométriques pour d'une part, déduire automatiquement la tâche de visualisation en cours et d'autre part,

déduire trois types de capacités cognitives de l'utilisateur : la vitesse perceptuelle (une mesure de la vitesse de réalisation de taches perceptuelles simples), la mémoire visuelle de travail (une mesure de la capacité de rétention et manipulation d'information visuelle et spatiale) et la mémoire verbale de travail (une mesure de la capacité de rétention et de manipulation d'information verbale). Les principales fonctions oculométriques utilisées sont les taux de fixations, le nombre de fixations, la durée des fixations la longueur de l'espace situé entre deux fixations (aussi appelé « saccade ») et les angles relatifs et absolus des saccades.

Certains travaux utilisent aussi les informations perceptuelles recueillies pour détecter l'effort déployé par l'apprenant. C'est le cas par exemple des recherches rapportées par [Lach, 2013] qui utilisent les données oculométriques pour l'analyse et la quantification de l'effort cognitif déployé par l'apprenant en situation d'évaluation. La principale fonction utilisée dans le cadre de cette étude se démarque des autres en ce sens qu'elle est physionomique. Il s'agit en effet du diamètre pupillaire. En effet, dans ce travail, il a été observé que la dilatation de la pupille est fonction de l'effort mental de l'apprenant. Elle permet de définir un « indice de l'activité cognitive » qui constitue une mesure de la charge mentale que représente le problème en cours de résolution par l'apprenant [Marshall, 2002].

### 2.2.2. Perceptions et émotions

Les émotions jouent un rôle crucial dans le processus d'apprentissage dans la mesure où la motivation, l'application, l'assiduité de l'apprenant et donc ses performances en sont tributaires [Pekrun *et al.* 2002]. A l'instar de Zimmerman *et al.* (2000), Prendinger *et al.* (2005), Wang *et al.* (2006), la littérature rapporte l'exploitation de STI conçus avec la capacité d'inférer des états émotionnels tels que la curiosité, l'ennui ou le désengagement et d'y répondre par une assistance adaptée destinée à le réengager dans le processus pédagogique.

Leur détection se réalise, selon les travaux, au niveau du comportement ou au niveau physiologique. Au niveau comportemental, les perceptions visuelles, la posture ou les expressions faciales constituent des vecteurs forts de signaux émotionnels. Par exemple, les cibles des fixations de l'apprenant, leur durée ou encore leur fréquence peuvent révéler un certain niveau d'ennui [Smilek *et al.* 2010]. L'ennui, la curiosité, l'enthousiasme ou encore le découragement peut être déduit sur la base des postures ou des expressions faciales de l'apprenant. Solís *et al.* (2000) présentent des travaux sur la détection des expressions faciales et des gestes de la main au moyen de techniques de vision par ordinateur dans le but d'analyser d'inférer le niveau d'intérêt de l'apprenant face au matériel didactique ou encore son niveau d'ennui ou de doute face à la difficulté associée à ce matériel. Dans le même esprit [D'Mello *et al.* 2007] rapporte une étude sur la détection de certaines postures et l'analyse de traces de dialogues pour déduire des états émotionnels tels que l'ennui, la confusion, l'implication et la frustration pour l'apprentissage de notions introductives en informatique avec le STI AutoTutor [Graesser *et al.* 1999, 2008].
Outre les techniques de détection basées sur le comportement, certaines études se concentrent sur la détection des états émotionnels au travers des réactions physiologiques. Arroyo *et al.* (2009) rapportent l'utilisation de détecteurs tels qu'un bracelet de conductance cutanée *(skin conductance bracelet)*, une souris avec capteurs de pression, un siège muni de détecteur de pression pour l'analyse de la posture en complément d'une caméra de détection d'expressions faciales. Ces capteurs sont utilisés pour déduire des émotions telles que l'assurance, la frustration, l'enthousiasme et l'intérêt à partir de signaux physiologiques. Wayang Outpost [Arroyo *et al.* 2004], un système tutoriel dédié à la géométrie, a été utilisé dans ce travail. Pour ce qui a trait aux

perceptions visuelles, la variable physiologique la plus étudiée est le diamètre pupillaire dont la variation peut être directement liée à des états émotionnels tels que l'ennui ou le stress [Muldner, 2009 ; Lach, P., 2013].

### 2.2.3. Perceptions et gestes

Dans les domaines où des gestes font partie du corps de compétences à acquérir et à maîtriser, les perceptions directement sollicitées par leur réalisation sont les perceptions tactiles et haptiques. La perception tactile relève du sens du toucher et concerne l'information sensorielle renvoyé par contact direct avec les objets. L'haptique pour sa part peut intégrer, en plus de la sensation tactile, la perception du mouvement de l'objet dans l'espace relativement à ses diverses propriétés telles que son poids, sa consistance, sa masse, son volume etc. De plus, elle ne relève pas forcément du contact direct avec un objet. Ce sera par exemple, les perceptions ressenties par le chirurgien via son outil lors de la progression de celui-ci à travers le corps du patient : même en l'absence de vision directe de l'environnement anatomique traversé par l'outil chirurgical, les perceptions haptiques fournissent au chirurgien des informations qui lui permettent de se guider. Il en va de même des perceptions différentes reçues par un automobiliste selon qu'il roule sur du gravas ou une surface asphaltée.

Les interfaces tactiles dont l'utilisation est rapportée dans la littérature offrent un large panel de fonctions qui ont pu être exploitées dans divers dispositifs de simulation. Ces interfaces sont largement exploitées en réalité virtuelle et réalité augmentée et relativement peu dans le domaine de l'apprentissage assisté par ordinateur. Cependant, certaines recherches présentent des résultats importants sur l'efficacité de l'utilisation des interfaces haptiques pour améliorer l'acquisition des connaissances ou la maîtrise d'habiletés motrices dans un contexte d'apprentissage [O'Malley *et al.* 2006 ; Marchal & Reinkensmeyer, 2008 ; Marchal *et al.* 2010 ; Zhou *et al.* 2012]. Plusieurs études démontrent que les perceptions haptiques sont particulièrement bénéfiques pour :

- l'apprentissage de tâches qui demandent une dextérité manuelle avancée dans des domaines telle que la neurochirurgie [Lemole *et al.* 2007], la chirurgie mini-invasive [Zhou *et al.* 2012]
- l'acquisition de la maîtrise de la manipulation de véhicules motorisés [Jones & Sarter 2008]
- l'acquisition de la maitrise de tâches dont la pratique est dangereuse telle que l'apprentissage de figures complexes dans certains sports (gymnastique),
- le réapprentissage d'actions motrices telles que la rééducation d'un membre après une blessure neurologique [Khan *et al.* 2006]

Dans certains domaines, les perceptions constituent une facette à part entière d'une connaissance multimodale. En d'autres mots, dans ce contexte, les perceptions ne sont pas des indicateurs connexes de la cognition ou des indicateurs métacognitifs ni émotionnels. Dans un contexte d'apprentissage, elles représentent plutôt un aspect non négligeable de la connaissance mise en œuvre autant que les actions ou les gestes qu'elles accompagnent. Ces connaissances sont dites perceptivo-gestuelles.

### 2.2.4. Connaissances perceptivo-gestuelles

Les connaissances perceptivo-gestuelles sont des connaissances empiriques acquises par la pratique en milieu d'application réel ou en environnement simulé de l'environnement réel. Elles sont difficiles à formuler ou impossibles à expliciter exclusivement de manière déclarative par les experts [Luengo et al, 2004, 2006]. Elles combinent l'exécution d'actions et gestes avec des prises d'informations perceptuelles. Le rôle de ces informations perceptuelles est d'accompagner la décision d'exécuter ou de valider des actions et des gestes.

A titre d'exemple, nous pouvons citer le domaine de l'aviation où les perceptions visuelles sont cruciales dans l'exécution des procédures de vol. En effet, les balayages visuels des outils de l'appareil sont liés aux connaissances relatives aux contrôles de l'état de l'appareil à chaque phase de vol ainsi qu'aux décisions adéquates liées à d'éventuels changements se produisant dans l'environnement de l'appareil au cours d'un vol [Mulgund *et al.* 1995 ; Remolina *et al.* 2004]. La conduite automobile est un autre exemple de domaine impliquant des connaissances perceptivo-gestuelles. En effet, au-delà des connaissances techniques liées à la manipulation d'un véhicule [Weavers *et al.* 2003 ; de Winter *et al.* 2008], les décisions prises par le conducteur sont intimement liées au caractère dynamique de l'environnement du véhicule et aux différentes informations qu'apportent ce dernier au fur et à mesure qu'il change.

En chirurgie mini-invasive, les perceptions haptiques et les perceptions visuelles constituent des modalités de la connaissance à maitriser par le chirurgien dans la pratique du geste chirurgical autant que la facette théorique de cette connaissance. Parmi les recherches se rapportant à l'étude des modalités perceptivo-gestuelles des connaissances dans ce domaine, nous pouvons citer les travaux de [Zhou *et al.* 2012] réalisés avec des simulateurs permettant de s'entraîner aux gestes chirurgicaux en chirurgie laparoscopique. Les résultats de ces expérimentations démontrent les gains d'apprentissage observés lorsque les perceptions haptiques sont exploitées dans l'environnement de simulation.

Nous pouvons aussi citer les travaux de [Lemole *et al.* 2007] sur la simulation de la ventriculostomie, une opération neurochirurgicale destinée à traiter les dérivations des ventricules du cerveau. Ce simulateur se concentre sur une tâche spécifique de cette opération : le placement du cathéter dans le ventricule. Tout au long de la trajectoire, le stylet haptique représentant le cathéter, renvoie les différentes perceptions au contact de la peau, de l'os et du cerveau. Les perceptions haptiques ressenties au contact de ces différentes parties constituent une nouvelle facette des connaissances anatomiques de l'interne. Elles constituent aussi une modalité perceptuelle permettant à l'apprenant d'acquérir la maitrise de son geste en s'entrainant à l'adaptation de la manipulation de l'outil chirurgical sur la base des perceptions ressenties.

Du point de vue de la conception de STI dédiés à des domaines impliquant des connaissances perceptivo-gestuelles, le challenge est élevé. Il est en effet difficile de produire des services tutoriels adaptés à ce type de connaissances dans la mesure où, sa nature multimodale la rend difficile à enregistrer, représenter et évaluer.

En effet, l'enregistrement des connaissances perceptivo-gestuelles dans un STI implique l'utilisation coordonnée de multiples périphériques de détection sensorielle. La multiplicité des périphériques est à l'origine d'un ensemble de traces hétérogènes générées indépendamment d'un périphérique à l'autre et représentant un aspect différent de la même activité. Le principal défi est de parvenir à modéliser ces traces d'activité de manière à ce qu'elles représentent de

manière cohérente les différentes modalités perceptuelles et gestuelles des connaissances mises en jeu.

### 2.2.5. Positionnement

Une partie des connaissances du domaine de la chirurgie orthopédique percutanée est perceptivo-gestuelle (voir section *4.1.2 : « Le caractère perceptivo-gestuel des connaissances »*). La réalisation du geste chirurgical percutané implique la coordination de connaissances théoriques avec des modalités visuelles, gestuelles et haptiques. Le comportement de l'apprenant capté à partir de l'environnement d'apprentissage vise à inférer ses perceptions visuelles et ses réactions en lien avec les perceptions haptiques au cours d'une simulation.

## 2.3. Acquisition des Connaissances

L'objectif d'un STI est de fournir un environnement d'apprentissage où l'apprenant à un accès aux connaissances du domaine. Il acquiert ces connaissances grâce au matériel didactique et pédagogique, à l'évaluation de ses connaissances et au guidage didactique et pédagogique adaptés à son profil. La méthodologie pour la modélisation et la mise en œuvre de chaque service tutoriel s'accompagne de diverses problématiques propres aux spécificités du domaine d'apprentissage, aux approches visées, au public d'apprenants cibles, aux contraintes techniques et technologiques. Par exemple, la présentation du matériel didactique implique des contraintes technologiques différentes selon que le STI est dédié à un domaine ciblant des connaissances déclaratives ou des connaissances procédurales, selon que l'environnement d'apprentissage est orienté simulation ou exploration. De même, l'évaluation des connaissances mises en jeu ainsi que le guidage didactique et pédagogique dans ces différents cas de figure seront différentes selon que le domaine d'intérêt vise des élèves du primaire, des étudiants à l'université ou des professionnels [Brousseau, 1998].

La qualité des services tutoriels d'un STI est tributaire de la qualité de son modèle de connaissances. Le modèle de connaissances se construit autour des éléments de connaissances fournis directement ou indirectement par des experts du domaine. Les questions relatives à la qualité du modèle de connaissances peuvent se regrouper en deux catégories : 1) la qualité de la représentation des éléments de connaissances modélisés ; 2) l'exhaustivité de l'ensemble des connaissances modélisées. Nous présentons ci-dessous deux approches d'acquisition des connaissances destinées à être modélisées et intégrer dans la base de connaissances d'un STI. Il s'agit de l'approche par analyse cognitive de tâches et l'approche, plus récente, par acquisition automatique des connaissances du domaine.

### 2.3.1. Acquisition des connaissances par l'analyse cognitive de tâches

Le terme « analyse de tâche » fait référence à un ensemble de techniques utilisées dans le but d'identifier le processus cognitif nécessaire à la réalisation de tâches pour résoudre un problème. Ces techniques permettent de comprendre la structure de ces tâches ainsi que leurs propriétés. A titre d'exemple, on peut être intéressé à la durée, la fréquence ou la variabilité d'une tâche ; on peut aussi chercher à déterminer les informations, les données, les outils ou encore le niveau de compétence nécessaires à sa réalisation.

L'analyse cognitive de tâches *(CTA : Cognitive Task Analysis)* est une extension des techniques d'analyse de tâches traditionnelle visant à étudier des tâches dont la réalisation implique une forte

part d'activité cognitive telle que, par exemple, la mémorisation, l'analyse, la synthèse ou encore la prise de décision. Ces techniques s'intéressent en même temps au comportement « extérieur » observable relatif aux habiletés mises en œuvre lors de la réalisation d'une tâche [Chipman *et al.* 2000].

Les principales applications des techniques d'analyse cognitive de tâches comprennent le développement de modèles mentaux, la modélisation du processus de prise de décision d'experts, la mesure de la charge cognitive liée à la réalisation de tâches complexes, l'identification de paramètres clés permettant de distinguer les performances d'un novice de celles d'un expert.

Dans le champ des STI, l'intérêt de l'analyse cognitive de tâches est de parvenir à une description formelle des connaissances conceptuelles, des connaissances procédurales, des outils et des techniques utilisés par un expert dans la réalisation des tâches relatives à un domaine. Cette description formelle a pour objectif de concevoir du matériel didactique et pédagogique destiné à guider les apprenants dans le processus d'acquisition des performances et compétences visées [Jonassen *et al.* 1999].

### 2.3.2. Acquisition automatique des connaissances

Les approches d'automatisation du processus d'acquisition des connaissances [Rich & Knight, 1991] sont proposées dans le but de réduire l'effort et le temps nécessaires à la formalisation des connaissances du domaine. Il s'agit de réaliser cette formalisation sans passer par le processus fastidieux de verbalisation par l'expert de ses connaissances et compétences. Pour certains domaines, le temps et l'effort que cette tâche exige, sont trop élevés. En outre, il n'est pas toujours possible pour l'expert de verbaliser des performances cognitives acquises par l'expérience. A fortiori, l'expert peut se heurter à la difficulté de pouvoir décomposer son expertise de manière à en faciliter l'acquisition progressive par un novice. Cette difficulté à identifier les potentiels points de difficulté cognitive pour un débutant est connue sous le nom de *« expert blind spot »* [Nathan *et al.* 2001] et constitue une limite importante à l'approche d'acquisition des connaissances se basant exclusivement sur des méthodes d'interview de l'expert.

Une meilleure alternative est de permettre au système que l'on veut enrichir de ces connaissances de les acquérir par une approche d'apprentissage par l'observation en appliquant un mécanisme d'induction [Muggleton & de Raedt, 1994]. En d'autres mots, il s'agit de se concentrer de préférence sur des cas clés résolus par l'expert au lieu de chercher à réaliser une formalisation exhaustive de son expertise et de permettre au système de générer des règles à partir de ces cas de manière à pouvoir émuler par la suite le processus sur des cas inédits.

Des propositions marquantes ont été faites dans cette optique. Certaines visent à simplifier l'étape de verbalisation en automatisant la finition de la base de connaissance par des calculs d'inférence. Par exemple, Elsheman & McDermott (1986) ont proposé le système MOLE qui permet d'établir une base de connaissances expertes riche tout en sollicitant le moins possible l'expert pour la verbalisation de ses connaissances ou des procédures qu'il applique à la réalisation d'une tâche. Pour cela, le système utilise un moteur d'inférence qui, partant de certaines hypothèses heuristiques, permet la classification, l'enrichissement et la désambiguïsation des informations fournies par l'expert. Dans la même idée, le système SALT a été proposé par Marcus and McDermott (1989) pour des domaines impliquant des ensembles de solutions ouverts, l'une des propositions prémices sur les spécificités des domaines mal-définis [Newell & Simon, 1995]. La solution proposée avec SALT se base sur la construction d'un réseau de dépendance à partir des

informations expertes et sur l'extraction par la suite, à partir de ce réseau, d'un ensemble de règles de production pour la réalisation d'un ensemble de tâches données.

Dans la conception des STI, l'une des théories les plus utilisées pour la mise en place de l'automatisation de l'acquisition des connaissances est la théorie d'Anderson [Anderson, 1993] sur l'architecture cognitive ACT-R *(Adaptive Control of Thought–Rational)*. Cette théorie se base sur le postulat que la progression de l'apprentissage chez l'apprenant part d'un ensemble de connaissances déclaratives pour parvenir à l'assimilation de compétences procédurales grâce à la pratique de l'application de ces connaissances sur des cas concrets de résolution de problèmes. Ces compétences procédurales se traduisent par la maîtrise des règles de production pour l'accomplissement de tâches plus ou moins complexes.

Cette théorie cognitive est à la base d'importantes recherches et avancées [Dubois *et al.* 2010] portant sur la conception des Systèmes Tutoriels Intelligents de la catégorie dite des tuteurs cognitifs : *Cognitive Tutors* [Anderson et al, 1995]. Nous décrivons cette catégorie de STI dans la section suivante.

*Practical Algebra Tutor* [Koedinger *et al.* 1997], *Demonstr8* [Blessing 1997], *Behavior Recorder* [McLaren *et al.* 2004], *SimStudent* [Matsuda *et al.* 2007] sont quelques exemples d'outils d'aide à la conception de Cognitive Tutors. Au sein de ces outils, le processus d'acquisition automatique de connaissance s'effectue par l'extraction de règles de production à partir de démonstrations de résolution de problèmes réalisées par un expert ou un tuteur humain. A noter que *Behavior Recorder* prend aussi en compte les démonstrations (réussies ou échouées) effectuées par les apprenants dans le processus d'acquisition des connaissances [McLaren *et al.* 2004]. Cependant, l'automatisation du processus rapportée dans ces travaux est partielle. En effet, le processus n'affranchit pas des tâches d'annotation visant à préciser l'intention de l'expert ou du tuteur humain au cours ou après l'exécution d'une démonstration. En plus des tâches d'annotation, il est parfois nécessaire de disposer d'un ensemble préalable de connaissances du domaine pour pouvoir procéder à l'extraction des règles de production.

### 2.3.3. Fouille de données éducationnelles

Parmi les approches d'acquisition automatique des connaissances, certaines propositions mettent plutôt l'emphase sur des techniques d'apprentissage automatique s'orientant vers une automatisation complète du processus [Wilkins, 1991]. Récemment, une communauté et, avec elle, un corps de recherches à part entière, a émergé sous le nom de *Fouille de données éducationnelles (Educational Data Mining)* [Romero et Ventura, 2007 ; Baker & Yacef, 2009 ; Romero & Ventura, 2010]. Elle prône l'utilisation des techniques de datamining à des fins, entre autres, d'extraction automatique des connaissances du domaine.

Certaines recherches exploitent ces techniques pour faciliter l'extraction de règles de production pour enrichir le modèle expert d'un *Cognitive Tutor* à partir d'un ensemble de connaissances préalables du domaine [ex. : Jarvis *et al.* 2005]. D'autres travaux exploitent ces techniques dans le but d'extraire automatiquement des contraintes [ex. : Riccuci *et al.* 2007] à des fins de modélisation selon l'approche de *modélisation par contraintes (Constraint-Based Modeling)*. Nous faisons une présentation plus détaillée de cette approche dans la section 2.4.7 de ce manuscrit.

Les règles de production constituent une représentation rigide de résolution de problème et ne peuvent pas s'adapter à des catégories de problèmes dont les étapes de résolution sont difficiles voire impossibles à détailler. C'est le cas pour les domaines mal-définis ou des domaines bien-

définis impliquant des tâches mal-définies. Dans le but de pallier ces limites, Fournier-Viger et al (2008 ; 2010) proposent un framework d'acquisition automatique des connaissances qui exploite les techniques de fouilles de données éducationnelles dans le but d'extraire automatiquement des patrons de connaissances fréquents réutilisables dans le modèle de connaissance d'un STI, à partir des traces d'interaction enregistrées. L'avantage est de parvenir à s'affranchir d'une spécification préalable importante des connaissances du domaine et de la rigueur des règles de production. L'évolutivité du modèle de connaissances est aussi assurée par un enrichissement progressif à partir de l'exploitation de nouvelles traces d'interactions.

### 2.3.4. Positionnement

Dans les premiers travaux d'acquisition des connaissances du domaine de la chirurgie orthopédique percutanée pour la conception de TELEOS, une approche par analyse des tâches cognitives de chirurgiens experts a été utilisée [Vadcard, 2003 ; Vadcard et Luengo, 2005 ; Luengo *et al.* 2006 ; Vadcard *et al.* 2009]. Compte tenu du caractère mal-défini du domaine, cette approche est fastidieuse, partielle et ne prend pas en compte toutes les facettes des connaissances mises en jeu [Lallé et Luengo, 2011 ; Luengo *et al.* 2011 (a)]. En outre, au regard du paradigme constructiviste, les connaissances construites par l'apprenant au cours de son expérience d'apprentissage devraient être prises en compte. Or, l'approche par analyse cognitive de tâches limite le contenu des services tutoriels au seul point de vue de l'expert.

L'un des objectifs de cette thèse est de chercher à pallier ces limites par une démarche d'acquisition automatique de connaissances à partir des données. Les données considérées sont les traces d'activités provenant tant des interactions d'experts que d'apprenants avec le STI.

Les connaissances extraites à partir de ces données doivent aussi être modélisées en tenant compte de leur caractère perceptivo-gestuel et mal-défini. Dans la section suivante, nous passons en revue les approches proposées dans la littérature pour la modélisation des connaissances du domaine et de l'apprenant.

## 2.4. MODELISATION DES CONNAISSANCES DU DOMAINE ET DE L'APPRENANT

Les approches de représentation du modèle de connaissance dans les Systèmes Tutoriels Intelligents se basent sur l'un des principaux paradigmes suivants: le traçage de modèle *(Model-Tracing)* et la modélisation orientée contraintes *(Constraint-Based Modeling)*. Le paradigme utilisé dans notre cas d'étude est différents de ceux-ci. Il s'agit de la modélisation orientée contrôles *CK¢ (Conception, Knowing, Concept)*. Nous décrivons ces approches dans les sections qui suivent.

### 2.4.1. Traçage de modèle

Le traçage de modèle est une approche de modélisation de l'apprentissage qui conçoit la progression de l'apprenant par la pratique de procédures de résolution de problèmes. Ces procédures sont déclinées en étapes que l'apprenant doit maîtriser pour atteindre les compétences visées. Pour évaluer cette progression, l'approche du traçage de modèle trace les étapes cognitives empruntées par l'apprenant au cours de la résolution d'un problème donné. Les connaissances déclaratives mises en jeu par l'apprenant à chaque étape sont comparées aux connaissances attendues pour la résolution de ce problème précis. A partir de là, il est possible d'identifier ou de calculer le niveau de maîtrise des connaissances procédurales impliquant la

mise en œuvre de ces connaissances déclaratives et d'aider l'apprenant à atteindre les compétences ciblées.

Le traçage de modèle est principalement exploité dans les *Cognitive Tutors*. Ces derniers sont le résultat de l'utilisation conjointe de l'approche de traçage de modèle avec la théorie de psychologie cognitive « ACT-R » (ex. : *LISP-Tutor* [Corbett & Anderson, 1992], *Practical Algebra Tutor* [Koedinger *et al.* 1997]). Nous reprenons ci-dessous, un résumé des hypothèses de cette théorie (dans sa version d'alors : ACT* [Anderson, 1983]) et les principes correspondants édictés pour la conception de tuteurs cognitifs tel que proposé par Corbett & Anderson (1992) :

1) Les comportements de résolution de problème sont guidés par des objectifs ⇒ Pour la conception d'un STI, il faut disposer de la structure des objectifs qui sous-tendent des tâches de résolution de problème.

*Cette structure permet au traçage de modèle de fournir un guidage didactique ou pédagogique contextuel basé sur l'étape de résolution dans lequel se trouve l'apprenant en fonction de l'objectif à atteindre. Le guidage est fourni au travers des indices ou des messages d'erreurs compte tenu des objectifs de réalisation de la tâche.*

2) Les connaissances déclaratives et les connaissances procédurales sont distinctes. Un élément de connaissance procédural est une règle de production de la forme si-alors *(IF-THEN)* ⇒ De ce fait, dans un système tutoriel, les connaissances de l'apprenant doivent être représentées sous forme d'un ensemble de règles de production.

*Le côté « THEN » de la règle présente les actions qui devraient être exécutées lorsque les conditions présentées dans le côté « if » sont satisfaites. Les conditions peuvent être liées aux objectifs de résolution du problème ou à des données factuelles (faits énoncés dans le problème). Ces faits sont désignés sous le nom « d'éléments de mémoire de travail » (working memory elements) par la théorie cognitive ACT-R.*

3) Au début, l'apprenant réalise une tâche en appliquant des procédures « faibles » à la structure des connaissances déclarative. ⇒ Pour la modélisation des connaissances dans un système tutoriel, il faut fournir des informations sur le contexte de résolution du problème et permettre un développement progressif des connaissances de l'apprenant vers la compétence visée.

*En complément des informations contextuelles fournies sur le processus de résolution du problème, des règles représentant les erreurs courantes ou probables connues susceptibles d'être reproduites par l'apprenant. Leur représentation dans des règles permet au modèle d'identifier facilement ces erreurs et de fournir des messages de guidage précis à l'apprenant.*

4) L'application de règles de production faibles sur les connaissances déclaratives est à l'origine de règles de production spécifiques aux tâches. Ce type de règles spécifiques sous-tendent de meilleures performances ⇒ Le système tutoriel doit donc fournir des rétroactions immédiates sur les efforts de réalisation en cours.

*Quand la tâche réalisée par l'apprenant correspond à une règle de production correcte, le système lui permet de visualiser la validité de sa performance, en surlignant l'étape correctement réalisée par exemple.*

5) Avec l'augmentation des pratiques, les règles de production peuvent être concaténées pour fournir des règles de plus grande échelle ⇒ Le système tutoriel doit ajuster la taille des étapes de résolution avec la progression de l'apprentissage

*Il s'agit de produire des règles dont la concaténation permet de relever le niveau d'effort cognitif à fournir pour atteindre les compétences ciblées.*

6) L'apprenant retient l'état courant du problème en cours de résolution dans un espace limité de mémoire de travail ⇒ Le système tutoriel doit réduire au minimum la charge de mémoire de travail exigé.

*La progression de l'apprenant ne doit pas être compromise par des exigences cognitives trop élevées. En d'autres mots, les faits nécessaires à la résolution de problème doivent être pertinents, ciblés sur le problème courant, clairs et facilement interprétables, et présentés de manière à ne pas submerger l'apprenant.*

Les règles de production devaient être produites manuellement par la méthode d'analyse cognitive de tâches , jusqu'à l'apparition d'outils qui ont permis d'automatiser le processus par l'extraction ou l'apprentissage des règles à partir de démonstrations réalisées par des experts ou des tuteurs humains. Des outils tel que CTAT *(Cognitive Tutor Authoring Tool)* [Koedinger *et al.* 2003 ; 2004] ont grandement facilité le processus de modélisation des connaissances et de l'apprenant pour cette catégorie de systèmes tutoriels en fournissant un espace de création permettant de mutualiser différents outils d'acquisition et de représentation des connaissances du domaine, de modélisation de l'apprenant et de production de services tutoriels.

### 2.4.2. Modélisation orientée contraintes

Contrairement à l'approche par traçage de modèle, l'approche de modélisation par contraintes [Mitrovic, 1998] part du prédicat que l'apprentissage se réalise progressivement par erreurs-corrections [Ohlsson, 1996]. Sous cet angle, il est préférable de laisser l'apprenant acquérir la maîtrise des connaissances du domaine en lui signalant les erreurs à éviter lorsque c'est nécessaire au lieu de le restreindre à se calquer sur des bonnes pratiques prédéfinies (les règles de production). L'objectif est de lui permettre d'assimiler par la pratique les connaissances déclaratives qui se rapportent aux connaissances procédurales et d'aboutir *in fine* à une maîtrise de ces dernières en réduisant progressivement les erreurs commises.

Cette approche constitue aussi une alternative plus flexible pour la modélisation des domaines comparée à l'approche de traçage de modèle. Cette flexibilité se manifeste principalement à deux niveaux. Tout d'abord, la modélisation par contraintes réduit l'effort de modélisation en se concentrant sur les contraintes devant être respectées pour arriver à une résolution correcte d'un problème donné. Elle évite de ce fait d'avoir à formaliser toutes les procédures de résolution de problèmes du domaine [Mitrovic *et al.* 2003 ; Martin, 2001]. De plus, n'étant pas confronté à la rigidité des règles de production, l'apprenant est plus libre d'explorer des stratégies de résolution inédites tant que des contraintes ne sont pas violées. Cette propriété rend par-là même l'approche de modélisation orientée contraintes adaptée aux cas pour lesquels il est difficile ou impossible de définir des stratégies fixes de résolution [Mitrovic *et al.* 2001].

L'efficacité de l'approche de modélisation orientée contraintes a été démontrée pour des tuteurs dédiés à des domaines impliquant des concepts riches et complexes tels que le langage de requête de base de données relationnelles SQL (SQL-Tutor : [Mitrovic 1998]). Elle a aussi été appliquée avec succès à des domaines mal-définis tels que la modélisation de bases de données (KERMIT : [Suraweera & Mitrovic, 2001]) ou l'implémentation dans un langage de programmation (INCOM/Prolog : [Le & Menzel, 2008]).

### 2.4.3. Modélisation orientée contrôles

L'approche de modélisation orientée contrôle [Minh Chieu *et al.* 2010] est dérivé du modèle CK¢ proposé par Balacheff (1995, 2005) à l'origine pour la représentation des connaissances dans le domaine des mathématiques. Le modèle CK¢ s'appuie sur deux théories : (1) la théorie des situations didactiques (TSD) de Brousseau (1998) et (2) la théorie des champs conceptuels de Vergnaud (1990).

La Théorie des Situations Didactiques considère l'apprenant dans le contexte d'un milieu d'apprentissage avec lequel il interagit. Sous cet angle de vue, l'état des connaissances de l'apprenant se définit par l'équilibre entre le sujet et le milieu et les rétroactions que lui envoie ce dernier.

Le modèle CK¢ adapte ce concept en considérant que l'apprenant et le milieu constitue une entité unique, un système qui devrait être pris dans son ensemble pour toute considération cognitive, par opposition à l'évaluation cognitive de l'apprenant seul. L'état des connaissances de l'apprenant se conçoit de ce fait dans une situation particulière donnée. L'état de connaissance de l'apprenant et la situation dans laquelle il est considéré est désigné sous le terme de conception.

Formellement, le modèle CK¢ définit une conception C comme un quadruplet (P, R, L, Σ) tel que, un problème p de P est résolu si et seulement si, il existe r de R et s de Σ tel que s(r(p)) = vrai.

- P, un ensemble de problèmes représentant le domaine de validité de C, i. e, l'ensemble des problèmes que C permet de résoudre
- R, un ensemble d'opérateurs ou actions pouvant agir sur les éléments de P. Un opérateur peut être une règle de production ou un comportement
- L, un système de représentation ou d'expression des éléments des ensembles P et R
- Σ, une structure de contrôles. Les contrôles représentent des éléments de décision. Ces éléments de décision peuvent être des faits, des contraintes ou encore des connaissances théoriques qui permettent de vérifier la validité de l'emploi d'un opérateur (d'une action) dans le contexte de la conception ou de confirmer l'état résolu ou non résolu d'un problème. En d'autres mots, les éléments de Σ assure la cohérence de C.

Baghera [Pesty *et al.* 2003] est une illustration de l'efficacité de la formalisation des connaissances en géométrie selon le modèle CK¢. Minh Chieu, Luengo et Vadcard (2010) ont adapté par la suite le modèle CK¢, dans le cadre de la création du STI TELEOS [Luengo *et al.* 2006] au domaine de la chirurgie orthopédique percutanée. L'adaptation désignée sous le nom de *modélisation orientée contrôles*, est exploitée dans le but de formaliser les connaissances déclaratives et procédurales qui constituent une partie des connaissances du domaine (voir section *« 4.2.2. Représentation des connaissances »*).

### 2.4.4. Diagnostic des connaissances de l'apprenant

Le modèle de l'apprenant est une représentation de l'état de ses connaissances inféré par un diagnostic didactique [Brusilovskiy, 1994]. Précisions que le modèle de l'apprenant n'est pas restreint aux connaissances et peut contenir des données comportementales ou perceptuelles qui permettent d'inférer, plus que l'état de ses connaissances, son état affectif [Fransson & Chalfoun, 2010]. Nous ne détaillons pas cet aspect dans le cadre de notre travail et nous concentrons sur le diagnostic des connaissances.

Dans un STI, le diagnostic des connaissances est un processus qui prend en entrée les traces d'activité de l'apprenant à partir de l'interface, évalue celles-ci au regard des connaissances du domaine et renvoie les résultats définissant l'état de ces connaissances (ex : acquis ou non acquis, validé ou échoué, correct ou incorrect). L'ensemble de ces résultats constitue le modèle de l'apprenant [Aleven, 2010].

Au-delà des formalismes de représentation des connaissances, nous nous intéressons dans cette section à l'implémentation du diagnostic qui permet de générer ce modèle, c'est-à-dire, aux techniques utilisées pour calculer l'état des connaissances de l'apprenant. Nous les passons en revue dans les paragraphes suivants sous deux grandes catégories : 1) les approches déterministes et 2) les approches probabilistes.

### Les approches déterministes

Partant du principe que le domaine peut être modélisé de manière exhaustive, les approches déterministes ne se préoccupent pas de la représentation de l'incertitude dans le diagnostic des connaissances de l'apprenant. Dans cette catégorie, les principales approches sont le traçage de modèle et les systèmes à base de règles [Woolf, 2010]. Le traçage de connaissances permet de tracer les connaissances de l'apprenant à chaque étape de résolution de problème en fonction d'une suite définie de règles de production. Les éléments de connaissances *(« knowledge components »)* nécessaires à la réalisation d'une tâche peuvent ainsi être diagnostiqués de manière certaine comme acquis ou non acquis. Les approches orientées contraintes utilisent un système à base de règles *« IF-THEN »* qui ne prend pas non plus en compte l'incertitude : toute interaction violant une contrainte est considérée comme incorrecte et les connaissances y afférentes, non acquises [Mitrovic, 2010].

### Les approches probabilistes

Les approches probabilistes permettent de prendre en compte l'incertitude dans le diagnostic des connaissances de l'apprenant. L'estimation qu'un élément de connaissance est acquis ou non-acquis, correct ou incorrect, est évaluée avec un certain degré d'incertitude représentée par des probabilités [Sison & Shimura, 1998 ; Woolf, 2010]. Ces approches sont appliquées par le biais de l'exploitation de divers paradigmes de l'intelligence artificielle tels que, par exemple, la logique floue, la régression logistique, la reconnaissance de plan *(« plan recognition »)* et les réseaux bayésiens [Woolf, 2010].

Ces approches se distinguent selon que leurs paramètres ou leurs données d'entrée proviennent d'une analyse du domaine impliquant des experts ou de l'extraction automatique de connaissances par des algorithmes d'apprentissage automatique. Par exemple, Mayo & Mitrovic (2001) font la différence entre les réseaux bayésiens centrés experts et les réseaux bayésiens centrés données.

Les réseaux bayésiens centrés experts sont construits directement ou indirectement par les experts du domaine à partir des résultats d'une analyse du domaine. Des STI tels que HYDRIVE [Mislevy & Gitomer, 1995], ANDES [Conati *et al.* 1997] et TELEOS [Minh Chieu *et al.* 2010] utilisent cette technique pour la construction du diagnostic de l'apprenant.

Les réseaux bayésiens centrés données se construisent à partir des paramètres résultant de l'exploitation automatique de données d'interaction. La structure du réseau bayésien peut ainsi être ajustée si nécessaire de la même manière sans l'intervention d'experts du domaine. Cette approche est utilisée pour l'implémentation du diagnostic de l'apprenant dans les STI MANIC [Stern *et al.* 1999] et CAPIT [Mayo *et al.* 2000].

Mayo et Mitrovic (2001) font mention d'une troisième catégorie de réseaux bayésiens qui se distinguent plus par l'approche d'implémentation de leur structure que par l'origine de leurs paramètres. Il s'agit des réseaux bayésiens centrées performances. En effet, ces réseaux bayésiens sont construits en adéquation avec des spécifications préétablies qui visent à optimiser les performances d'une fonctionnalité du système telle que par exemple, les performances d'évaluation [Collins *et al.* 1996 ; Reye, 1998].

#### Modélisation cognitive et implémentations probabilistes

Nous tenons à attirer l'attention ici sur le fait que les approches déterministes et probabilistes ne sont pas mutuellement exclusives et peuvent être exploitées dans un même STI. En effet, certains systèmes intègrent un module de diagnostic des connaissances construits par une approche cognitive et exploitent parallèlement un module de diagnostic probabiliste pour enrichir le modèle. C'est le cas par exemple de CAPIT [Mayo *et al.* 2000] dont le modèle de l'apprenant suivent l'approche orientée contraintes mais utilise un outil complémentaire exploitant un réseau bayésien pour enrichir le diagnostic de l'apprenant.

D'autre systèmes exploitent une approche cognitive pour la construction du modèle du domaine et utilise une approche probabiliste pour générer le modèle de l'apprenant. ANDES est un exemple de STI utilisant cette démarche. En effet, ANDES est un *Cognitive Tutor* dédié à la physique qui exploite un réseau bayésien pour diagnostiquer les connaissances de l'apprenant.

SimStudent [Matsuda *et al.* 2007] est un module de l'outil d'aide à la conception de Cognive Tutors, CTAT [Koedinger *et al.* 2003 ; 2004], qui permet d'utiliser une approche d'apprentissage automatique, la régression logistique, dans le but d'enrichir le modèle de l'apprenant [Li *et al.* 2011]. Ce travail se positionne dans le cadre plus général de la proposition de Cen, Koedinger et Junker (2006) sur l'analyse de facteurs d'apprentissage *(« Learning Factors Analysis »)* visant à exploiter conjointement des modèles statistiques, la recherche combinatoire et l'expertise humaine pour améliorer les modèles de l'apprenant dans les *Cognitive Tutors*.

### 2.4.5. Positionnement

Dans notre cas d'étude, les connaissances sont modélisées selon l'approche orientée contrôles CK¢ et représentée dans un réseau bayésien centré expert. Ce dernier permet d'inférer le modèle de l'apprenant [Minh Chieu *et al.* 2010] et le guidage didactique adapté à l'état de ses connaissances [Mufti-Alchawafa *et al.* 2006 ; Mufti-Alchawafa & Luengo, 2009]. Les rétroactions didactiques et pédagogiques sont soumises à l'apprenant à la fin de chaque session de simulation. Elles consistent en un résumé de ses actions avec les évaluations correspondantes ainsi que, selon la performance globale réalisée, un aiguillage vers des cours théoriques à réviser, des cas à explorer ou de nouveaux exercices de simulation à réaliser. Nous présentons en détails les modèles du domaine et de l'apprenant ainsi que les différents services tutoriels du cas d'étude de cette thèse dans la section 4.2 du manuscrit.

## 2.5. Resume et Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'architecture générale des Systèmes Tutoriels Intelligents, soit les différents modules qui les composent et les services tutoriels qu'ils permettent de produire. Un accent particulier a été mis sur la place des perceptions et des gestes au côté des connaissances dans la production de ces services tutoriels. Nous avons ensuite passé en revue les

principales approches proposées dans la littérature pour l'acquisition et la modélisation des connaissances du domaine et de l'apprenant dans les STI et avons détaillé les techniques d'implémentation du modèle de l'apprenant.

Nous avons marqué à chaque étape le positionnement de notre travail. Notre cas d'étude est un système tutoriel orienté simulation dédié à la chirurgie orthopédique percutanée. Les connaissances du domaine ont été modélisées selon l'approche orientée contrôles CK¢, le modèle de l'apprenant est généré par diagnostic didactique dans un réseau bayésien centré expert. Le domaine est mal-défini et les connaissances du domaine sont perceptivo-gestuelles. Nous discutons, dans le chapitre suivant, des limites des approches classiques présentées dans cette section face aux spécificités de ce type de domaines. Nous discutons aussi des propositions visant à adresser les défis que ces spécificités opposent à la conception de services tutoriel dans les STI.

# CHAPITRE 3.

# SYSTEMES TUTORIELS INTELLIGENTS ET DOMAINES MAL-DEFINIS

*Dans ce chapitre, nous présentons les approches de l'état de l'art adaptées à la modélisation d'une catégorie spécifique de domaines : les domaines mal-définis (voir « Introduction » pour une définition détaillée). Les spécificités de ce type de domaines peuvent être difficilement appréhendées par les paradigmes classiques de l'état de l'art présentés dans le chapitre précédent. Nous décrivons les principales limites de ces paradigmes avant de passer en revue les propositions formulées dans la littérature pour la production de services tutoriels adaptés aux spécificités des domaines mal-définis.*

## Sommaire

**3.1. Limites des Paradigmes Classiques ..... 51**
3.1.1. Limites du traçage de modèle ..... 51
3.1.2. Limites des modélisations par contraintes et par contrôles ..... 51
**3.2. Les Paradigmes Adaptés ..... 52**
3.2.1. Fournir une structure aux domaines mal-définis ..... 52
3.2.2. L'approche hybride : Fournier-Vigier *et al.* ..... 53
3.2.3. Discussion et positionnement ..... 54
**3.3. Conclusion ..... 54**

## 3.1. LIMITES DES PARADIGMES CLASSIQUES

### 3.1.1. Limites du traçage de modèle

L'approche de traçage de modèle a fait ses preuves pour la modélisation, la représentation et l'évaluation de connaissances procédurales. En effet, l'approche de traçage de modèle permet de suivre les performances de l'apprenant à chaque phase de résolution d'un problème. Il rend ainsi possible la mise en place de services tutoriels clés à l'instar des rétroactions pédagogiques immédiates et ciblées. Cependant, cette efficacité se limite aux domaines bien définis. Ce modèle est en effet difficilement applicable à des domaines mal-définis où l'ensemble des connaissances est impossible à cerner de manière exhaustive.

De plus, la méthodologie de suivi de l'apprenant par l'approche de traçage de modèle suit les performances de l'apprenant en considérant qu'elles sont « invalides jusqu'à preuve du contraire », c'est-à-dire, jusqu'à la confirmation que la règle de production correspondante a été satisfaite. Cela peut conduire à des imprécisions dans le diagnostic des connaissances de l'apprenant dans les cas où les éléments de connaissances mis en application par celui-ci ne sont pas présents dans les règles de production modélisées [Mitrovic *et al.* 2003].

### 3.1.2. Limites des modélisations par contraintes et par contrôles

Les modèles orientés contraintes et contrôles se préoccupent non pas des phases de résolution d'un problème, mais des différents états du processus de résolution. Ils laissent libre cours à l'apprenant dans le choix de sa stratégie. Ils évaluent ses connaissances selon la satisfaction ou non des contraintes correspondant à chaque état. Bien que l'implémentation de ces modèles consomme moins de temps et d'effort que l'approche par traçage de modèle, il est quand même nécessaire de définir un grand ensemble de contraintes ou de contrôles représentant le maximum de stratégies typiques possible. Cela représente une tâche ardue et qui ne peut être que partielle pour les domaines mal-définis, a fortiori, lorsque ces domaines impliquent des concepts, stratégies ou compétences complexes.

De plus, tout comme le traçage de modèle, les approches de modélisation orientées contraintes et orientées contrôles peuvent être sujettes à des imprécisions dans le diagnostic des connaissances de l'apprenant. En effet, ces approches considèrent que les actions de l'apprenant sont « valides jusqu'à preuve du contraire », c'est-à-dire, jusqu'à ce qu'une contrainte ou un contrôle soit violé. De ce fait, les stratégies de résolution erronées n'ayant pas été implémentées seront considérées comme valides [Mitrovic *et al.* 2003].

Enfin, la modélisation orientée contrôles, spécifiquement le modèle Ckc, présente deux difficultés théoriques et méthodologiques liées aux notions de contrôles et d'opérateurs dans le processus de modélisation des connaissances. En effet, (1) il peut être difficile de formaliser les contrôles car ils sont souvent implicites (2) la distinction entre contrôles et opérateurs n'est pas absolue mais relative à une conception [Mithalal, 2010].

## 3.2. LES PARADIGMES ADAPTES

### 3.2.1. Fournir une structure aux domaines mal-définis

Pour adresser les limites mentionnées dans les sections précédentes, certains travaux proposent de fournir une structure au domaine mal-défini dont on veut modéliser les connaissances [Simon, 1973]. L'objectif est de créer un espace du domaine dans lequel des paradigmes classiques peuvent être exploités.

#### Modéliser un espace de solutions : Le & Menzel

Le et Menzel (2008) ont adopté cette approche pour définir un espace de solutions pour le domaine de la programmation logique en Prolog. La programmation est un domaine de conception et de ce fait est mal-défini [Lynch *et al.* 2006]. Il n'existe pas de point de départ clair aux solutions et il peut exister plusieurs alternatives de solutions à un même problème. En outre, certaines tâches, comme l'amélioration ou l'optimisation de codes, sont subjectives et non exhaustives.

A défaut de disposer de paradigmes adaptés pouvant assurer le diagnostic des connaissances et le guidage pédagogique de l'apprenant, les auteurs déterminent un espace de solutions fini du domaine. Pour réaliser ce modèle, ils utilisent l'approche de modélisation orientée contraintes. L'espace de solution modélisé comprend deux classes de contraintes : (1) des contraintes dites sémantiques permettant de vérifier l'adéquation des solutions de l'apprenant avec des exigences spécifiques définies pour le problème à résoudre ; (2) des contraintes générales liées au langage Prolog permettant de vérifier que la solution proposé respecte les principes généraux du langage de programmation logique Prolog.

#### Générer dynamiquement un modèle de référence : Moritz & Blank

Moritz et Blank (2008) adoptent une approche semblable pour la production de services tutoriels dans le STI DesignFirst-ITS dédié au domaine de la modélisation objet avec UML. A l'instar de la programmation, la modélisation est un domaine de conception et est mal-défini. Il n'existe en effet pas de solution unique ou d'ensemble de solutions exhaustif et incontestable à un problème de modélisation UML donné. De plus, certains concepts du domaine et la définition des relations entre ces concepts sont poreux et abstraits et de ce fait potentiellement sujets à des interprétations subjectives.

Pour pouvoir diagnostiquer et évaluer les solutions de l'apprenant à un problème donné, le STI intègre un module dont le rôle est de définir un ensemble de solutions de référence au problème. Le modèle de référence ainsi défini peut être revu et modifié par le tuteur humain si nécessaire. L'évaluation de l'apprenant est réalisée en confrontant ses solutions à celles représentées dans ce modèle de référence.

#### Adapter les paradigmes classiques aux spécificités du domaine : Ogan *et al.*

Ogan, Wylie et Walker (2006) propose une alternative visant à fournir une certaine structure au domaine mal-défini sans le simplifier à outrance dans un modèle hermétique. Pour ce faire, elles proposent d'adapter des paradigmes traditionnels de modélisation aux spécificités du domaine mal-défini. Leur cas d'étude est l'apprentissage de la conjugaison en français, plus précisément, l'usage du passé composé et de l'imparfait de l'indicatif. Quoique disposant d'un point de départ et d'un point de validation fixes, un problème de conjugaison de ce type implique des tâches de résolution mal-définies. En effet, il n'existe pas de cheminement spécifique pour arriver à la

solution. Il est en outre difficile de définir formellement les règles pouvant être appliquées à la réalisation de ces tâches ; les conditions d'application de ces règles sont nombreuses et il est possible que plusieurs règles soit applicables à une même tâche.

Pour modéliser le domaine, les auteures ont utilisé l'approche d'analyse cognitive de tâches [Anderson, 1993]. Au cours de cette étape, des experts ont été sollicités dans l'objectif de modéliser le domaine ainsi que des novices, dans le but de définir les mécanismes de modélisation de l'apprenant.

Des règles de production ont pu ainsi être identifiées. Cependant, dans un souci de flexibilité considérant le caractère mal-structuré des tâches du domaine, l'application des règles n'exige pas d'ordre spécifique évitant ainsi de contraindre l'apprenant à une reproduction stricte des solutions expertes. De plus, pour résoudre un problème donné, des heuristiques telles que la mise en contexte de la phrase dans un paragraphe ou sa traduction dans la langue maternelle (l'anglais), sont prises en compte comme alternatives ou en complément des règles de production. Le modèle est affiné dans un deuxième temps par des données collectées à partir des explications exprimées à voix haute par les sujets tout au long des démonstrations de résolution. Les résultats préliminaires démontrent que cette démarche d'adaptation de paradigmes classiques peut constituer une piste pertinente pour la production de services tutoriels pour des domaines-mal-définis.

### 3.2.2. L'approche hybride : Fournier-Vigier *et al.*

Fournier-Vigier *et al.* (2011) proposent une approche de modélisation hybride dans le but de pallier les limites des approches classiques, lorsqu'elles sont utilisées seules, face aux domaines mal-définis. Cette proposition a été exploitée dans le cadre des travaux sur le STI CanadarmTutor. Ce STI a été conçu pour entrainer les astronautes de la station spatiale internationale à la manipulation d'un bras robotique articulé. Il intègre un environnement en 3D où les apprentis s'entrainent à faire passer le bras d'une configuration initiale à une configuration prédéterminée. Ce domaine est mal-défini car il n'y a pas de point de départ optimal pour atteindre la configuration ciblée et il n'existe pas de stratégie claire pour la manipulation du bras au cours de sa progression entre la configuration d'origine et la configuration ciblée. En outre, le domaine implique différentes catégories de connaissances : déclaratives, procédurales et spatiales. Ces dernières sont liées aux habiletés motrices liées aux gestes nécessaires pour appliquer les configurations voulues au bras robotisé.

Pour couvrir les différentes catégories de connaissances mises en jeu pour un cas de résolution de problème, les auteurs exploitent différents paradigmes qui s'activent dans les situations où ils sont les plus adaptés. Le traçage de modèle est utilisé pour fournir des suggestions de parcours de résolution à l'apprenant et pour l'évaluation de ses choix de parcours. Cette technique est aussi à la base des aides et indices fournis tout au long de la session et de l'évaluation des connaissances déclaratives de l'apprenant par des questions. Pour les tâches mal-définies, liées principalement aux gestes de manipulation du bras, les services tutoriels modélisés par des techniques de datamining sont utilisés. Il s'agit de modèles de tâche partiels extraits automatiquement et utilisés pour enrichir la base de connaissances du système et pour évaluer l'apprenant lorsqu'il utilise des enchaînements d'actions proches de modèles de tâches existant dans la base de connaissances.

L'évaluation expérimentale de cette proposition confirme l'efficacité de la méthode par l'amélioration des services tutoriels découlant de la synergie des différentes approches et la réduction de leurs limites respectives.

### 3.2.3. Discussion et positionnement

Les propositions décrites représentent des pistes prometteuses pour faciliter la conception et la modélisation de services tutoriels pour des domaines mal-définis en exploitant des techniques classiques. Cependant, nous devons relever certaines limites importantes au regard de notre cas d'étude.

L'une des limites concerne la démarche d'adaptation des paradigmes traditionnels qui consiste à forcer la représentation des domaines mal-définis dans un modèle fermé plus facile à éliciter. La conséquence directe envisageable est l'inadéquation de la préparation de l'apprenant dans un cadre spécifique avec les conditions réelles d'application de son apprentissage exemptes d'une telle structure. De plus, cette représentation fermée du domaine exclut des services tutoriels du STI les éventuelles alternatives valides qui ne sont pas représentées dans l'espace de solution défini dans le modèle.

Les auteurs reconnaissent aussi la limite de l'efficacité de ces approches pour des domaines encore plus mal définis que ceux étudiés [Ormerod, 2006]. La même réserve est gardée pour des domaines plus complexes tels que des domaines impliquant des tâches mobilisant la coordination d'un ensemble d'opérations, d'habiletés et de composantes nécessaires à leur réalisation [Morisette, 2002]. C'est le cas de la chirurgie orthopédique percutanée dont la pratique requiert une coordination entre des connaissances théoriques, un guidage visuel, des performances gestuelles et l'adaptation des gestes sur la base d'interprétations perceptuelles.

L'approche hybride permet de modéliser des situations d'apprentissage complexes. De plus, les techniques de fouilles de données utilisées facilitent l'enrichissement de l'espace des connaissances du domaine et l'amélioration du modèle de l'apprenant de manière progressive à chaque utilisation de l'environnement d'apprentissage. Cependant, la résolution d'un problème est souvent constituée de phases hétérogènes impliquant l'utilisation de mécanismes différents. Par exemple, certaines actions peuvent être observées plus souvent dans certaines phases que dans d'autres, et d'autres actions, exclusivement dans des phases spécifiques. Il existe donc une hétérogénéité interne dans les données d'interaction de l'apprenant qui doit être prise en compte dans le processus d'extraction automatique des connaissances par les algorithmes de fouille de données. Dans le cas contraire, les actions importantes au regard d'une phase de résolution, sous-représentées dans l'ensemble des traces, sont considérées comme négligeables par ces algorithmes et de ce fait ignorées. Nous nous intéressons à des solutions algorithmiques pouvant prendre en compte ce type d'interaction dont l'importance se conçoit dans une phase de résolution.

## 3.3. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons discuté des limites des paradigmes traditionnels de la littérature pour la modélisation et la production de services tutoriels au sein de STI dédiés aux domaines mal-définis. Nous avons ensuite présenté des travaux proposant des alternatives d'adaptation de ces paradigmes pour répondre aux défis posés par les spécificités de ce type de domaines puis, une approche hybride visant à combiner plusieurs paradigmes de manière à positionner chaque paradigme sur l'aspect du domaine qui lui correspond.

Cependant, en ce qui concerne les techniques de fouille de données éducationnelles, nous relevons une inadéquation des algorithmes quant à la prise en compte des phases de résolution des

exercices. D'une manière générale, les approches proposées n'adressent pas les défis posés par la production de services tutoriels pour des domaines mal-définis complexes impliquant des connaissances multimodales telle que la chirurgie orthopédique percutanée. La prochaine partie du manuscrit détaille ces défis par une description du domaine, de ses spécificités et du STI dédié, TELEOS.

# PARTIE 2
# CAS D'ETUDE

# CHAPITRE 4.
# LE DOMAINE DE LA CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE PERCUTANEE ET LE SYSTEME TUTORIEL INTELLIGENT TELEOS

*Dans ce chapitre, nous présentons le cas d'étude de la thèse : le domaine de la chirurgie orthopédique percutanée et le STI dédié à ce domaine, TELEOS. Nous décrivons spécialement les spécificités du domaine, notamment la nature perceptivo-gestuelle de ses connaissances et son caractère mal-défini. Nous présentons ensuite les services tutoriels offerts par TELEOS pour répondre à ces spécificités ainsi que leurs limites.*

## Sommaire

**4.1. La Chirurgie Orthopédique Percutanée ..... 59**
4.1.1 L'enseignement du domaine ..... 59
4.1.2 Le caractère perceptivo-gestuel des connaissances ..... 60
4.1.3 Le caractère mal-défini du domaine ..... 61
**4.2. Le Système Tutoriel Intelligent TELEOS ..... 62**
4.2.1 Architecture et fonctionnement ..... 63
4.2.2 Représentation des connaissances ..... 64
4.2.3 Diagnostic des connaissances ..... 65
4.2.4 Rétroactions épistémiques ..... 67
**4.3. Discussion et Conclusion ..... 68**

## 4.1. LA CHIRURGIE ORTHOPEDIQUE PERCUTANEE

Dans cette section, nous présentons le domaine d'application de cette thèse : la chirurgie orthopédique percutanée. Cette dernière s'inscrit dans la catégorie des interventions chirurgicales dites « mini-invasives » qui se réalisent à travers de petites incisions effectuées sur la peau du patient pour le passage des outils chirurgicaux. Le chirurgien est guidé dans son geste par imagerie médicale et les résistances ressenties par l'intermédiaire de ses outils au contact de différentes parties de l'anatomie du patient sur leur trajectoire d'insertion. Dans les sections qui suivent nous présentons la méthodologie de transmission des connaissances de l'expert au novice dans ce domaine ; puis nous décrivons la nature perceptivo-gestuelle de ces connaissances et enfin, le côté mal-défini du domaine.

### 4.1.1 L'enseignement du domaine

La chirurgie est un domaine au sein duquel la transmission des connaissances de l'expert à l'interne est difficile dans la mesure où une partie de ces connaissances est perceptivo-gestuelle. En effet, il s'agit des connaissances empiriques liées aux gestes chirurgicaux. Au cours d'une intervention en chirurgie percutanée, la dimension perceptuelle (visualisation des radiographies, retour haptique de la manipulation des outils) est intimement liée au savoir-faire gestuel qui est pour sa part empirique, et aux connaissances déclaratives nécessaires à la prise de décisions adaptées aux spécificités d'une intervention (cas clinique du patient, validation des radiographies). Les connaissances perceptuelles et gestuelles sont tacites et difficiles à expliciter exclusivement à l'oral par les experts chirurgiens. Elles sont accessibles aux apprentis uniquement par la pratique *in situ*, sous la supervision d'un expert selon le mode de compagnonnage [Vadcard, 2003].

En effet, le chirurgien apprenant acquiert son savoir-faire et son autonomie par la répétition fréquente de mises en situations dans une même catégorie d'interventions chirurgicales. L'objectif de ces pratiques est de le familiariser aux nombreuses variations de paramètres pouvant se produire au cours d'une intervention et de l'amener à acquérir de la rapidité et de l'assurance dans l'exécution du geste chirurgical ainsi que la capacité de prise de conscience et d'autoréflexion sur sa pratique. Cependant, l'apprenant est plus souvent confronté à des interventions de catégories différentes qu'à des situations typiques, variées et variables au sein d'une même catégorie, qui pourraient lui permettre d'approfondir et consolider sa pratique.

Il existe donc un écart entre les contenus de la formation théorique et les besoins de la pratique dans l'enseignement du métier de chirurgien [Vadcard, 2003] : la formation théorique n'est pas orientée vers la résolution de problèmes en situation réelle, et la situation réelle, n'étant pas construite à des fins didactiques, ne permet pas toujours à l'apprenant de prendre le temps nécessaire à l'assimilation du cheminement de résolution des problèmes en présence [Bisseret, 1995].

Dans ce travail de recherche, nous nous concentrons sur les cas liés à la réalisation de la vertébroplastie. La vertébroplastie est une opération chirurgicale orthopédique percutanée pratiquée pour soigner les fractures vertébrales par l'injection d'un ciment médical pour la réparation de la fracture et l'apaisement des douleurs qu'elles provoquent.

### 4.1.2 Le caractère perceptivo-gestuel des connaissances

Au cours d'une intervention percutanée, le chirurgien ne dispose pas d'une visibilité directe de la progression de ses outils contrairement aux opérations chirurgicales classiques. Le guidage s'effectue dans ce type d'opération par le biais d'imageries médicales (scans ou radiographies) qui renvoient au chirurgien les informations sur la trajectoire de ses outils à travers le corps du patient. En vertébroplastie, les images médicales utilisées sont des radiographies générées tout au long de l'opération grâce à un « fluoroscope ».

L'interprétation des radiographies à des fins de guidage est une habileté cognitive qui requiert la coordination de la représentation en deux dimensions renvoyée par ces radiographies avec la prise d'information en trois dimensions dans le monde réel. De manière plus précise, la position des instruments chirurgicaux, relativement à l'environnement anatomique sur sa trajectoire, se conçoit sur trois dimensions. Par exemple, le positionnement complet du trocart est fournie par la combinaison de son positionnement sur l'axe antérieur (la profondeur d'insertion du trocart dans le corps du patient), son positionnement sur l'axe transversal (la position de la pointe de l'outil relativement aux limites droite et gauche du corps du patient) et son positionnement sur l'axe longitudinal (la position de la pointe de l'outil relativement à l'axe défini par la tête et les membres inférieurs du patient). Cependant, les radiographies de guidage ne peuvent fournir qu'une représentation sur deux dimensions du positionnement des outils : les radios de face indiquent le positionnement sur l'axe transversal et l'axe longitudinal, et les radios de profil, sur les axes antéro-postérieur et longitudinal. Le positionnement réel des outils tout au long de leur trajectoire percutanée ne peut donc se faire que par le couplage d'au moins deux radiographies, soit au moins une radiographie fournissant une vue du point d'entrée du trocart (radiographie de face) et une radiographie fournissant une vue du point de progression du trocart (radiographie de profil) (*Cf.* Figure 4.1).

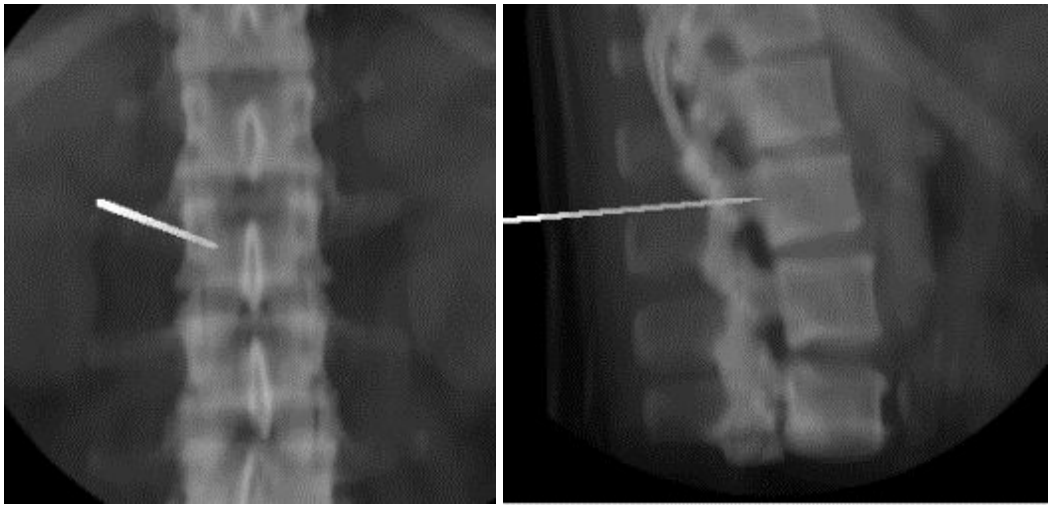


Figure 4.1. Vue « point d'entrée » (radiographie de face) et vue « progression » (radiographie de profil) du trocart.

Ainsi, le chirurgien valide ses gestes et ses actions sur la base des contrôles visuels de ces radiographies. Ce travail de validation s'effectue par l'analyse du positionnement de certains points précis de l'anatomie du patient. De ce fait, cette analyse perceptuelle constitue une facette de l'ensemble des connaissances à maitriser par le chirurgien.

Les connaissances mises en jeu pour la réalisation du geste chirurgicale percutané comprennent une autre facette perceptuelle. Il s'agit des perceptions haptiques ressenties sur la trajectoire des outils chirurgicaux. Ces perceptions sont les résistances perçues par le chirurgien au contact de ses outils avec différentes parties de la zone anatomique traversée sur la trajectoire d'insertion de ces outils. Ces perceptions renvoient des informations sur la progression des outils sur la base desquelles le chirurgien adapte aussi son geste en complément des informations visuelles recueillies à travers les radiographies.

La réussite d'une opération chirurgicale percutanée requiert donc la maîtrise de la coordination des analyses visuelles des radiographies, des connaissances anatomiques, de l'interprétation des résistances ressenties sur l'outil à différents points de progression en complément des connaissances théoriques sur l'anatomie humaine.

### 4.1.3 Le caractère mal-défini du domaine

La chirurgie est classée parmi les domaines mal-définis car, en dépit de l'existence de règles et de contrôles relative à la réalisation idoine d'une intervention chirurgicale, il n'existe pas de procédures spécifiques exhaustives ou un domaine théorique formel du geste chirurgical.

L'une des principales illustrations de ce cas constitue le guidage par radios. Il n'existe pas de procédure définie pour la performance de représentation mentale que constitue cette tâche essentielle de guidage. Chaque chirurgien peut utiliser des techniques qui lui sont propres.

Il en va de même de la manipulation de l'appareil de radioscopie ou fluoroscope. En effet, le fluoroscope est soit positionné pour des radios de face, soit positionné pour des radios de profil. Le passage de l'une à l'autre des positions, dans le cas par exemple de prises alternées de radios de face et de profil, nécessite de bouger l'appareil. Le chirurgien doit pouvoir réaliser ces manipulations en usant de techniques qui lui permettent de réduire le temps nécessaire au positionnement de l'appareil dans l'une ou l'autre des configurations. Les solutions adoptées par les chirurgiens tant pour identifier et cibler la vertèbre d'intérêt avec le fluoroscope que pour retrouver rapidement à chaque déplacement de l'appareil, l'inclinaison adaptée pour les configurations face et profil, relèvent plus d'astuces personnelles que de procédures établies.

La dimension mal-définie du domaine se situe aussi au niveau de la prise de décision relative à la meilleure trajectoire d'insertion des outils à adopter selon le cas clinique du patient. En effet, il existe trois principales catégories de trajectoires d'insertion possibles : (1) les approches antérolatérale et postérolatérale ; (2) les approches transpédiculaires (3) l'approche inter-costo-vertébrale ou inter-costo-pédiculaire. Des trajectoires sont privilégiées dans certaines situations. Par exemple, une trajectoire antérolatérale sera surtout adoptée pour des vertèbres cervicales ; l'approche transpédiculaire oblique, pour les vertèbres lombaires, et l'approche inter-costo-vertébrale (*Cf.* Figure 4.2) pour le traitement des vertèbres thoraciques [Calmels *et al.*, 2007]. Cependant, chacune de ces trajectoires peut varier selon son inclinaison ascendante ou descendante et/ou latérale droite ou gauche (insertion unilatérale) et dans certains cas, droite et gauche (insertion bilatérale). Il peut exister plusieurs bonnes options de trajectoire à un cas clinique et certains choix, corrects pour certains chirurgiens, peuvent être discutables pour d'autres.

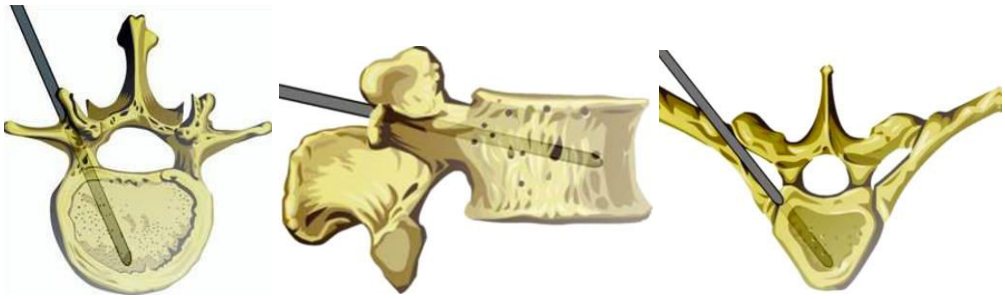


Figure 4.2. Exemples de trajectoires d'insertion du trocart (la 1e et la 2e image illustrent une approche transpédiculaire oblique et la 3e, une approche inter-costo-vertébrale)

## 4.2. LE SYSTEME TUTORIEL INTELLIGENT TELEOS

Le projet TELEOS [Luengo *et al.* 2006] a été conçu dans l'optique de pallier l'écart entre formations théorique et pratique dans l'enseignement du métier de chirurgien [Tonetti *et al.* 2009 ; Tonetti *et al.* 2010]. L'objectif est d'améliorer la transmission du savoir-faire perceptivo-gestuelle aux novices hors du bloc opératoire, afin qu'ils acquièrent de l'aisance face aux interventions chirurgicales et puissent prendre part plus efficacement au processus de compagnonnage au bloc opératoire.

La figure 4.3 présente un schéma de la méthodologie globale suivie pour la conception de l'environnement d'apprentissage, de l'acquisition des connaissances aux validations informatique et didactique en passant par la production de services tutoriels adaptatifs.

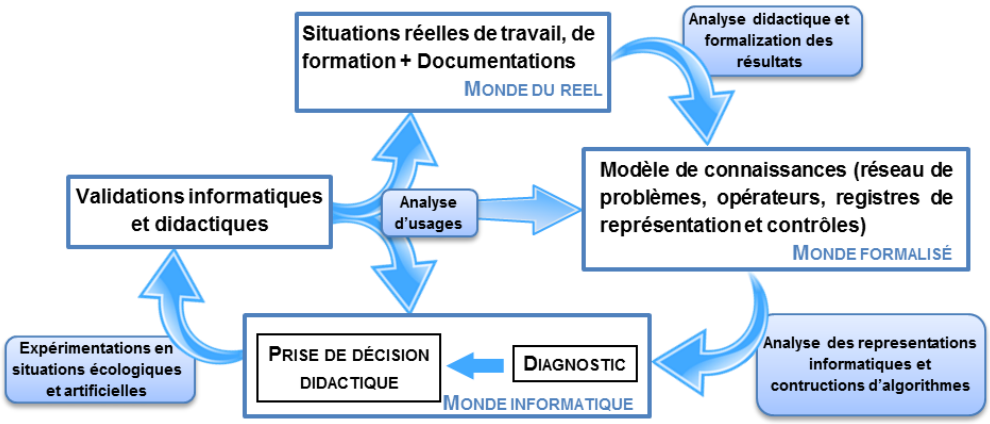



Figure 4.3. Méthodologie de mise en place de la plateforme

Cette méthodologie est structurée autour des tâches suivantes [Vadcard & Luengo, 2005] :

- *L'analyse et la description, à partir d'un corpus d'observations, de la situation prescrite et la situation réelle. Les analyses de ces deux facettes de l'activité sont menées parallèlement, et s'enrichissent mutuellement [Pastré, 2002].*
- *L'analyse et la description de la situation prescrite à partir d'un cours écrit par un expert chirurgien [Tonetti, 2003] et d'autres articles présentant ces techniques.*
- *L'analyse et la description de la situation professionnelle réelle à partir d'observations (films et entretiens de verbalisation) de chaque action du point de vue des interactions entre l'apprenant et l'expert.*

- *L'analyse cognitive des gestes chirurgicaux faisant intervenir des connaissances explicites et tacites [Luengo et al. 2006 ; Ceaux et al. 2009 ; Vadcard et al. 2009].*

Les facteurs à considérer dans le processus d'apprentissage ont été dégagés et ont fait apparaître les contrôles sous-jacents aux actions et aux prises de décisions [Vadcard *et al.* 2009]. Les contrôles sont des éléments de connaissances intégrés au modèle de connaissances de l'environnement d'apprentissage [Luengo *et al.* 2006] et au centre des calculs de diagnostic et de décisions didactiques. Nous détaillons le déroulement de ces processus dans les sections qui suivent.

### 4.2.1 Architecture et fonctionnement

TELEOS comporte, en complément du logiciel de simulation, un bras haptique pour la production des retours haptiques et l'enregistrement des gestes chirurgicaux et un oculomètre pour le monitoring visuel et l'enregistrement des points et zones d'intérêt fixés au cours d'une simulation. Ces outils permettent d'appréhender, dans l'environnement de simulation, la dimension perceptivo-gestuelle des connaissances mises en jeu au cours d'une vertébroplastie. Tel qu'illustré dans la figure 4.4, l'interface reproduit l'essentiel de l'environnement réel de travail, à savoir la salle de radiologie interventionnelle. Les différentes composantes de l'interface seront décrites dans le chapitre 5 du document.

Figure 4.4. Interface du simulateur VS Environnement réel de travail

La figure 4.5 présente les différents modules de TELEOS et les flux de communication entre eux. Les principaux modules sont l'interface de simulation complétée par les périphériques de captation perceptuelle ; le modèle du domaine dont les connaissances sont formalisées selon l'approche CK¢ et représentées sous forme d'un réseau bayésien ; le module de diagnostic qui représente le modèle de l'apprenant ; le module de décision didactique qui représente le modèle tuteur ; la base de cas cliniques qui fournit les exercices accessibles à partir de l'interface ; et la base de cours en ligne vers lesquels l'apprenant peut être redirigé pour la révision de certaines notions théoriques du domaine [Luengo *et al.* 2011 (b)].

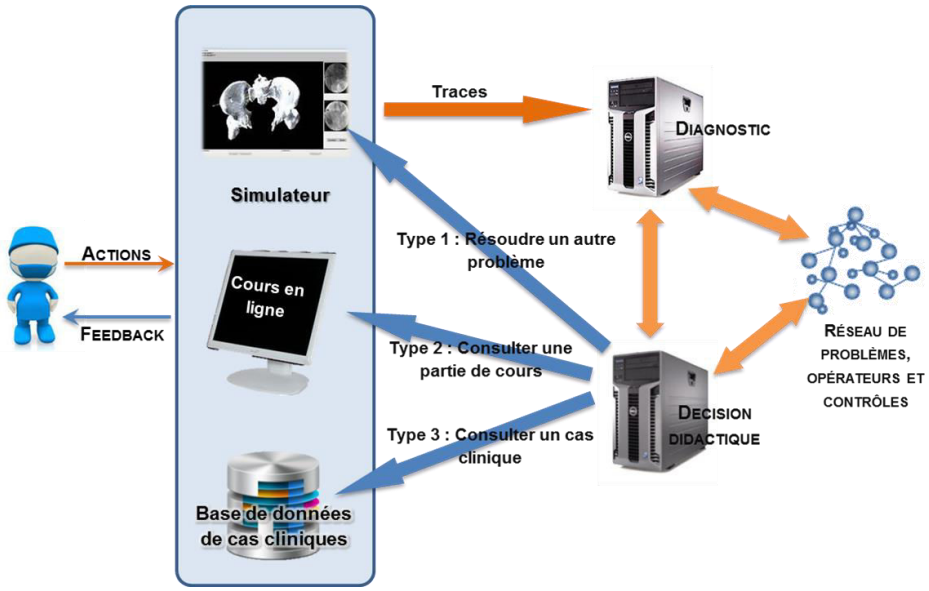



Figure 4.5. Architecture du simulateur TELEOS

Au cours d'une session, les traces d'interaction produites à partir de l'interface sont envoyées au module de diagnostic qui communique avec le réseau bayésien pour évaluer les connaissances mises en jeu par l'apprenant. Le réseau bayésien permet de diagnostiquer les connaissances mobilisées pour la résolution d'un problème avec un degré d'incertitude. Le diagnostic permet de déduire l'état des contrôles mis en jeu lors de la résolution de problème (valide ou non) en fonction, d'une part, du contexte du problème et, d'autre part, des actions de l'apprenant. Ces deux modules communiquent tout au long de la session de simulation pour la réalisation d'évaluations partielles des actions exécutées. A la fin de la session, un diagnostic de l'ensemble de la performance de l'apprenant est effectué pour rendre compte de la validité des décisions qui ont été confirmées par l'apprenant.

Suite au diagnostic, une décision didactique est calculée et renvoyée à l'utilisateur. Pour ce faire, le module de décision didactique communique avec le réseau bayésien et le module de diagnostic pour avoir un suivi des performances de l'apprenant et concevoir des rétroactions épistémiques adaptées à celles-ci. A la fin de la séance, il renvoie sa décision qui peut être, selon les résultats du diagnostic, une orientation vers la résolution d'un nouvel exercice, c'est-à-dire, une session de simulation avec un nouveau cas clinique ; une orientation vers des cours théoriques à réviser ; ou une invitation à prendre à nouveau connaissance des informations sur le cas clinique ayant fait l'objet de la simulation. Nous détaillons les différents modules dans les sections suivantes.

### 4.2.2 Représentation des connaissances

Dans le simulateur TELEOS, les connaissances du domaine sont formalisées d'après l'approche CK¢. (Le modèle CK¢ est présenté en extension dans la section *« 1.4.4. Modélisation par contrôles »*). Les conceptions du domaine sont ainsi représentées dans les quatre ensembles du modèle :

- P : l'ensemble des tâches à réaliser sur un cas clinique au cours d'une simulation
- R : l'ensemble des actions possibles à partir du simulateur ;

- L : les systèmes de représentation ou « registres » de l'interface de simulation, soit le modèle en 3 dimensions du patient, les écrans d'affichage des radiographies ainsi que les réglages figurant sur les panneaux de manipulation des outils du simulateur.
- Σ : l'ensemble des contrôles (ou connaissances déclaratives) utilisés pour valider ou invalider l'exécution d'une action ;

Le tableau 4.1 présente quelques exemples de conceptions du domaine de la chirurgie orthopédique percutanée représentée selon le format CK¢ [Vadcard *et al.* 2009 ; Minh Chieu *et al.* 2010].

**Tableau 4.1.** Exemples d'éléments de connaissances formalisés selon le modèle CK¢

| Problèmes | Opérateurs | Registres | Contrôles |
|---|---|---|---|
| $P_1$ : Régler le fluoroscope sur la vertèbre fracturée | $R_1$ : Prendre une radio de face | $L_1$ : Radio (2D) | $\Sigma_1$ : Les pédicules doivent être centrés sur les radios |
| $P_2$ : Insérer le trocart dans la vertèbre | $R_2$ : Impacter l'os | $L_2$ : Anatomie du corps (3D) | $\Sigma_2$ : Si le trocart est en dessous des pédicules, alors il lèse les foramens vertébraux |

Le premier exemple de conception présenté au tableau ci-dessus se définit à partir du problème énoncé *« Régler le fluoroscope sur la vertèbre fracturée »*. L'une des actions pour y arriver est la prise d'une radio de face et la vérification du rendu correspondant sur l'écran d 'affichage radio en deux dimensions. L'action exécutée sera validée et le problème considéré comme résolu si les pédicules de la vertèbre ciblée sont centrés sur la radio. De même, tel que formalisé par la deuxième conception présentée, pour réaliser l'insertion du trocart dans l'os, on procède à l'impact entre l'os et l'outil. L'un des registres de vérification des conséquences de cette action est le modèle en trois dimensions du patient. Le problème sera marqué comme résolu si l'outil a été manœuvré de manière à ne pas se retrouver en dessous des pédicules de la vertèbre ciblée. Nous présentons en extension dans la section suivante, le processus d'évaluation des actions appliquées pour résoudre un problème ainsi que les connaissances qui sous-tendent leur exécution.

### 4.2.3 Diagnostic des connaissances

La nature empirique et mal-définie d'une partie des connaissances du domaine de la chirurgie induit une dimension d'incertitude au modèle qui les sous-tend dans la mesure où ce modèle n'est pas exhaustif. Il est ainsi difficile d'assurer une production d'analyses didactiques fiables sur cette base. De ce fait, le choix d'un réseau bayésien pour les représenter a été tout indiqué [Conati *et al.* 2002]. En effet, les paradigmes probabilistes de cette approche permettent de produire un diagnostic des éléments de connaissances et de générer les évaluations nécessaires aux décisions didactiques à partir de ces diagnostics en prenant en compte cette dimension d'incertitude [Minh Chieu *et al.* 2010].

La figure 4.6 illustre la structure du réseau définissant les relations de dépendance et de causalité entre les éléments d'une conception, à savoir, les problèmes à résoudre, les actions pouvant être utilisées pour ce faire, les contrôles permettant d'en vérifier la validité et leurs registres de visualisation. De manière formelle, cette relation se définit ainsi : « Un problème $p \in P$ est résolu si et seulement si, il existe un opérateur (ou action) $r \in R$ et $s \in \Sigma$ tel que $s(r(p))$ est vrai. ».

L'élément de vérification qui rend compte du résultat de cette fonction est désigné sous le terme de *« variable de situation »*. Le calcul des variables de situation est la première étape du processus de diagnostic des connaissances qui s'effectue en deux temps. La deuxième étape établit le diagnostic global de la simulation en fournissant les évaluations de la mise en jeu valide ou invalide ou de la non-mobilisation des éléments de connaissances attendus.

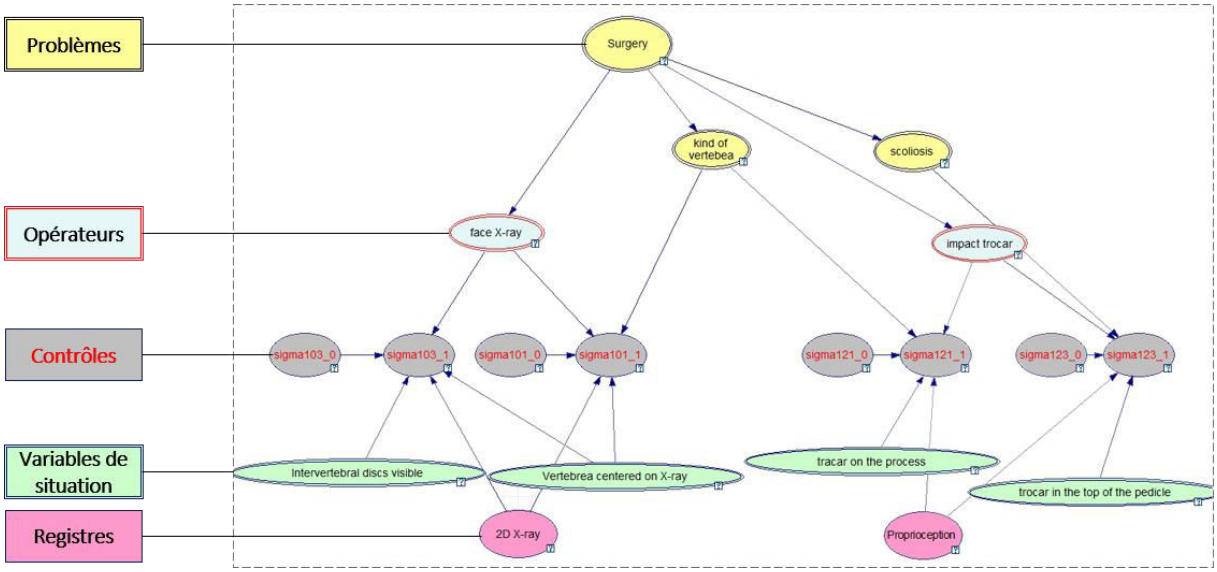



Figure 4.6. Structure du réseau bayésien utilisé pour le diagnostic des connaissances mises en jeu au cours d'une simulation sur TELEOS

A titre d'exemple, considérons l'exercice d'une simulation d'intervention sur la douzième vertèbre thoracique d'un patient. Une conception possible relative à ce cas sera représentée comme suit :

- *P: Le trocart est enfoncé dans la vertèbre. Pousser le trocart vers le corps vertébral.*
- *R: Insérer le trocart dans le corps vertébral. Prendre une radio de profil (pour vérifier la progression du trocart)*
- *L: Le rendu est donné par l'écran d'affichage de la radio courante en deux dimensions*
- *Σ : Le point de sortie pédiculaire doit se situer sur la ligne transverse au centre du pédicule.*

Le déroulement de cette partie de la simulation peut être conçu comme suit. L'interne positionne le fluoroscope en configuration profil pour prendre une radio de vérification de progression du trocart. Les actions `Radio_Profil` et `Entree_CorpsVertebral` sont engagées. La radio est affichée sur l'écran correspondant de l'interface. Le contrôle associé à l'action `Entree_CorpsVertebral`, soit «`Le point de sortie pédiculaire est situé sur la ligne transverse au centre du pédicule` », est alors activé. La variable de situation correspondante `EntreeCV_trocartLimiteCentrePedicule` est le résultat (`correct` ou `incorrect`) de l'évaluation de l'action dont le rendu est affiché sur la radio de profil, relativement au contrôle.

Dans le deuxième temps du diagnostic, l'état du contrôle sera évalué par un calcul de probabilité sur la base des variables *« mis en jeu valide » (MJV)*, *« mis en jeu invalide » (MJI)* ou *« pas mis en jeu » (NMJ)*. Des mesures sont associés à ces états avec un certain degré d'incertitude au regard du problème courant (dans notre exemple : « Le trocart est enfoncé dans la vertèbre. Pousser le trocart vers le corps vertébral »). L'évaluation de probabilité associée à chacun de ces états

peuvent être par exemple: MJV= 0,8 ; MJI = 0,2 ; PMJ = 0. Dans ce cas de figure, l'action exécutée a un niveau d'adéquation élevé avec le contrôle correspondant et est jugée *« mis en jeu valide »*.

Le réseau bayésien est actualisé à l'exécution de chaque nouvelle action tout au long de l'exercice de simulation (dans notre exemple : le traitement de la 12e vertèbre thoracique). Les modifications appliquées progressivement sur une même action sont prises en compte dans le processus. En effet, une modification effectuée au temps $T_n$ sur une action exécutée au temps $T_{n-1}$ est prise en compte dans le diagnostic. Cette dimension temporelle des évaluations est traduite dans les résultats des variables de situation qui précisent la progression conséquente. Ainsi, en plus des évaluations `correct` et `incorrect`, une variable de situation peut renvoyer les résultats `incorrect_mauvais_sens` si la modification éloigne de la solution, ou `incorrect_bon_sens` si, tout en étant encore incorrecte, elle rapproche de la solution.

### 4.2.4 Rétroactions épistémiques

Les rétroactions épistémiques sont réalisées par le module de décisions didactiques de TELEOS. L'objectif est de produire et de renvoyer à l'apprenant des éléments de guidage pédagogique pertinents relativement aux résultats du diagnostic des connaissances mobilisées lors de la résolution d'un problème. Ces rétroactions sont basées sur une analyse didactique de la connaissance chirurgicale de l'apprenant. Elles ciblent l'ensemble des éléments de connaissances mises en jeu au regard du contexte du problème à résoudre (le cas clinique du patient). Ceci permet de déterminer le sujet de la rétroaction ainsi que la forme qu'elle doit prendre [Mufti-Alchawafa & Luengo, 2009] :

- *Si le sujet est relatif à une connaissance déclarative, la rétroaction sera de demander à l'apprenant de consulter des pages de cours sur l'élément de connaissance dont la maitrise a été jugée faible.*
- *Si le sujet est lié à une connaissance empirique, la rétroaction sera de demander à l'apprenant de résoudre un autre problème de simulation.*
- *Si le sujet concerne à la fois des connaissances déclaratives et empiriques alors la rétroaction sera de demander à l'apprenant de consulter un cas clinique proche du contexte du problème résolu.*

La méthodologie qui sous-tend le calcul des décisions didactiques dans TELEOS est inspirée de la *Théorie de l'Analyse Décisionnelle* de Skinner [Skinner, 1999]. Cette méthodologie établit la construction de la décision didactique en trois phases : (1) la cible didactique est identifiée sur la base des éléments de connaissances évalués renvoyés par le module de diagnostic ; (2) le format de la rétroaction est choisie sur la base des résultats d'une fonction d'influence ; (3) le contenu de la rétroaction est choisi relativement à la cible didactique et le format identifiés dans les phases précédentes. De ce fait, les éléments pédagogiques sélectionnés sont les plus proches possibles du niveau de connaissances de l'apprenant. Pour ce faire, un nœud d'utilité et un nœud de décision ont été rajoutés au Réseau Bayésien de manière à générer un diagramme d'influence exploitant la fonction d' *« utilité d'apprentissage »* suivante [Mufti-Alchawafa *et al.* 2006] :

$$U_{app}(e_i, E) = \alpha.U_{état}(e_i, E) + \beta.U_{type}(e_i) + \sigma.U_{ordre}(e_i) + \delta.U_{nature}(e_i)$$

L'utilité d'apprentissage d'un élément de connaissance est caractérisée par ses paramètres d'état, de type, d'ordre et de nature. Les variables $\alpha$, $\beta$, $\sigma$ et $\delta$ sont des *« variables de priorité »* dont le poids peut être modifié en fonction d'objectifs ou d'hypothèses didactiques. Cela offre la possibilité de définir librement l'ordre de priorité des paramètres caractérisant les éléments de

connaissances disponibles et permettre ainsi de configurer les rétroactions épistémiques vers des éléments de connaissances jugés prioritaires dans certaines situations didactiques.

## 4.3. Discussion et Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le cas d'étude de cette thèse : l'environnement d'apprentissage basé sur la simulation TELEOS et le domaine pour lequel il a été conçu, la chirurgie orthopédique percutanée.

Dans la première partie du chapitre, nous avons détaillé les difficultés inhérentes aux méthodes traditionnelles d'enseignement du domaine. Nous avons présenté au passage les spécificités du domaine, à savoir, son caractère mal-défini et la nature perceptivo-gestuelle et empirique des connaissances y afférentes. Ces spécificités constituent des défis importants à la production de services tutoriels dans un environnement d'apprentissage simulé tel que TELEOS.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons détaillé la méthodologie adoptée pour adresser ces défis. TELEOS s'inscrit dans le paradigme de l'apprentissage humain du constructivisme. Du point de vue du diagnostic des connaissances et de la rétroaction épistémique, l'objectif n'est pas de maintenir le sujet au plus près du comportement expert, mais de comprendre suffisamment ses conceptions en amont pour apporter une rétroaction qui en permette l'évolution ou le renforcement. De ce fait, les modules de l'environnement d'apprentissage ont été conçus de manière à prendre en compte ces particularités.

En effet, le module de diagnostic de connaissances exploite un réseau bayésien. Celui-ci permet de réaliser des déductions sur l'état des connaissances de l'apprenant en dépit des incertitudes induites par le caractère ouvert de l'ensemble des connaissances du domaine. Le module de rétroaction épistémique est conçu de manière à adapter son guidage au profil de l'apprenant. Pour ce faire, une fonction d'utilité est exploitée pour pouvoir déduire les rétroactions les plus pertinentes à renvoyer à l'apprenant sur la base des résultats du diagnostic de ses connaissances. Enfin, le modèle de connaissances du domaine est implémenté sur la base du formalisme de représentation CK¢. Ce formalisme permet de concevoir les connaissances du domaine comme un ensemble de contrôles se rapportant plus à des recommandations qu'à des directives figées à suivre par l'apprenant. Ce choix de représentation prend en compte le caractère mal-défini du domaine.

Il faut cependant relever certaines limites de ces services tutoriels dans leur version actuelle. La principale concerne l'évolutivité limitée du modèle de connaissances du domaine. En effet, les contrôles constituant le modèle de connaissances sont des éléments de connaissances experts. L'acquisition et la formalisation de ces éléments de connaissances dans le but d'enrichir le modèle, est une démarche fastidieuse et chronophage. Elle est cependant cruciale car un modèle de connaissances riche permet de produire des diagnostics de connaissances et des rétroactions épistémiques précis et pertinents.

Une approche d'automatisation de cette démarche d'acquisition de connaissances plus orientée données semblerait plus adaptée. Dans cette optique, le premier travail réalisé a été de calibrer le réseau bayésien du STI sur la base d'analyses non supervisées des traces d'activité des apprenants [Lallé & Luengo, 2011]. Cependant, les tests effectués n'ont pas permis d'apporter des conclusions probantes sur l'efficacité de cette approche. La principale raison plausible était le manque de données à partir desquelles ont été appliquées ces techniques d'apprentissage. La collecte des

données sur le terrain est très difficile eu égard à la logistique requise, le peu de disponibilité des chirurgiens et des internes en chirurgie, et le volume de données somme toute faible pouvant être recueillie au cours d'une campagne de collecte.

Considérant cette réalité, l'objectif est de proposer des solutions pour une exploitation optimale de ces données en dépit de leur faible quantité. Ceci constitue l'un des principaux objectifs des recherches effectuées dans le cadre de cette thèse.

Cependant, avant de passer aux propositions formulées, il convient de décrire les traces enregistrées dans l'environnement d'apprentissage TELEOS, plus spécialement, les verrous inhérents à leur nature qu'il faudra soulever avant de pouvoir les exploiter à des fins d'automatisation de l'acquisition des connaissances du domaine.

# CHAPITRE 5

# LA NATURE DES TRACES D'INTERACTION DU SIMULATEUR TELEOS

*Dans ce chapitre, nous décrivons de manière détaillée l'enregistrement des interactions perceptivo-gestuelles de l'apprenant sur le STI TELEOS. Ces interactions captées par plusieurs périphériques, constituent les traces brutes sur lesquelles sont appliquées et expérimentées les propositions formulées dans le cadre de cette thèse. Nous présentons chacun de ces périphériques et la méthodologie de sa mise en place dans la plateforme, et décrivons les caractéristiques des traces qu'il génère.*

## Sommaire

**5.1. Enregistrement de Traces d'Interaction sur TELEOS ..... 71**
**5.2. Les Actions Ponctuelles ..... 71**
**5.3. Les Gestes et Perceptions Haptiques ..... 73**
**5.4. Les Perceptions Visuelles ..... 74**
**5.5. Positionnement et Conclusion ..... 77**

## 5.1. ENREGISTREMENT DE TRACES D'INTERACTION SUR TELEOS

Comme décrit dans le chapitre précédent, les connaissances mises en jeu en chirurgie mini-invasive sont multimodales en ce sens qu'elles impliquent une dimension motrice (gestuelle), perceptuelle et déclarative. Pour pouvoir capter ces différentes facettes au cours d'une simulation, deux périphériques sont utilisés en complément de l'interface de simulation. Il s'agit d'un oculomètre pour tracer les perceptions visuelles et d'un bras à retour d'effort pour capter les gestes et les perceptions haptiques. Nous décrivons dans ce chapitre les méthodologies employées pour enregistrer les trois types de traces produites par l'environnement d'apprentissage, à savoir les actions ponctuelles exécutées à partir de l'interface de simulation, les perceptions visuelles et les gestes et perceptions haptiques. Nous détaillons la nature de ces traces et les paramètres qui les caractérisent, leur pertinence d'un point de vue de description de l'activité d'apprentissage ainsi que les défis qu'elles opposent à des objectifs de conception de services tutoriels et de production d'analyses didactiques.

## 5.2. LES ACTIONS PONCTUELLES

Le simulateur enregistre des traces de manière ponctuelle à l'exécution d'une action. Il s'agit des actions liées aux réglages du fluoroscope, au tracé des repères cutanés et à la manipulation du trocart. Le tableau 5.1 présente un résumé des actions ponctuelles pouvant être exécutées à partir de l'interface du simulateur.

**Tableau 5.1.** Actions ponctuelles enregistrées à partir de l'interface de simulation

| Prise de radios | Repérage cutané | Manipulation du trocart |
|---|---|---|
| Definir_Face<br>Contrôle_Face<br>Definir_Profil<br>Contrôle_Profile<br>Radio_Face (avec réglette de repérage cutané) | Valider_RepèreGauche<br>Valider_RepèreDroit<br>Valider_RepereTransversal | Placer_Trocart<br>Pousser_Trocart<br>Impacter_Trocart<br>Entrée_CorpsVertebral<br>Sortie_CorpsVertebral<br>Sortie_Osseuse<br>Recommencer_Trajectoire |

Chaque action peut être définie comme une photographie de l'environnement de simulation au moment de son exécution. En effet, à chaque occurrence d'une action du simulateur, les coordonnées des positions des différents outils de l'environnement sont enregistrées. De ce fait, une action est caractérisée non seulement par son nom mais aussi par les positions des outils de l'environnement de simulation au même moment.

Par exemple, tel qu'illustrée dans la figure 5.1., deux prises de radio de face seront différentes si le positionnement du fluoroscope a changé entre les deux exécutions.

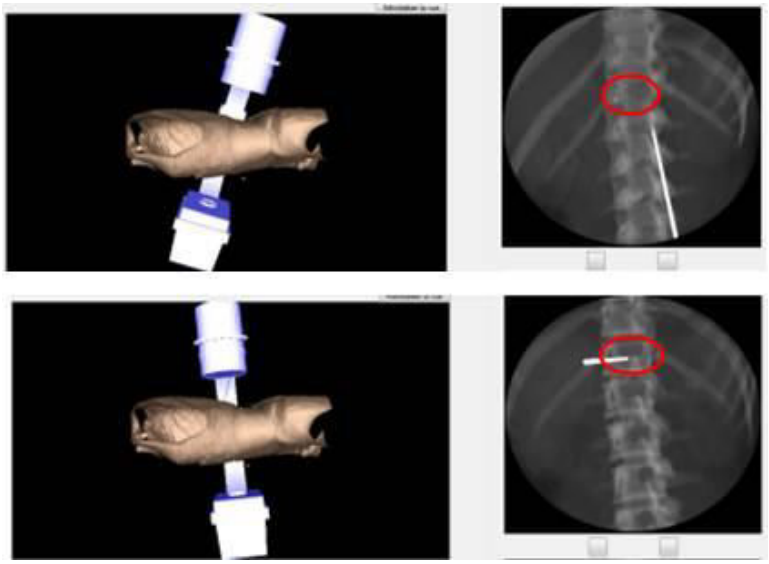


Figure 5.1. Radiographies de face d'après deux inclinaisons différentes du fluoroscope

Chaque action est représentée par une séquence contenant les paramètres suivants :

- *un timecode (au format Unix)*
- *le nom de l'action*
- *les coordonnées (x, y, z) du modèle 3D du patient*
- *les coordonnées (x, y, z) de la position du fluroscope en mode face*
- *les coordonnées (x, y, z) de la position du fluroscope en mode profil*
- *les coordonnées (x, y) de l'affichage de la dernière radiographie prise*
- *les coordonnées (x, y) de l'affichage de la radiographie précédente*
- *les coordonnées (x, y, z) de la position du fluoroscope*
- *les coordonnées (x, y, z) de la position de la pointe du trocart*
- *les coordonnées (x, y, z) de la position de la poignée du trocart*
- *les coordonnées (x, y, z) (x', y', z') de l'orientation of the trocar*
- *les coordonnées (x, y), (x', y'), (x", y") des 3 repères cutanés*

La figure 5.2 un enregistrement de ces séquences à l'état brut. Les composants de l'interface de simulation sont représentés par des paramètres positionnement sur un plan. Par exemple, `camProfilx`, `camProfily` et `camProfilz`, représentent les coordonnées de la position du fluoroscope dans sa configuration pour des radiographies de profil. De même, `posPoigneex`, `posPoigneey` et `posPoigneez` fournissent la position de la poignée du trocart chaque fois qu'une action ponctuelle est exécutée.

```
Timecode;Action;cam3Dx;cam3Dy;cam3Dz;focale3Dx;focale3Dy;focale3Dz;camFacex;camFacey;camFacez;focaleFacex;focaleFacey;focaleFacez;camProfilx;camProfily
;camProfilz;focaleProfilx;focaleProfily;focaleProfilz;posPoigneex;posPoigneey;posPoigneez;posOutilx;posOutily;posOutilz;orientOutilx;orientOutily;orien
tOutilz;orientOutilw;vitessex;vitessey;vitessez;forcex;forcey;forcez;repereTp1x;repereTp1y;repereTp1z;repereTp2x;repereTp2y;repereTp2z;repereDp1x;reper
eDp1y;repereDp1z;repereDp2x;repereDp2y;repereDp2z;repereGp1x;repereGp1y;repereGp1z;repereGp2x;repereGp2y;repereGp2z
1369723846546;Impacter_Trocart;169.59962450609845;-699.8933866094737;314.25;157.38294;0.0;314.25;157.38294;-
241.32050799999996;314.25;157.38294;120.660254;314.25;535.101996;498.37931;314.25;157.38294;120.660254;314.25;97.13486197271999;-
50.65016608457521;471.375;179.6740328084895;26.0871509578177;415.9806368253753;0.3137729009421642;-0.6060562048520157;-
0.5552803847052238;0.475295901687352;0.0;0.0;0.0;0.0;0.0;0.0;0.0;0.0;314.25;314.76588;0.0;314.25;209.84392;0.0;0.0;209.84392;0.0;628.5;104.92196;0.0;0.
0;104.92196;0.0;628.5;169.59962450609845;-699.8933866094737;314.25
1369723917125;Definir_Face;163.49151484886175;-699.9733461449198;314.25;157.38294;0.0;314.25;201.49729779023494;-
238.62235829129327;347.969568865639;157.38294;120.660254;347.969568865639;535.101996;498.37931;314.25;157.38294;120.660254;314.25;97.13486197271999;-
50.65016608457521;471.375;148.28362039296974;32.03621383587529;414.00566054092883;0.31431633125759034;-0.6516243543744048;-
0.529879660476323;0.44251389236946254;0.0;0.0;0.0;0.05706727650899168;0.3208035311448185;0.5040571799354865;0.0;0.0;314.25;314.76588;0.0;314.25;209.843
92;0.0;0.0;209.84392;0.0;628.5;104.92196;0.0;0.0;104.92196;0.0;628.5;163.49151484886175;-699.9733461449198;314.25
1369724077593;Controle_Profil;157.38294;-700.0;314.25;157.38294;0.0;314.25;220.2402396717868;-
233.16404810694485;396.4357938846908;157.38294;120.660254;352.9916323137129;535.101996;120.660254;352.9916323137129;157.38294;120.660254;352.9916323137
129;97.13486197271999;-50.65016608457521;471.375;142.78718783070212;31.22413050557998;366.36532173776516;0.08030834062212118;0.4348111939724986;-
0.04539367867552098;0.8957841261688424;0.0;0.0;0.0;0.1651531959192638 6;0.11617334441002734;0.1297234594290578 3;1.0717706008178673E-
4;0.0;375.1956144791463;313.8281729142685;0.0;403.33004236289213;223.0640705873826;0.0;1.8776071641612224;162.02942339537003;0.0;629.4386125919765;184.
65902053826673;0.0;10.31317539143184 3;149.92346986462692;0.0;637.8743767245769;157.38294;-700.0;314.25
```


Figure 5.2. Fragement d'un fichier de traces d'interactions enregistrées à partir de l'interface du simulateur

## 5.3. Les Gestes et Perceptions Haptiques

Le geste chirurgical inclut les types de préhension des outils chirurgicaux, les niveaux de forces appliquées selon l'étape de progression et les inclinaisons, orientation et direction d'insertion des outils [Luengo *et al.* 2011 (b)]. Le recueil des données nécessaires à la modélisation des gestes chirurgicaux pour la vertébroplastie a été réalisé sur des maquettes de patients. L'instrumentation nécessaire (*Cf.* Figure 5.3) inclut notamment des dynamomètres positionnés dans les maquettes pour pouvoir recueillir les données relatives aux niveaux de force appliqués sur le trocart et à la vitesse de progression de celui-ci à des points de progression importants. Les principaux points de progression considérés pour une vertébroplastie sont le contact cutané, le contact osseux, l'entrée pédiculaire, la traversée du corps vertébral jusqu'au point de validation de la trajectoire du trocart.

La configuration du bras haptique a été réalisée sur la base de ces données. Le matériel utilisé dans l'environnement TELEOS est un *Sensable Phantom Omni* (Cf. *Fig. 5.3 (iii)*) qui fournit six degrés de liberté avec un retour d'effort sur les trois axes de translation. Les résistances configurables sur cet appareil sont relativement faibles mais suffisantes pour simuler efficacement les variations de densités du corps humain et des vertèbres sur la trajectoire des outils chirurgicaux [Luengo *et al.* 2011 (a)].

Les traces provenant de cet appareil sont enregistrées en continu toutes les 100 millisecondes. Chaque trace contient les paramètres suivants :

- *Un time code (au format Unix)*
- *Les coordonnées (x, y, z) de la position de la pointe du trocart*
- *Les coordonnées (x, y, z) de la position du manche du trocart*
- *Les coordonnées (x, y, z) (x', y', z') de l'orientation du trocart*
- *La vitesse de manipulation du trocart*
- *La force appliquée sur le trocart*

Figure 5.3. *(i), (ii)* Instrumentations pour le recueil des données gestuelles et haptiques relatives à la manipulation du trocart. *(iii)* Bras haptique et dispositif matériel dans l'environnement de simulation.

La figure 5.4 présente quelques traces telles qu'elles sont enregistrées par le bras haptique. Les trois paramètres d'orientation, de vitesse et de force sont les résultats d'un traitement préliminaire des traces haptiques [Luengo *et al.* 2011 (a)].

```
Timecode;posOutilx;posOutily;posOutilz;orientOutilx;orientOutily;orientOutilz;orientOutilw;vitessex;vitessey;vitessez;forcex;forcey;forcez
1369723836140;178.70439354502992;30.672666330494962;414.49830895502066;0.3326998711672517;-0.525606809877529;-0.5283605216160604;
0.5778264812046634;0.0;0.0;0.0;0.046847851677840564;0.22467538901442;0.3517474212618909
1369723836156;178.70439354502992;30.672666330494962;414.49830895502066;0.3326998711672517;-0.525606809877529;-0.5283605216160604;
0.5778264812046634;0.0;0.0;0.0;0.0468478516778407;0.2246753890144207;0.35174742126189046
1369723836265;178.70439327799295;30.672666851015578;414.49830742769143;0.3330375136617467;-0.5252373587412946;-0.5281477435798362;
0.5781623269698805;0.0;0.0;0.0;0.04684785167784043;0.22467538901441939;0.35174742126189135
1369723836390;178.70439327799295;30.672666851015578;414.49830742769143;0.3330375136617467;-0.5252373587412946;-0.5281477435798362;
0.5781623269698805;0.0;0.0;0.0;0.04684785167784043;0.22467538901441939;0.35174742126189135
1369723836468;178.70439354502992;30.672666330494962;414.49830895502066;0.3326998711672517;-0.525606809877529;-0.5283605216160604;
0.5778264812046634;0.0;0.0;0.0;0.04684785167784043;0.22467538901441939;0.35174742126189135
1369723836609;178.83676356867943;30.731184299342004;414.44775219659755;0.3322195798178074;-0.5254267384667698;-0.5284320027970908;
0.5782011159913084;0.0;0.0;0.0;0.04684785167784043;0.22467538901441939;0.35174742126189135
1369723836687;178.96902984169617;30.455713318771927;414.47518925582403;0.3327160334457196;-0.5243319323058012;-0.5292051253463018;
0.5782024009100949;0.0;0.0;0.0;0.04684785167784012;0.22467538901441925;0.3517474212618912
1369723836812;178.90291924603642;30.593470976841218;414.46156170320205;0.33229870479110785;-0.5250641782836991;-0.5289249304719896;
0.5780342429572712;0.0;0.0;0.0;0.04684785167784043;0.22467538901441939;0.35174742126189135
```

Figure 5.4. Fragement d'un fichier de traces enregistrées par le bras haptique

## 5.4. Les Perceptions Visuelles

L'interface de simulation est divisée en plusieurs zones d'intérêt (*Cf.* Figure 5.5) : la zone d'affichage du modèle 3D du patient ; les zones d'affichage des radiographies précédentes et courantes ; et le tableau de réglages principal. Ce dernier comprend trois sous-sections : le tableau de réglages de l'appareil de radioscopie ou fluoroscope, le tableau de manipulation de la réglette pour le marquage de repères cutanés destinés à cibler l'os affecté et le tableau de manipulation de l'outil de guidage des instruments chirurgicaux ou trocart.

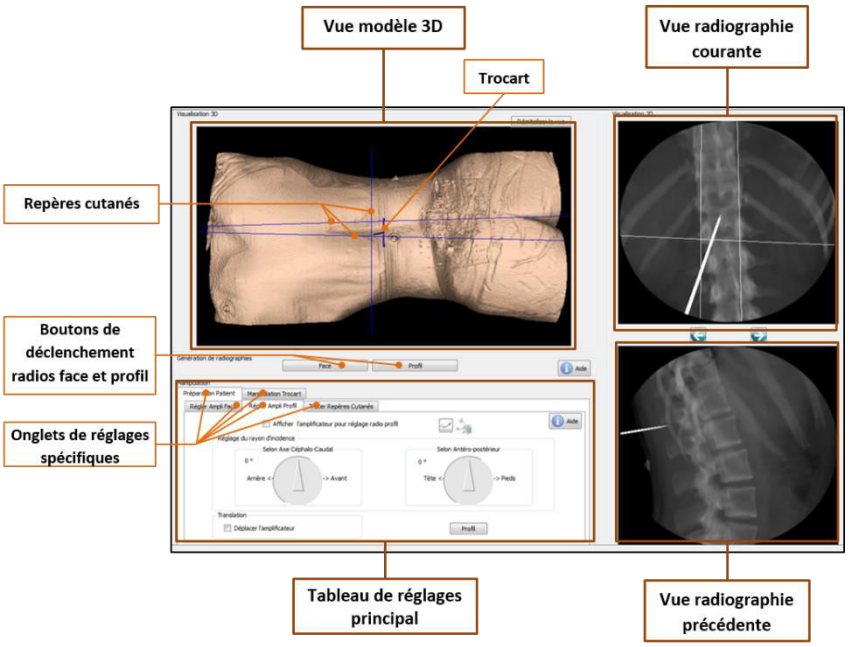



Figure 5.5. L'interface du simulateur TELEOS

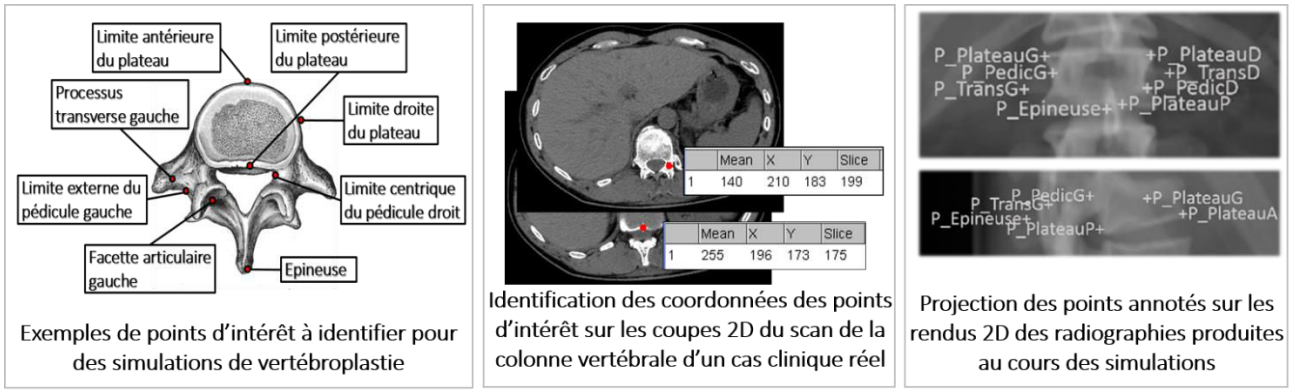



Figure 5.6 Identification et annotation des points d'intérêt des vertèbres.

La zone d'intérêt associée à l'affichage de la radiographie courante comporte plusieurs points d'intérêt devant être prises en compte sur la vertèbre pour la validation de la trajectoire d'insertion du trocart. Les points d'intérêt de la vertèbre cible ont été désignés par un chirurgien expert pour chaque cas clinique modélisé et intégré dans la base d'exercices du simulateur. Tel qu'illustré dans la Figure 5.6, leur identification est effectuée à partir des coupes en deux dimensions du scan de la colonne vertébrale du patient. Les coordonnées de ces points sont enregistrées dans les métadonnées du cas clinique. Lorsque celui-ci est sélectionné comme exercice, les points enregistrés sont projetés sur les radiographies produites par l'apprenant. Les zones et points d'intérêt de l'interface et de la vertèbre sont illustrés dans la figure 5.7.

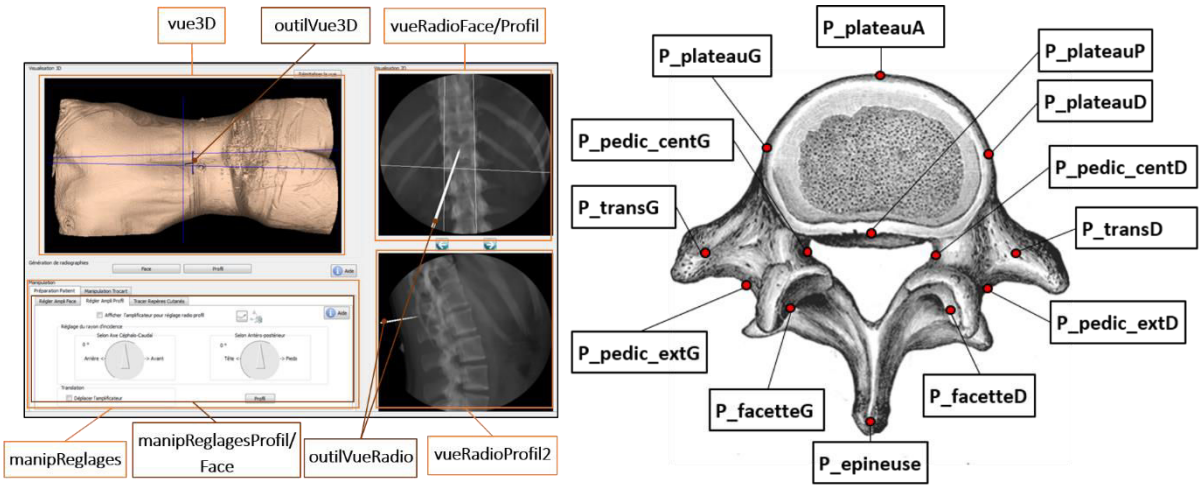



Figure 5.7. Codes des zones et points d'intérêt enregistrés au cours des simulations de vertébroplastie

Un outil d'analyse de fixations intégré au simulateur permet d'analyser le parcours visuel de l'apprenant en temps réel [Jambon & Luengo, 2012]. Il enregistre dans un fichier les coordonnées des fixations et leur durée et dans un autre fichier les zones et points d'intérêt visualisés ainsi que les durées. La Figure 5.8 représente un parcours visuel à travers les zones d'intérêt de l'interface et certains points d'intérêt à l'intérieur de ces zones.

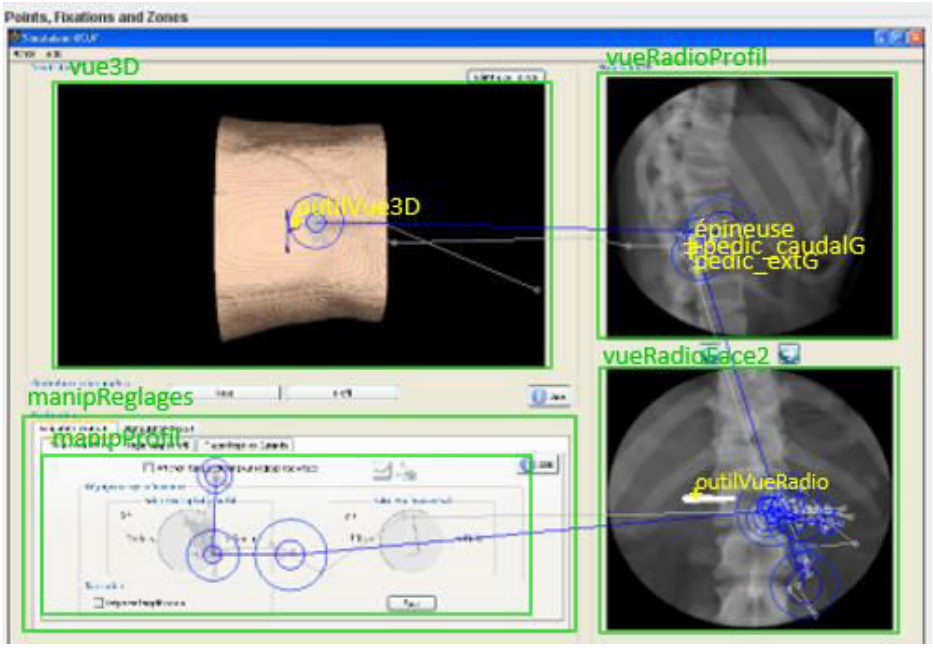



Figure 5.8. Points et zones d'intérêt de l'interface et parcours visuel de l'apprenant.

La figure 5.9 illustre la représentation des traces oculométriques telle qu'elles sont enregistrées par l'analyseur de parcours visuel. Pour chaque trace de l'oculomètre les deux fichiers rapportent les paramètres suivants:

- *Un time code (au format Unix)*
- *le nom de la zone et/ou des points d'intérêt fixés*
- *les coordonnées (x, y) de la fixation*
- *Le rayon de la fixation*

- *la durée de la fixation*

```
Timecode;X;Y;MeanRadius;MaxRadius;Duration
1369724848371;978.7272727272727;212.9090909090909;13.801323406166093;28.96064585371783;300
1369724848790;1012.4375;203.1875;23.198573858335344;42.7679969428076;480
1369724849300;944.72;189.0;16.952038495508482;39.24536150935548;749
1369724850291;973.8571428571429;610.7142857142857;14.601531489729457;22.8589285016795;292
1369724850733;941.5;195.77777777777777;23.21507921364864;48.339878228647756;892
1369724851925;979.0;622.4814814814815;17.388551260143768;41.70942661870876;1261
1369724853246;906.5;186.16666666666666;14.266121386944867;25.237758308622517;330
1369724853605;972.2857142857143;180.71428571428572;12.798695527962307;26.971262106023826;394
1369724854029;921.7368421052631;188.73684210526315;25.17708799492238;38.36639948468301;599
1369724854778;981.5714285714286;199.21428571428572;22.298043680180985;37.999261539548655;599
```

```
Timecode;Name;Duration
1369724848371;O_vueRadioFace;300
1369724848371;O_plateauG;300
1369724848790;O_plateauP;480
1369724848790;O_plateauA;480
1369724848790;O_vueRadioFace;480
1369724849300;O_vueRadioFace;749
1369724850291;O_vueRadioFace2;292
1369724850733;O_coteG;892
1369724850733;O_vueRadioFace;892
1369724851925;O_vueRadioFace2;1261
1369724853246;O_vueRadioProfil;330
1369724853605;O_vueRadioProfil;394
1369724854029;O_vueRadioProfil;599
1369724854778;O_pedic_caudalD;599
1369724854778;O_pedic_caudalG;599
1369724854778;O_vueRadioProfil;599
1369724854778;O_pedic_centG;599
1369724854778;O_plateauG;599
```

Figure 5.9. Fragments de fichiers de traces enregistrées par l'oculomètre.

## 5.5. Positionnement et Conclusion

Ce chapitre décrit les traces d'interaction enregistrées par l'environnement d'apprentissage TELEOS au cours d'une session de simulation. Ces traces proviennent de trois sources : l'interface de simulation, un oculomètre et un bras haptique. Cette diversité de sources de capture des traces permettent de couvrir les différentes facettes des connaissances perceptivo-gestuelles mises en jeu au cours d'une simulation de vertébroplastie. Cependant, chaque source enregistrant séparément et indépendamment des autres périphériques les interactions de l'apprenant, l'ensemble de traces obtenues est hétérogène. Cette hétérogénéité se retrouve à différents niveaux.

Tout d'abord, les traces de TELEOS sont hétérogènes au niveau du type de leur contenu : les traces envoyées par l'interface du simulateur et les traces de l'oculomètre sont alphanumériques alors que celles envoyées par le bras haptique sont numériques.

Elles sont aussi hétérogènes au niveau du format de leur contenu. En effet, chaque trace du logiciel de simulation compte 54 paramètres, celles provenant du bras haptique comptent 15 paramètres et celles provenant de l'oculomètre, 7 paramètres distincts.

Enfin, les traces des différentes sources se distinguent au niveau de leur granularité temporelle. Les traces oculométriques sont envoyées et enregistrées en continu toutes les 60 millisecondes ; celles du bras haptique sont aussi envoyées et enregistrées en continu mais à un intervalle de 100 millisecondes tandis que celles du simulateur sont discrètes : elles sont produites et enregistrées de manière ponctuelle à l'exécution d'une action.

La figure 5.10 illustre une représentation des traces provenant des trois sources, triées dans l'ordre séquentiel et donnant une idée de la verbosité de chaque source. Les traces en bleu sont les traces haptiques, celles en vert, les traces oculométriques et en rouge, une trace ponctuelle provenant du simulateur.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1369723908281 | 148.33236117541048 | 32.240140474323965 | 413.9517677905219 | 0.3138488360159437 |
| 1369723908406 | 148.41315895529624 | 32.112540587773736 | 413.9786455901293 | 0.31384587833970407 |
| 1369723908500 | 148.33236117541048 | 32.240140474323965 | 413.9517677905219 | 0.3138488360159437 |
| 1369723908609 | 148.28362039296974 | 32.03621383587529 | 414.00566054092883 | 0.31431633125759034 |
| 1369723908670 | 250.53846153846155 | 687.3076923076923 | 22.553309472612096 | 47.733233061060695 |
| 1369723908718 | 148.2028342162603 | 32.16382168089092 | 413.978775353356 | 0.31465733151593356 |
| 1369723908828 | 148.20283473122277 | 32.16382140372741 | 413.97877421232045 | 0.3143190164592526 |
| 1369723908953 | 148.41315895529624 | 32.112540587773736 | 413.9786455901293 | 0.31384587833970407 |
| 1369723909046 | 148.41315895529624 | 32.112540587773736 | 413.9786455901293 | 0.31384587833970407 |
| 1369723909171 | 148.28362039296974 | 32.03621383587529 | 414.00566054092883 | 0.31431633125759034 |
| 1369723909265 | 148.41315895529624 | 32.112540587773736 | 413.9786455901293 | 0.31384587833970407 |
| 1369723909406 | 148.41315895529624 | 32.112540587773736 | 413.9786455901293 | 0.31384587833970407 |
| 1369723909500 | 148.33235842391696 | 32.24014101652165 | 413.9517672034058 | 0.3141871339440349 |
| 1369723909609 | 148.28362039296974 | 32.03621383587529 | 414.00566054092883 | 0.31431633125759034 |
| 1369723909718 | 148.28362039296974 | 32.03621383587529 | 414.00566054092883 | 0.31431633125759034 |
| 1369723909812 | 148.41315895529624 | 32.112540587773736 | 413.9786455901293 | 0.31384587833970407 |
| 1369723909921 | 148.33236117541048 | 32.240140474323965 | 413.9517677905219 | 0.3138488360159437 |
| 1369723909989 | 585.4705882352941 | 987.4705882352941 | 9.730592655183713 | 22.156567757883668 |
| 1369723910031 | 148.41315895529624 | 32.112540587773736 | 413.9786455901293 | 0.31384587833970407 |
| 1369723910140 | 148.20283473122277 | 32.16382140372741 | 413.97877421232045 | 0.3143190164592526 |
| 1369723910265 | 148.41315895529624 | 32.112540587773736 | 413.9786455901293 | 0.31384587833970407 |
| 1369723910359 | 148.28362039296974 | 32.03621383587529 | 414.00566054092883 | 0.31431633125759034 |
| 1369723910468 | 148.0732921459561 | 32.08747000673543 | 414.0055931047134 | 0.314789083483154 |
| 1369723910528 | 657.5714285714286 | 710.2857142857143 | 21.075694733387937 | 37.618113309675536 |
| 1369723910593 | 148.15406136463798 | 31.95985218310014 | 414.0324765351859 | 0.3147865998069337 |
| 1369723910687 | 148.41315895529624 | 32.112540587773736 | 413.9786455901293 | 0.31384587833970407 |
| 1369723910978 | 506.0 | 616.75 | 20.107076445507495 | 22.61774745636709 |
| 1369723911278 | 1036.0 | 201.0 | 29.031762631586048 | 43.965895873961216 |
| 1369723911589 | 1046.6 | 181.7 | 27.368931611092986 | 49.54644285920031 |
| 1369723912848 | 1046.6923076923076 | 186.46153846153845 | 14.785121358693491 | 30.684498717405553 |
| 1369723913732 | 1041.5882352941176 | 177.7058823529412 | 21.800670363200034 | 49.34116104238305 |
| 1369723914660 | 1024.4285714285713 | 206.57142857142858 | 20.81184364496812 | 41.38421270514255 |
| 1369723914959 | 402.75 | 261.75 | 20.780049521744104 | 26.56360291827899 |
| 1369723915245 | 1044.5833333333333 | 176.08333333333334 | 18.733166352589453 | 48.43910839623513 |
| 1369723916025 | 383.5 | 282.5 | 26.397015602146077 | 39.90613987846983 |
| 1369723916285 | 1047.0526315789473 | 173.0 | 24.53972638155315 | 39.15223501826191 |
| 1369723917087 | 400.2 | 252.2 | 21.558220690653243 | 38.32075155839195 |
| 1369723917125 | Definir_Face | 163.49151484886175 | -699.9733461449198 | 314.25 |

Figure 5.10. La verbosité des traces multi-sources de TELEOS

Le premier verrou technique à soulever est de fusionner ces traces de manière à les représenter sous forme de séquences cohérentes. Il s'agit de lier chaque action exécutée aux perceptions qui ont accompagné son exécution et aux gestes qui l'ont précédée de manière à ce que l'ensemble de séquences produites reflètent l'aspect perceptivo-gestuel de chaque interaction. Le verrou scientifique à ce niveau consistera à valider la cohérence de cette représentation relativement à la connaissance multimodale qu'elle est sensée traduire.

Le deuxième verrou technique à soulever, est de proposer des outils capables de prendre en charge le traitement des traces ainsi représentées à des fins d'analyses didactiques et à des fins de production de services tutoriels, le principal objectif étant de pouvoir extraire

automatiquement des éléments de connaissances pouvant servir à l'enrichissement du modèle de connaissances de l'environnement d'apprentissage. Le verrou scientifique à ce niveau est d'évaluer et de valider la pertinence des résultats générés par ces outils. La démarche d'automatisation d'acquisition des connaissances implique une exploitation fine des traces d'activités enregistrées à chaque utilisation du système tutoriel. Plusieurs contraintes doivent être prises en compte dans le processus :

- *la nécessité d'identifier les phases distinctes des interactions produites au cours d'une session*
- *la nécessité de traiter les traces en tenant compte de leur hétérogénéité*
- *la capacité d'identifier les erreurs*
- *la capacité de dégager des patrons de connaissances pertinentes et réutilisables de l'ensemble des traces d'interactions*

Les deux premières contraintes posent le problème de l'hétérogénéité des traces induite par l'utilisation de plusieurs outils dans l'environnement d'apprenti et celle liée à la diversité de groupes d'actions distincts dans les traces d'une même source et pour une même activité. Cette double hétérogénéité implique un niveau de difficulté supplémentaire du point de vue du diagnostic des connaissances mais constitue aussi un facteur de précision des résultats de l'extraction automatique des connaissances. Enfin, les outils et techniques envisagés pour réaliser ces traitements sont à concevoir dans un souci de généricité pour être applicables au traitement de traces brutes provenant d'autres domaines faisant intervenir des connaissances perceptivo-gestuelles telle que les systèmes de simulation de vol ou de conduite automobile.

# PARTIE 3
# CONTRIBUTIONS

# CHAPITRE 6.

# FORMALISATION DES SEQUENCES PERCEPTIVO-GESTUELLES

*Ce chapitre présente la contribution théorique de cette thèse. Elle consiste en une proposition de formalisation des séquences d'interactions multimodales de l'apprenant avec le STI. Nous décrivons la méthodologie adoptée pour intégrer dans les séquences, les modalités perceptivo-gestuelles des interactions et des connaissances qu'elles sous-tendent. Nous décrivons aussi une proposition d'enrichissement de ces séquences avec les interactions du STI liées à l'activité de l'apprenant.*

## Sommaire

**6.1. Introduction** ..... **83**
**6.2. Motivation** ..... **83**
**6.3. Jonction entre Actions, Gestes et Perceptions** ..... **83**
6.3.1. Interaction perceptivo-gestuelle de type *« contrôle a priori »* ..... 84
6.3.2. Interaction perceptivo-gestuelle de type *« contrôle a posteriori »* ..... 84
6.3.3. Interaction perceptivo-gestuelle de type *« mixte »* ..... 84
6.3.4. Bilan ..... 84
**6.4. Différenciation des Perceptions** ..... **84**
6.4.1. Les perceptions visuelles de contrôle ..... 85
6.4.2. Les perceptions visuelles d'exploration ..... 85
6.4.3. Bilan ..... 85
**6.5. Caractérisation de l'Etat de la Simulation** ..... **86**
**6.6. Représentation d'une Séquence Perceptivo-Gestuelle** ..... **86**
6.6.1. Items, itemsets et séquences ..... 86
6.6.2. Prendre en compte les « interactions du système » ..... 87
6.6.3. Formalisation des séquences perceptivo-gestuelles ..... 87
**Synthèse** ..... **90**

## 6.1. INTRODUCTION

Pour couvrir les différentes facettes des connaissances multimodales telles que les connaissances perceptivo-gestuelles, des périphériques divers sont exploités. Les traces produites par ces périphériques fournissent des informations riches et souvent précises sur l'activité de l'apprenant. Cependant elles sont hétérogènes et de ce fait difficiles à traiter automatiquement par une machine. Pour faciliter le traitement de ces traces multi-sources, il convient de leur fournir une représentation formelle qui reflète de manière cohérente l'activité multimodale à laquelle elles sont liées.

## 6.2. MOTIVATION

Les connaissances perceptivo-gestuelles requièrent la coordination de connaissances théoriques, d'analyses perceptuelles et d'habiletés motrices (voir section *« 4.1.2. Le caractère perceptivo-gestuel des connaissances »*). Dans le cas de la chirurgie orthopédique percutanée, trois types de connaissances doivent être coordonnées. Il s'agit des connaissances théoriques en anatomie ; des connaissances relatives aux analyses visuelles nécessaires au guidage par imagerie des outils chirurgicaux ; et des connaissances relatives aux gestes et aux perceptions haptiques liés à la manipulation des outils d'insertion percutanée.

Les connaissances théoriques en anatomie ne suffisent pas à certifier la maîtrise des compétences chirurgicales requises. En effet, tout en étant indispensables, leur but précis est de fournir la base théorique nécessaire à l'analyse efficiente des informations visuelles renvoyées par les radiographies et à l'acquisition de compétences empiriques relatives aux gestes chirurgicaux et à la manipulation des outils. Les connaissances de ce type ne peuvent pas non plus être évaluées uniquement sur leur modalité motrice. En considérant le cas de la chirurgie percutanée, la maîtrise d'un geste ne se mesure pas exclusivement à l'habileté motrice pour le réaliser. La prise d'informations visuelles précises entre aussi en jeu pour l'analyse, par exemple, de la trajectoire des outils chirurgicaux rapportée par les radiographies. Les connaissances théoriques sur la base desquelles ces analyses sont validées constituent une autre modalité importante.

Il convient donc de traiter ces traces diverses de manière conjointe dans le but d'analyser, dans leur globalité, les connaissances qu'elles sous-tendent.

## 6.3. JONCTION ENTRE ACTIONS, GESTES ET PERCEPTIONS

Le premier défi de la représentation des traces consiste à identifier les traces de chaque source représentant un aspect de la même interaction. En d'autres mots, il faut parvenir à relier actions, perceptions et gestes exécutés dans le but d'atteindre un même objectif. Pour illustrer par un exemple simple en chirurgie orthopédique percutanée, une prise de radio de profil, jointe à l'analyse de la position de l'épineuse de la vertèbre affectée et à une inclinaison puis un déplacement du trocart sur l'axe postéro-antérieur permet d'inférer un élément de connaissance relatif au démarrage de la trajectoire d'insertion du trocart.

Nous partons du principe que les perceptions visuelles sont exploitées comme support pour valider ou vérifier l'exécution d'une action ou la réalisation d'un geste et que les perceptions haptiques sont exploitées comme support d'adaptation du geste. Il existe, de ce point de vue, plusieurs combinaisons possibles entre les différentes modalités de l'interaction. Nous

distinguons ainsi des interactions perceptivo-gestuelles de type *« contrôle a priori »*, *« contrôle a posteriori »* ou *« mixte »*.

### 6.3.1. Interaction perceptivo-gestuelle de type *« contrôle a priori »*

Une interaction perceptivo-gestuelle de type *contrôle a priori* fait référence à une interaction multimodale plaçant les contrôles perceptuels avant les actions ou les gestes. Pour illustrer par un exemple simple en aviation, le pilote vérifie l'état de l'avion en lisant les indicateurs pertinents avant d'exécuter les actions incluses dans la procédure. Dans ce cas de figure, l'interaction perceptivo-gestuelle est représentée par des items de modalités perceptuelles suivis des items d'action ou de geste.

### 6.3.2. Interaction perceptivo-gestuelle de type *« contrôle a posteriori »*

Une interaction perceptivo-gestuelle est de type *« contrôle a posteriori »* lorsque les items de modalités perceptuelles se placent après les actions et les gestes. En d'autres mots, les prises d'informations perceptuelles sont réalisées systématiquement après l'exécution des actions et gestes qu'elles accompagnent. Prenons à nouveau un exemple en aviation. Une interaction perceptivo-gestuelle de type « contrôle *a posteriori* » est observée si le pilote engage une procédure quelconque avant la lecture des indicateurs du tableau de bord.

### 6.3.3. Interaction perceptivo-gestuelle de type *« mixte »*

Une interaction perceptivo-gestuelle de type mixte désigne une interaction où les occurrences des items de différentes modalités sont simultanées. Il s'agit d'une interaction au cours de laquelle les prises d'informations perceptuelles s'effectuent dans le continuum d'un même geste ou en même temps qu'une action. Pour reprendre notre exemple en aviation, il s'agirait pour le pilote de procéder à une manipulation de la manette des gaz tout en jaugeant les indicateurs des instruments de son appareil.

### 6.3.4. Bilan

La pertinence des types d'interaction perceptivo-gestuelles décrits ci-dessus, peut varier d'un domaine à l'autre. Ces liens ne sont pas non plus mutuellement exclusifs. Il est en effet possible que les trois types d'interactions s'observent dans le même domaine. Ils peuvent, par exemple, définir des stratégies de résolution de problème différentes d'un apprenant à un autre.

Il est aussi théoriquement possible d'observer les trois types d'interactions au cours d'un exercice résolu par un même apprenant dans la mesure où l'un ou l'autre peut être jugé plus pertinent pour certaines tâches. Par exemple, au cours d'une simulation de vertébroplastie, il est plus probable d'observer des interactions de type mixte lorsque l'outil d'insertion (le trocart) se trouve en dehors des zones anatomiques sensibles (par exemple, à l'intérieur d'une vertèbre). En effet, la stratégie la plus adaptée dans ce cas de figure est de manipuler le trocart avec des gestes mesurés et de vérifier systématiquement sa progression sur les radios après chaque geste.

## 6.4. Differenciation des Perceptions

Toutes les perceptions ne sous-tendent pas les mêmes objectifs et ne mobilisent pas les mêmes ressources cognitives de l'apprenant. Par exemple, en chirurgie orthopédique percutanée, les

perceptions visuelles requièrent du chirurgien la capacité mentale à coordonner les images radios en deux dimensions pour pouvoir se représenter de manière précise la position de ses outils par rapport aux zones anatomiques traversées. Pour leur part, les perceptions haptiques donnent une information moins précise sur la position des outils mais moins difficile à interpréter quant à la texture de la région anatomique traversée par les outils.

Certaines perceptions visent une analyse précise de l'environnement alors que d'autres visent simplement une prise d'informations sur l'état de l'environnement. Par exemple, la visualisation de certains points précis d'une vertèbre sur une radio peut révéler une analyse de la validité du point d'insertion du trocart alors qu'une pression sur l'outil peut constituer une simple sollicitation d'un retour haptique dont le but est d'informer le chirurgien sur la rigidité de la zone anatomique traversée.

D'autres paramètres peuvent aussi permettre de différencier les perceptions de l'apprenant et d'inférer ses intentions, sa stratégie ou d'une manière plus générale son profil. Par exemple, pour les perceptions visuelles, ces paramètres peuvent être la durée des visualisations, leur fréquence, les points ou les zones les plus regardées ou une combinaison de ces différents paramètres. A titre d'illustration, les visualisations d'un chirurgien expert lors d'analyses de la trajectoire des outils seront *a priori* sensiblement moins longues et moins fréquentes que celles d'un débutant.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons spécifiquement à la distinction des perceptions visuelles sous l'hypothèse qu'elles permettront d'inférer avec plus de précisions les intentions de l'apprenant ou d'une manière générale, sa stratégie. Nous proposons de concevoir cette distinction sous deux grandes catégories : les perceptions visuelles de contrôle et les perceptions d'exploration. Nous les décrivons dans les paragraphes qui suivent.

### 6.4.1. Les perceptions visuelles de contrôle

Les perceptions visuelles de contrôle sous-tendent une activité cognitive dont le but est d'analyser l'environnement en mobilisant des connaissances précises. Au-delà d'une simple prise d'information visuelle, leur rôle est d'évaluer les actions exécutées. Par exemple, en vertébroplastie, la vérification du positionnement de l'épineuse pour décider du centrage de la vertèbre ciblée sont des perceptions de contrôle. En aviation, la lecture des indicateurs d'altitude, de la puissance du moteur et du cap de l'avion au cours de la préparation de l'atterrissage sont aussi des perceptions de contrôle. Ces perceptions ciblent les points précis de l'environnement qui rendent compte des conséquences des actions ou gestes exécutés.

### 6.4.2. Les perceptions visuelles d'exploration

Les perceptions visuelles dites de d'exploration se limitent à une prise d'information sur l'état de l'environnement. Elles sont traduites par des visualisations moins précises que les perceptions de contrôle. Elles ciblent les éléments de l'environnement permettant d'agir sur celui-ci, c'est-à-dire, les éléments de l'interface liés à l'exécution des actions tel que la manette de manipulation de l'outil de radioscopie en chirurgie percutanée ou les boutons du tableau de bord en pilotage.

### 6.4.3. Bilan

A travers ces définitions, nous pouvons constater l'importance de la prise en compte de l'état de l'environnement lors des contrôles et des vérifications des actions ou gestes. De ce fait, nous pensons que la prise en compte des perceptions dans l'environnement d'apprentissage nécessite

de caractériser les conséquences des actions et des gestes sur l'ensemble de l'environnement. Nous faisons référence à celles-ci sous le terme « état de la simulation ».

## 6.5. CARACTERISATION DE L'ETAT DE LA SIMULATION

L'état de la simulation désigne spécifiquement les positionnements de tous les artefacts de l'environnement de simulation à l'exécution d'une action [Guéraud *et al.* 1999]. Il rend compte de la manière dont l'exécution d'une action affecte l'environnement. Avant l'exécution d'une action, l'état de la simulation est une information exploitée par l'apprenant pour prendre sa décision ; après l'exécution de l'action, l'état de la simulation traduit les conséquences de celle-ci sur l'environnement.

L'objectif est non seulement de tracer les conséquences des actions de l'apprenant sur l'environnement d'apprentissage mais aussi la manière dont cette action a été exécutée. Cette information peut être discrète (*ex. :* « *Le trocart a une inclinaison caudale* »), ou continue (*ex. :* « *Le trocart est inclinée rapidement dans l'axe céphalo-caudal* »).

## 6.6. REPRESENTATION D'UNE SEQUENCE PERCEPTIVO-GESTUELLE

La représentation des séquences doit favoriser leur exploitation automatique à des fins d'analyse de l'apprentissage et de production de services tutoriels. Celles-ci doivent pouvoir se réaliser de manière adaptée à la nature multimodale des interactions et des connaissances que ces interactions sous-tendent.

Cela requiert que chaque séquence perceptivo-gestuelle fasse le lien adéquat entre actions et gestes, les perceptions qui accompagnent ces derniers et l'état de la simulation qui en résulte. Il est important que ce lien garde la séquentialité de chacun des éléments contenus dans une même séquence car, hypothétiquement, cet ordre apporte des précisions supplémentaires sur le comportement de l'apprenant ou encore sur sa stratégie. En d'autres mots, une séquence représente les différentes facettes d'une même interaction mais garde l'ordre temporel de l'occurrence de ces différentes facettes.

### 6.6.1. Items, itemsets et séquences

Pour représenter les différentes modalités d'une séquence perceptivo-gestuelle tout en conservant la séquentialité de leurs occurrences, nous considérons chaque élément constituant la séquence comme un item et chaque groupe d'items dont les occurrences sont similaires, comme un itemset. Les définitions 6.1 et 6.2 décrivent de manière formelle les notions d'item et d'itemset.

> **Définition 6.1.** *(itemset)*. Un itemset $I$ est un ensemble non vide d'items $i$ tel que $I = \{i_1, i_2, ..., i_n\}$. Un item ne peut être présent qu'une seule fois dans un itemset mais peut figurer dans plusieurs itemsets.
>
> **Définition 6.2.** *(séquence)*. Une séquence $S$ est une liste ordonnée d'itemsets tel que $S : <I_1, I_2, ..., I_m>$. La **taille** de S est le nombre $m$ d'itemsets qu'elle contient. La **longueur** de S est le nombre $|I_1 \cup I_2 \cup ... \cup I_m|$ d'items qu'elle contient.

Ce choix de représentation est un parti pris visant à formater les séquences de manière à ce qu'elles puissent être exploitées par des algorithmes de fouille de données. L'objectif est de

permettre l'extraction automatique de patterns et d'associations d'interactions perceptivo-gestuelles fréquentes à partir de l'ensemble des séquences ainsi représentées.

### 6.6.2. Prendre en compte les « interactions du système »

Nous désignons par *interactions du système*, les interactions ne venant pas directement de l'activité de l'apprenant sur l'interface mais ayant un rapport direct avec celle-ci. En d'autres mots, il s'agit des réactions du système aux actions de l'apprenant. Pour illustrer, prenons l'exemple d'un STI où l'apprenant peut solliciter de l'aide au système au cours de la résolution d'un problème. Il peut être pertinent de considérer le contenu et la forme de l'aide envoyée dans la mesure où la façon dont elles sont prises en compte et exploitées dans l'apprentissage peut avoir une corrélation forte avec les performances de l'apprenant [Paquette *et al.* 2012]. Dans notre cas d'étude, les interactions systèmes considérées sont l'état de la simulation et les résultats du diagnostic de l'apprenant.

#### L'état de la simulation

L'état de la simulation n'est pas directement tracé par le système mais résulte d'un traitement dont l'objectif est d'effectuer une « photographie » de l'environnement d'apprentissage à la suite d'interactions directes de l'apprenant. La prise en compte de l'état de la simulation dans les séquences vise à rendre compte de l'ensemble des informations qui sous-tendent les décisions de l'apprenant. Partant du principe que ces décisions ne sont pas restreintes par une marche à suivre prédéfinie, comme par exemple avec les règles de production, nous faisons l'hypothèse que l'état de la simulation apporte des précisions supplémentaires non négligeables dans l'analyse de l'activité de l'apprenant.

#### Evaluation de l'activité de l'apprenant

Dans le cas où l'on veut procéder à des traitements automatiques supervisés sur l'ensemble des séquences, il est nécessaire de considérer les évaluations de l'activité de l'apprenant à partir de règles expertes [Amershi et Conati, 2007]. Les traitements automatiques supervisés (ex : l'apprentissage automatique) permettent de compléter les traces d'activité de l'apprenant par des évaluations à partir de règles expertes de manière à réduire l'extraction de motifs de connaissances inutiles souvent observée pour des traitements non-supervisés [Beck, 2007]. Les évaluations à partir de règles expertes considérées dans ce travail sont celles générées automatiquement par le module « modèle de l'apprenant » sur la base d'un paradigme expert (voir section *« 4.2.3. Diagnostic des connaissances »*). Nous considérons ces diagnostics comme des interactions du système car ils constituent des réactions directement liées à l'activité de l'apprenant.

### 6.6.3. Formalisation des séquences perceptivo-gestuelles

Nous décrivons ci-dessous la représentation conceptuelle proposée pour les séquences perceptivo-gestuelles sur la base des caractéristiques décrites dans les sections précédentes. Nous faisons une distinction entre des séquences perceptivo-gestuelles et des séquences perceptivo-gestuelles enrichies. Les séquences perceptivo-gestuelles ne représentent que les interactions impliquant des actions et/ou des gestes et les perceptions accompagnant ceux-ci. Les séquences perceptivo-gestuelles enrichies comportent des informations sur l'état de la simulation et des informations sur les évaluations de l'activité de l'apprenant à partir de règles expertes.

### Séquences perceptivo-gestuelles

**Définition 6.3** *(séquence perceptivo-gestuelle).* Une séquence perceptivo-gestuelle est une liste d'itemsets *S*, tel que :

$$S : < (A_{i,\, i=1..p}\ [a_{ij,\, j=1..q}];\ |\ G_{i,\, i=1..r}\ [g_{ij,\, j=1..s}];\ [P_{k,\, k=1..v}\ [q_{kl,\, l=1..w}]]);\ (P_{k,\, k=1..v}\ [q_{kl,\, l=1..w}])>.$$

Les parenthèses, « (» et «)», délimitent les itemsets de la séquence. Il n'y a pas de restriction à représenter des items de catégories différentes dans un même itemset si leurs occurrences sont simultanées. Par exemple, dans le cas d'un lien mixte entre les modalités de la séquence, une action peut être représentée dans le même itemset qu'une visualisation si l'action a été exécutée au même moment que la prise d'information visuelle.

- *$A_i = A_1 \ldots A_p$ représente l'ensemble des actions enregistrées dans la séquence ;*

$$\begin{cases} \text{si } r >= 1 \text{ alors } p >= 0 \\ \quad \text{sinon}, p >= 1 \end{cases}$$

- *$G_i = G_1 \ldots G_r$ : l'ensemble des gestes enregistrés dans la séquence*

$$\begin{cases} \text{si } p >= 1 \text{ alors } r >= 0 \\ \quad \text{sinon}, r >= 1 \end{cases}$$

$|A \cup G| \geq 1$: Une séquence perceptivo-gestuelle comprend au moins une action ou un geste.

- *$a_{ij} = a_{i1} \ldots a_{iq}$ : l'ensemble des paramètres des actions ; $q >= 0$*
- *$g_{ij} = g_{i1} \ldots g_{is}$ : l'ensemble des paramètres des gestes ; $s >= 0$*
- *$P_k = P_1 \ldots P_v$ : l'ensemble des paramètres des perceptions ; $v \geq 1$*

L'ensemble des perceptions n'est pas vide.

- *$q_{kl} = q_{k1} \ldots q_{kw}$ : l'ensemble des paramètres des perceptions (ex : la durée d'une visualisation pour des perceptions visuelles) ; $w \geq 0$*

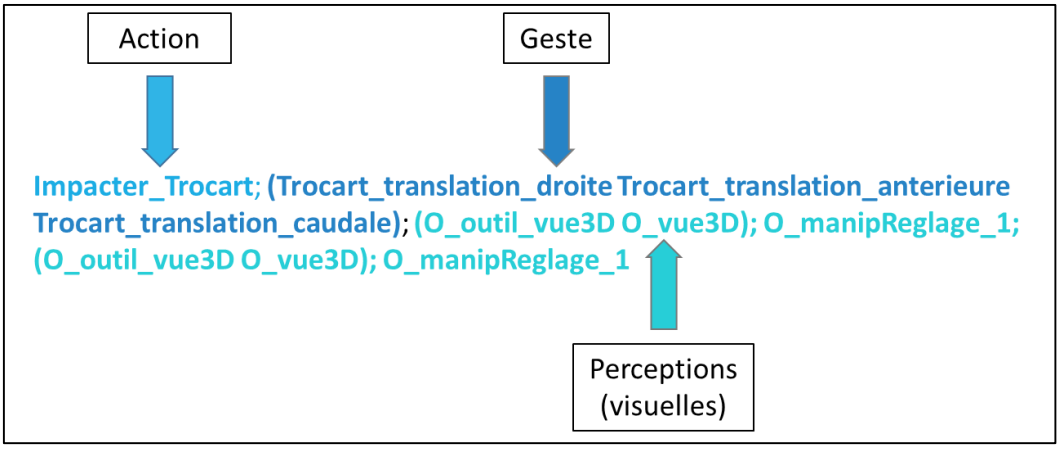



**Figure 6.1.** Représentation d'une séquence perceptivo-gestuelle

La séquence perceptivo-gestuelle représentée dans la figure 6.1, représente une exécution de l'action « `Impacter_trocart` ». Elle traduit l'action d'amener le trocart au contact de la vertèbre ciblée au niveau du point d'entrée visé. Le geste précise que le trocart a été simultanément enfoncé (`trocart_translation_antérieure`), avec un déplacement vers le côté droit du patient (`trocart_translation_droite`), dans la direction de ses membres inférieurs (`trocart_translation_caudale`). Les paramètres de perceptions visuelles rapportent les zones d'intérêt de l'interface qui ont été analysées. Par exemple, `O_outil_vue3D`, fait référence à une vérification du positionnement du trocart sur le modèle en 3 dimensions du patient et `O_manipReglage_1`, à une visualisation du panel de réglages du fluoroscope. Le suffixe *« _1 »* précise que la visualisation de cette zone a duré moins de 1000 millisecondes.

### Séquences perceptivo-gestuelles enrichies

**Définition 6.4** *(séquence perceptivo-gestuelle enrichie)*. Une séquence perceptivo-gestuelle enrichie est une liste de séquences $S_a$, tel que :

$$S_a : < (\dagger_i, S_i [\tau_{ij, j=1..\mu}])_{i=1..\eta} (V_{q=1..v}[\upsilon_{r=1..w}])>$$

Telle que décrite dans la définition 6.4, une séquence perceptivo-gestuelle enrichie contient une ou plusieurs séquences perceptivo-gestuelles caractérisées par des informations sur l'état de la simulation et annotées par des évaluations à partir de règles expertes. Une évaluation peut le cas échéant concerner plusieurs séquences.

- *$\dagger_i = \dagger_1 ... \dagger_\eta$ représente l'estampille temporelle marquant l'ordre de la séquence $S_i$ dans la séquence enrichie ;*
- *$S_i = S_1 ... S_\eta$ : l'ensemble des séquences perceptivo-gestuelles composant la séquence enrichie*
- *$\tau_{ij} = \tau_{i1} ... \tau_{i\mu}$ : l'ensemble des états de la simulation enregistrés dans une séquence $S_i$*
- *$V_q = V_1 ... V_\eta$: l'ensemble des variables d'évaluations à partir de règles expertes de la séquence enrichie*
- *$\upsilon_r$: les valeurs des variables d'évaluation*

Une estampille temporelle fait référence à un indice marquant l'ordre d'occurrence de chaque élément de la séquence. Il peut s'agir par exemple d'un timestamp ou d'un numéro d'ordre. Dans certains cas, la mention explicite de l'estampille temporelle des éléments de la séquence n'est pas indispensable au traitement de celle-ci. C'est le cas par exemple de notre cas d'étude où la suite des items d'interaction contenus dans les séquences fournit une information suffisante pour les traitements ciblés. Ces traitements seront présentés en détails dans le chapitre 7 du manuscrit. La figure 6.2 illustre la représentation formelle décrite dans la définition 6.4, par un exemple de notre cas d'étude.

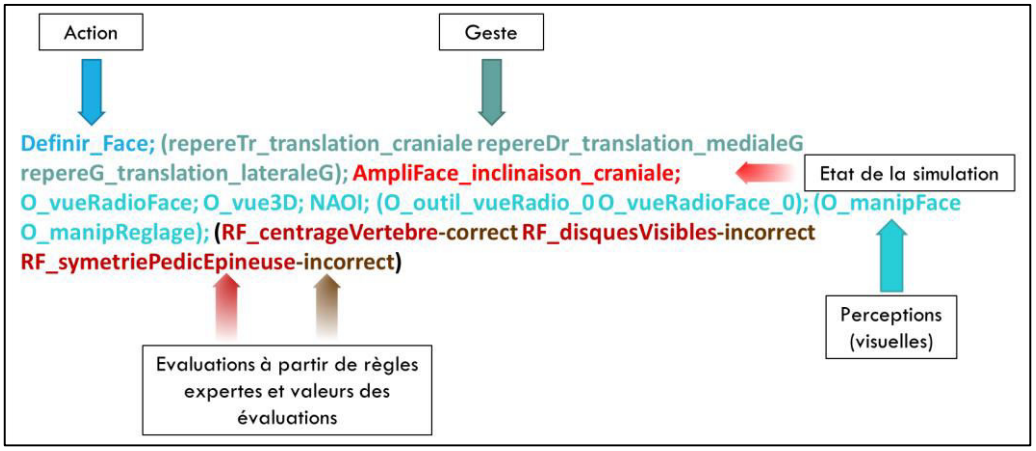



**Figure 6.2.** Représentation d'une séquence perceptivo-gestuelle enrichie

La séquence illustrée ci-dessus représente une action de prise de radio de face suivie par le traçage des repères cutanés. Pour rappel, les repères cutanés servent à marquer le point d'entrée du trocart sur la peau du patient. L'item sur l'état de la simulation, `AmpliFace_inclinaison_craniale`, précise que l'appareil de radioscopie est incliné vers la tête du patient. Enfin, les évaluations rapportées informent sur la conformité de la radio prise avec les règles expertes correspondantes. Par exemple, `RF_centrageVertebre-correct`, rapporte que le centrage de la vertèbre ciblée sur la radio de face est correcte alors que `RF_disquesVisibles-incorrect` précise que la visibilité des disques des vertèbres

affichées sur la radio est incorrecte et `RF_symetriePedicEpineuse-incorrect`, que la symétrie de l'épineuse par rapport aux pédicules de la vertèbre ciblée est incorrecte.

### SYNTHESE

- Formalisation de la représentation des séquences perceptivo-gestuelles
- Caractérisation de la jonction entre les modalités d'une interaction perceptivo-gestuelle
- Différenciation des comportements en relation avec les perceptions visuelles
- Enrichissement des séquences avec des interactions système : état de la simulation et évaluations automatiques à partir de règles expertes
- Proposition des concepts de séquences perceptivo-gestuelles et séquences perceptivo-gestuelles enrichies

# CHAPITRE 7.

# PRESENTATION DE PETRA : UN FRAMEWORK DEDIE AU TRAITEMENT DE TRACES PERCEPTIVO-GESTUELLES

*Dans ce chapitre, nous présentons le framework PeTRA, l'une des contributions informatiques de cette thèse. Il a été proposé pour permettre d'adresser le défi de traitement de traces éducationnelles multi-sources hétérogènes sous-tendant des connaissances perceptivo-gestuelles. PeTRA regroupe un ensemble d'outils logiciels appelés « opérateurs », permettant de générer des séquences perceptivo-gestuelles à partir de ces traces et de traiter ces séquences. Nous décrivons chacun de ces opérateurs dans les sections qui suivent.*

## Sommaire

**7.1. Introduction** ..... **93**
**7.2. Préparation des Traces** ..... **94**
7.2.1. L'opérateur de nettoyage ..... 94
7.2.2. L'opérateur de filtrage ..... 94
**7.3. Transformation des Traces** ..... **95**
7.3.1. L'opérateur de fusion ..... 95
7.3.2. L'opérateur de sémantisation ..... 97
7.3.3. L'opérateur d'annotation ..... 99
7.3.4. L'opérateur de répartition de phases ..... 101
7.3.5. L'opérateur de codage/décodage ..... 103
**7.4. Analyse des Séquences perceptivo-Gestuelles** ..... **103**
7.4.1. L'opérateur d'analyse du parcours de résolution ..... 104
7.4.2. L'opérateur d'analyses statistiques ..... 105
**7.5. Extraction de Connaissances Perceptivo-Gestuelles** ..... **105**
7.5.1. Les opérateurs d'extraction de patterns de connaissances ..... 105
7.5.2. L'opérateur de sélection de patterns ..... 108
**7.6. Limites du framework PeTRA** ..... **109**
7.6.1. Limites générales du framework ..... 109
7.6.2. Limites des opérateurs ..... 109
**7.7. Bilan et Conclusion** ..... **111**
**Synthèse** ..... **114**

## 7.1. INTRODUCTION

Le framework PeTRA (PErceptual-gestural TRAces treatment framework) offre un ensemble d'outils permettant, d'une part, de représenter des traces multi-sources hétérogènes en séquences perceptivo-gestuelles et, d'autre part, de procéder à des analyses de l'apprentissage et à l'extraction de motifs de connaissances fréquents sur la base de ces séquences.

Tel que schématisé dans la figure 7.1, le framework est développé sous la forme d'un processus exploitant une chaîne de logiciels. Ceux-ci sont des outils à fonction unique développés en Java, que nous désignons sous le terme « opérateurs ». Cette structure a été choisie dans un souci de rendre le processus générique, flexible et évolutif. Spécifiquement, nous avons voulu le rendre exploitable à partir de la plateforme UnderTracks[1] [Bouhineau *et al.* 2013 ; Mandran *et al.* 2015 (a)] conçue pour la mutualisation d'outils de traitement de données. Cette plateforme offre une grande flexibilité de modulation des opérateurs. En effet, elle facilite les manipulations qui consistent à écarter au besoin les opérateurs jugés non pertinents pour les objectifs de traitement visés, à agencer au besoin les opérateurs que l'on veut exploiter et à en intégrer de nouveaux si nécessaire.

Le framework a vocation à être utilisé essentiellement par des chercheurs ou autres spécialistes en conception de STI et en analyse et fouille de données éducationnelles.

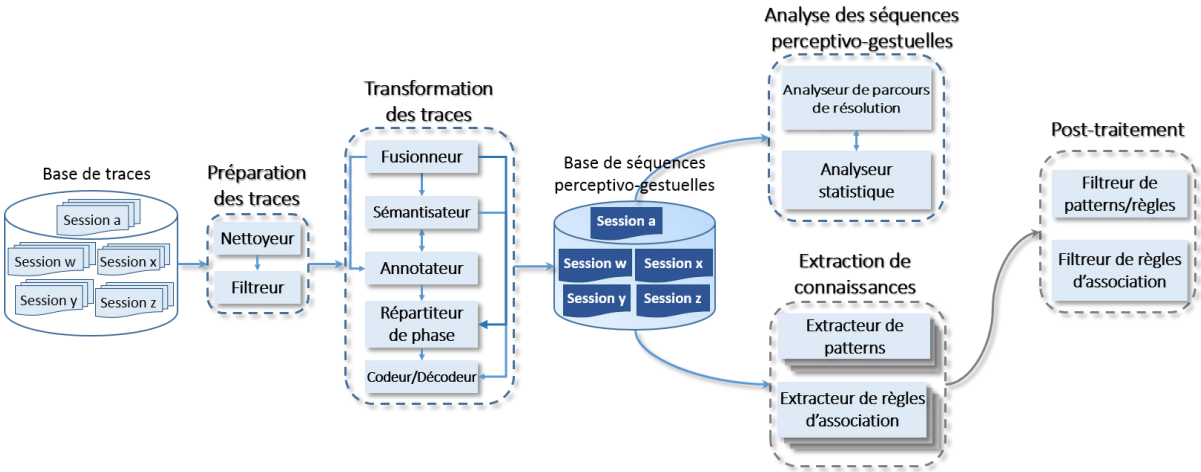



Figure 7.1. Schéma du framework PeTRA

Dans les sections suivantes, nous présentons les opérateurs de PeTRA par catégorie de traitement. Nous décrivons d'abord les opérateurs de « préparation des traces » et de « transformation des traces ». Après cette étape de transformation, on obtient une représentation des interactions sous forme de séquences perceptivo-gestuelles. A partir de là, on peut passer à la phase d' «analyse des séquences perceptivo-gestuelles » et/ou d' « extraction de connaissances ». Les opérateurs de la phase de « post-traitement » font suite aux opérations d'extraction de connaissances. Nous détaillons le fonctionnement de chaque opérateur dans les sections qui suivent.

[1] *projet-undertracks.imag.fr*

## 7.2. PREPARATION DES TRACES

Les données brutes comportent souvent des bruits représentés par des données erronées, des erreurs de formatage ou tout simplement des données non pertinentes pour la suite des traitements. Il est important d'écarter ces bruits dans le but d'éviter ou de réduire les biais qu'ils sont susceptibles de provoquer par la suite. Les opérateurs de préparation de traces sont dédiés à cette tâche.

### 7.2.1. L'opérateur de nettoyage

#### Objectif

L'opérateur de nettoyage ou « nettoyeur » a pour objectif spécifique de supprimer des traces d'activité brutes fournies à l'entrée, les bruits liés aux données erronées et aux erreurs de formatage des données. Le nettoyeur doit pouvoir détecter les erreurs et les réparer.

#### Fonctionnement

Le nettoyeur reçoit en entrée les traces brutes des différentes sources de l'environnement d'apprentissage. Pour pouvoir effectuer le nettoyage de ces traces, il reçoit en paramètre une liste des erreurs à chercher dans chaque séquence sous forme d'expressions régulières et les instructions de corrections, de remplacement ou de suppression correspondantes.

Cela implique que les types d'erreurs présentes dans les données soient connus *a priori*. Autrement, il est nécessaire d'établir une liste d'erreurs potentielles ou d'erreurs courantes à détecter et corriger éventuellement. Dans sa version courante, l'opérateur de nettoyage peut détecter, dans les séquences, d'éventuels caractères non admis. Ces caractères sont limités dans la version actuelle et pour les données de notre cas d'étude, aux espacements doubles, aux caractères accentués ou encore aux lignes vides entre des séquences. L'opérateur vérifie aussi les séparateurs des paramètres et des séquences dont la défection peut induire des biais dans les opérations de traitement avancé.

Le tableau 7.1 dresse la fiche de fonctionnement de l'opérateur de nettoyage : il résume l'objectif de traitement de l'opérateur, les opérateurs pouvant le précéder et le suivre, les données reçues en entrées et les sorties générées après son exécution.

Tableau 7.1. Fiche de fonctionnement de l'opérateur de nettoyage dans le framework PeTRA

| OPERATEUR : NETTOYEUR | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectif** | **Précédent** | **Suivant** | **Entrée** | **Sortie** |
| **Ecarter les bruits des données liés à des erreurs de formatage** | Base de traces brutes | Filtreur ou Fusionneur | · Liste d'erreurs<br>· Instruction de correction<br>· Traces brutes | · Traces nettoyées |

### 7.2.2. L'opérateur de filtrage

#### Objectif

L'opérateur de filtrage ou « filtreur » a pour but d'écarter les paramètres des séquences jugés non pertinents pour la suite des analyses. A titre d'exemple, l'oculomètre de l'environnement d'apprentissage de TELEOS enregistre différents paramètres relatifs à une fixation : le nom de la zone ou point d'intérêt fixé, les coordonnées (x, y) des points de fixation, le diamètre couvert et la

durée de la fixation. Pour les besoins de nos analyses, les paramètres pertinents sont les zones et points d'intérêt fixés et la durée de chaque fixation. Les autres paramètres sont filtrés et écartés de la représentation d'une séquence de visualisation.

#### Fonctionnement

Tel que résumé dans le tableau 7.2 l'opérateur de filtrage peut recevoir en entrée les traces brutes ou les traces traitées par le nettoyeur. Pour réaliser l'opération de filtrage, il est nécessaire d'établir, dans un premier temps, la liste exhaustive de l'ensemble des paramètres enregistrés pour chaque source de traces d'activité. Cela permettra de configurer le filtrage au besoin en indiquant à l'opérateur les paramètres à prendre en compte. Les paramètres à prendre en compte sont représentés sous la forme d'une liste à partir de laquelle le filtreur reconstitue les séquences. Il définit ainsi un nouvel ensemble de séquences où ne figurent que les paramètres nécessaires à l'analyse de l'apprentissage et au traitement automatique des données.

Tableau 7.2. Fiche de fonctionnement de l'opérateur de filtrage dans le framework PeTRA

| OPERATEUR : FILTREUR | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectif** | **Précédent** | **Suivant** | **Entrée** | **Sortie** |
| Eliminer les bruits des données liés aux paramètres de séquences non pertinents pour la suite des traitements | Nettoyeur ou Base de traces brutes | Fusionneur | · Liste des paramètres à filtrer<br>· Traces brutes ou traces nettoyées | · Traces reconstitués sans les paramètres filtrées |

## 7.3. TRANSFORMATION DES TRACES

La phase de transformation des traces contient les opérateurs dont l'objectif est de changer la représentation de celles-ci de manière à refléter la nature multimodale des interactions perceptivo-gestuelles. Ces opérateurs doivent produire un ensemble de traces dont l'analyse permet d'inférer l'état des connaissances perceptivo-gestuelles de l'apprenant. Leur traitement par des algorithmes de fouille de données doit aussi produire des résultats en cohérence avec ces caractéristiques perceptivo-gestuelles.

### 7.3.1. L'opérateur de fusion

#### Objectif

L'opérateur de fusion ou « fusionneur » a pour rôle de synchroniser les traces multi-sources se référant à une interaction multimodale, sur la base de leur correspondance séquentielle. L'objectif est de lier les actions et gestes exécutés aux perceptions qui les accompagnent sans perdre la séquentialité des occurrences des différentes modalités. Le résultat attendu est un ensemble de séquences qui rendent compte de manière cohérente de la nature perceptivo-gestuelle de chaque interaction.

#### Fonctionnement

L'opérateur de fusion reçoit en entrée les traces issues du filtreur, du nettoyeur ou les traces brutes elles-mêmes si les traitements fournis par ces derniers ne sont pas pertinents (Cf. Tableau 7.3).

Tableau 7.3. Fiche de fonctionnement de l'opérateur de fusion dans le framework PeTRA

| OPERATEUR : FUSIONNEUR | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectif** | **Précédent** | **Suivant** | **Entrée** | **Sortie** |
| Produire des séquences perceptivo-gestuelles à partir d'un ensemble de traces multi-sources hétérogènes (jonction des actions, gestes et perceptions) | Nettoyeur ou filtreur ou Base de traces brute | Sémantisateur ou annotateur ou répartiteur de phase ou codeur/décodeur | · Instruction de fusion<br>· Traces multi-sources brutes, nettoyées ou filtrées | · Séquences perceptivo-gestuelles |

L'opération de fusion est réalisée en deux phases. Dans un premier temps, les traces des différentes sources sont jointes dans un même ensemble et ordonnées séquentiellement. Dans un deuxième temps, l'opérateur fusionne chaque action et geste aux perceptions l'accompagnant sur la base de la configuration de fusion choisie. En fonction du domaine, ou de l'analyse didactique ou pédagogique ciblée, la configuration de fusion entre les traces perceptuelles et une action ou un geste peut être établie sur la base d'un lien de type « mixte », « contrôle *a priori* » ou « contrôle *a posteriori* » (voir section *« 6.3. Jonction entre actions, gestes et perceptions »*). En d'autres mots, les perceptions seront considérées comme liées à une action ou un geste si elles sont simultanées à cette action (ou ce geste), si elles la précèdent ou bien la suivent.

Dans notre cas d'étude, chaque action du simulateur TELEOS est associée à plusieurs traces de l'oculomètre et du bras haptique, comme illustré dans la figure 7.2. Par exemple, si l'interne cherche à positionner le trocart, l'action `Placer_Trocart` va être envoyée par le simulateur. Les différentes manipulations (déplacements, force, vitesse) destinés à placer l'outil dans la position et l'inclinaison idoines sont enregistrées par le bras haptique. Les points visualisés sur la radiographie prise et sur le modèle 3D sont enregistrés par l'oculomètre. Plusieurs points de fixations et plusieurs gestes correspondent donc à une occurrence de l'action `Placer_Trocart`.

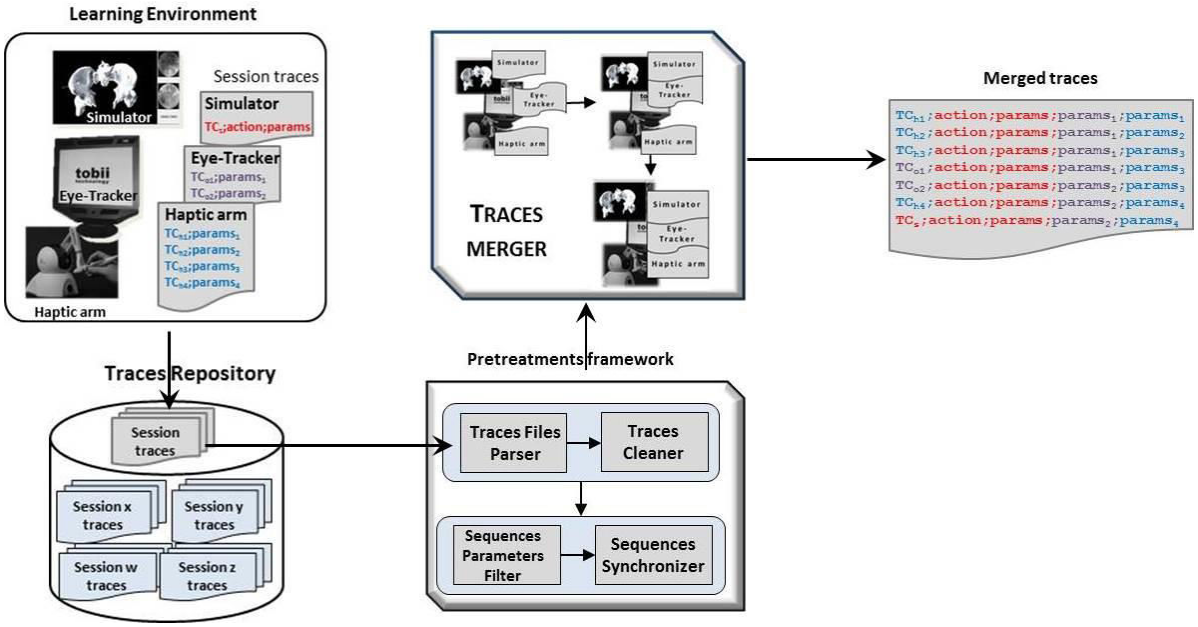



Figure 7.2. Schéma de l'opération de fusion

### Représentation des séquences fusionnées

Les séquences ainsi générées sont représentées comme suit :

$$S_m: <(A[R_{xyz}; R'_{xyz}; X_{xy}; X'_{x'y'}; C_{xy}; C'_{xy}; C''_{xy}] \mid T_{xyz}; T'_{xyz}; F_{xyz}; S_{xyz}); (AOI_{k=1,v}[d_k]; POI_{l=0,n}[d_l])>$$

Le symbole A est le nom de l'action exécutée suivi par les différents paramètres de l'action tels qu'enregistrés par le simulateur TELEOS. $R_{xyz}$ represente les coordonnées de la position du fluoroscope dans sa configuration pour des radios de face, et $R'_{xyz}$, les coordonnées de sa configuration pour des radios de profil. $X_{xy}$ and $X'_{x'y'}$ représentent respectivement les coordonnées en deux dimensions de l'affichage de la vertèbre ciblée sur la dernière radio prise et sur la précédente. $CR_{xy}$, $CR'_{xy}$ and $CR''_{xy}$ désignent respectivement les coordonnées de la position des traits cutanés gauche, droit et transversal. $T_{xyz}$ et $T'_{xyz}$ représentent la position courante de la pointe et de la poignée du trocart ; $F_{xyz}$ et $S_{xyz}$, la force et la vitesse appliquée au geste de manipulation du trocart.

La notation AOI fait référence aux zones d'intérêt (*« Areas Of Interest »* en anglais) et POI aux points d'intérêt (*« Points Of Interest »*) visualisés. Ces visualisations accompagnent l'exécution de l'action et la manipulation du trocart rapportée par les coordonnées $T_{xyz}$, $T'_{xyz}$, $F_{xyz}$ et $S_{xyz}$. Le symbole *d* fait référence à la durée de ces visualisations en millisecondes.

## 7.3.2. L'opérateur de sémantisation

### Objectif

L'opérateur de sémantisation ou « sémantisateur » a été implémenté dans l'optique de traduire les coordonnées brutes des objets de l'environnement de simulation en dénominations sémantiques. Il a pour rôle d'attribuer une dénomination sémantique aux manipulations et états des outils dont l'évolution des paramètres se caractérise par des traces brutes numériques telles que des coordonnées.

Certaines plateformes de simulation enregistrent l'état des objets composant l'environnement sous forme de coordonnées brutes. La manipulation de ces objets se traduit dans les traces par l'enregistrement de leurs nouvelles coordonnées brutes. Nous avons émis l'hypothèse que la traduction sémantique de ces changements d'état amène une information complémentaire pertinente pour l'analyse des interactions de l'apprenant.

### Fonctionnement

Dans notre cas d'étude, les traces ne rapportent que les nouvelles coordonnées des positions des outils quand ils sont manipulés. Pour caractériser les changements résultant de ces manipulations, l'opérateur de sémantisation prend en entrée les traces fusionnées dans l'étape précédente et la liste des dénominations sémantiques correspondant aux différents changements de coordonnées possibles pour chaque objet de l'environnement. Le tableau 7.4 résume les paramètres de fonctionnement de l'opérateur.

**Tableau 7.4.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur de sémantisation du framework PeTRA

| **OPERATEUR : SEMANTISATEUR** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectif** | **Précédent** | **Suivant** | **Entrée** | **Sortie** |
| Traduire les états de la simulation et les changements de positionnement des outils de l'environnement d'apprentissage | Fusionneur ou annotateur | Annotateur ou répartiteur de phase ou codeur/décodeur | · Table de mapping < *changement de coordonnées; dénomination sémantique*><br>· Traces issues de l'un des précédents | · Séquences sémantisées |

Les dénominations sémantiques utilisées sont tirées du système de référence en anatomie illustré dans la figure 7.3.

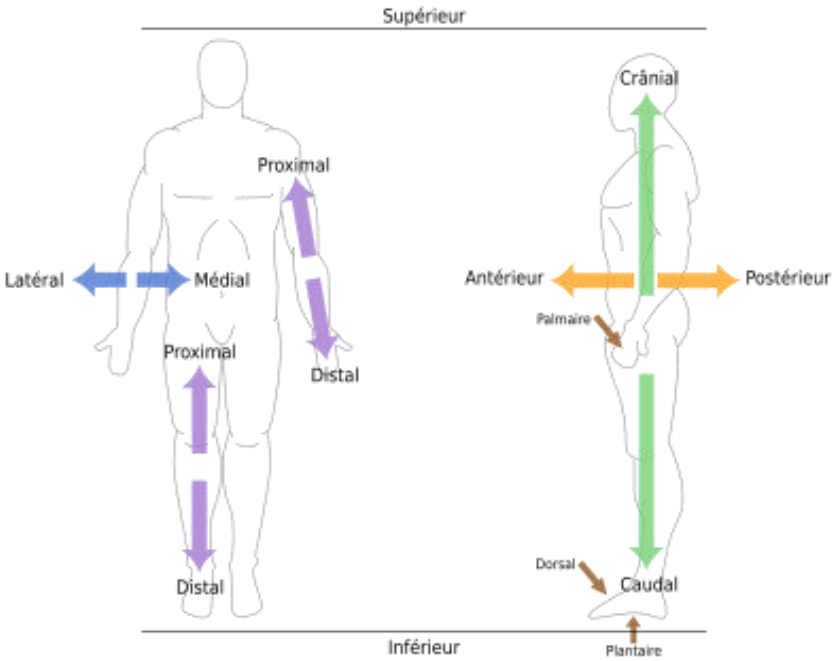



Figure 7.3. Qualificatifs d'orientation et de mouvement dans le système de référence en anatomie

Il utilise les coordonnées de la séquence courante rapportant les nouvelles positions des outils et les coordonnées de la séquence précédente par rapport auxquels le changement effectué sera caractérisé. Les séquences produites à cette étape traduisent non seulement les conséquences de la manipulation des outils sur leur positionnement, mais aussi la manière dont cette manipulation a été effectuée. Cette information peut être discrète (*ex. :* « *Le trocart a une inclinaison caudale* »), ou continue (*ex. :* « *Le trocart est incliné rapidement dans l'axe cranio->caudal* »).

Le tableau 7.5 présente un exemple de séquences de traces avec des coordonnées brutes et le résultat de la sémantisation. Par souci de simplification, seules les coordonnées du trocart ont été sélectionnées pour cet exemple.

On peut remarquer que le dernier état connu de tous les outils est rapporté d'une séquence à l'autre. En effet, dans l'exemple du tableau, le dernier état connu du fluoroscope ainsi que le dernier état connu du trocart sont mentionnés dans la séquence sémantique S2-S1 même si la séquence ne rapporte aucune manipulation de ce dernier entre S1 et S2.

De plus, si cela est jugé nécessaire dans les traitements visés, l'opérateur permet aussi de caractériser les perceptions visuelles sur la base de leur durée en visualisations brèves, normales ou prolongées. Dans ce travail, le seuil pour une visualisation brève est de moins de 200 millisecondes ; pour une visualisation normale, entre 200 millisecondes et 2 secondes et pour une visualisation longue, au-delà de 2 secondes. Ces seuils sont dépendants du domaine. Ils ont été déterminés à partir de l'observation de la conduite d'une opération par un chirurgien expert en situation réelle et l'interview de cet expert, après l'opération, sur son comportement lié aux perceptions visuelles.

**Tableau 7.5.** Sémantisation des coordonnées des outils

| Traces fusionnées | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Timecode | Actions simulateur | Coordonnées manche et pointe du trocart | | (Perceptions, durée en ms) |
| S1 | 1370432727 | Controle_Face | (150.126, -115.484, 114.948)<br>(153.729, 6.744, 153.264) | | manipReglage, 1109<br>(outil_vue3D vue3D, 2757) |
| S2 | 1370432729 | Placer_Trocart | (150.126, -115.484, 114.948)<br>(153.729, 6.744, 153.264) | | (outil_vueRadio vueRadioFace, 359)<br>vueRadioFace, 3717 |
| S3 | 1370432734 | Controle_Face | (141.384, -114.981, 120.160)<br>(153.729, 6.744, 153.264) | | (O_outil_vue3D O_vue3D, 280)<br>O_manipReglage, 14284 |
| S4 | 1370432740 | Impacter_Trocart | (141.454, 114.009, 120.119)<br>(153.801, 7.740, 153.208) | | O_manipReglage, 1199<br>O_vueRadioFace, 809 |
| Séquences sémantiques | | | | | |
| | Timecode | Actions simulateur | Actions trocart | Etats des outils | (Perceptions, durée en ms) |
| S2-S1 | 1370432729 | Placer_Trocart | Aucune | AmpliProfil_inclinaison_craniale*<br>Trocart_inclinaison_droite*<br>Trocart_nonInsere | (O_outil_vueRadio<br>O_vueRadioFace)<br>O_vueRadioFace |
| S3-S2 | 1370432734 | Controle_Face | Trocart_translation_droite<br>Trocart_translation_anterieure | AmpliProfil_inclinaison_craniale<br>Trocart_nonInsere | (O_outil_vue3D O_vue3D)<br>O_manipReglage_1** |
| S4-S3 | 1370432740 | Impacter_Trocart | Trocart_translation_droite<br>Trocart_translation_anterieure<br>Trocart_translation_caudale | AmpliProfil_inclinaison_craniale<br>Trocart_nonInsere | O_manipReglage<br>O_vueRadioFace |
| * Dernier état connu du fluoroscope et du trocart. **Suffixe traduisant une fixation prolongée relativement au domaine | | | | | |

### Représentation des séquences « sémantisées »

La représentation conceptuelle des séquences générées par l'opérateur de sémantisation est la suivante :

$$S_s: <(A|G); (\alpha_{i=1..m} ; \beta_{j=1..m}); (P_{k,\, k=1..v} [\beta_{kl,\, l=1..w}])>$$

Dans cette séquence, α et β font référence respectivement à la traduction sémantique des changements de coordonnées des outils et l'état correspondant suite à l'exécution de l'action A et/ou du geste G. β représente les catégorisations sémantiques des paramètres relatifs aux perceptions.

Pour notre cas d'étude, les séquences perceptive-gestuelles sémantiques sont représentées comme suit:

$$S_s: < (A \mid \mathcal{T} \mid \mathcal{F}); (AOI_{k,\, k=1..v} [\delta_k] \mid POI_{kl,\, l=0..n} [\delta_k]) ; (\tau, f) >$$

$\mathcal{F}$ désigne la traduction sémantique des changements de coordonnées du fluoroscope et $\mathcal{T}$, celle du trocart. Les symboles $f$ et $\tau$ font référence aux états de ces outils suite à leur manipulation et $\delta_k$, à la catégorisation sémantique des durées des fixations. Les symboles $f$ et $\tau$ sont reportés d'une séquence à l'autre même s'ils n'ont pas été modifiés, de manière à imprimer dans chaque séquence perceptivo-gestuelle l'état courant de la simulation.

## 7.3.3. L'opérateur d'annotation

### Objectif

L'opérateur d'annotation ou « annotateur » permet d'intégrer automatiquement des évaluations expertes dans les séquences perceptivo-gestuelles. Le principal intérêt de cet opérateur est de

permettre de capitaliser sur des services tutoriels centrés expert dans l'optique de produire des services tutoriels centrés données plus adaptés aux domaines mal-définis et aux connaissances perceptivo-gestuelles. En effet, les services tutoriels centrés experts sont limités pour ce type de domaine et de connaissances mais peuvent être utiles au guidage d'outils algorithmiques appliquées sur les données. Dans notre cas, il s'agit d'exploiter spécifiquement les évaluations expertes pour pouvoir guider le travail des outils algorithmiques. En effet, les évaluations expertes peuvent être vues comme des labels sur les séquences perceptivo-gestuelles permettant d'appliquer des techniques d'apprentissage automatiques semi-supervisées sur les données. Ces dernières constituent une option plus intéressante comparée à un apprentissage non supervisé à partir des données [Amershi & Conati, 2007].

En outre, dans notre cas d'étude, seules les actions ponctuelles sont évaluées par le module de diagnostic des connaissances. En effet, dans la version actuelle du STI, les aspects perceptuels et gestuels des connaissances ne sont pas pris en compte par ce module. Nous faisons l'hypothèse que l'opération d'annotation permettra de découvrir un lien implicite entre les évaluations effectuées par le module de diagnostic des connaissances et les interactions perceptivo-gestuelles de l'apprenant. En d'autres mots, ces évaluations effectuées à l'origine sur des actions ponctuelles, permettront de déduire l'influence des modalités perceptuelles et gestuelles sur les performances de l'apprenant et permettront donc *in fine* d'analyser dans leur globalité les connaissances perceptivo-gestuelles mises en jeu.

### Fonctionnement

Dans le cas de TELEOS, les évaluations sont réalisées par un réseau bayésien centré expert à partir des variables de situation calculées tout au long d'une session de simulation (voir section *« 4.2.3. Diagnostic des connaissances »*). Chaque variable de situation évalue une action ou un groupe d'actions ; plusieurs variables de situation peuvent évaluer une même action ou un même groupe d'actions.

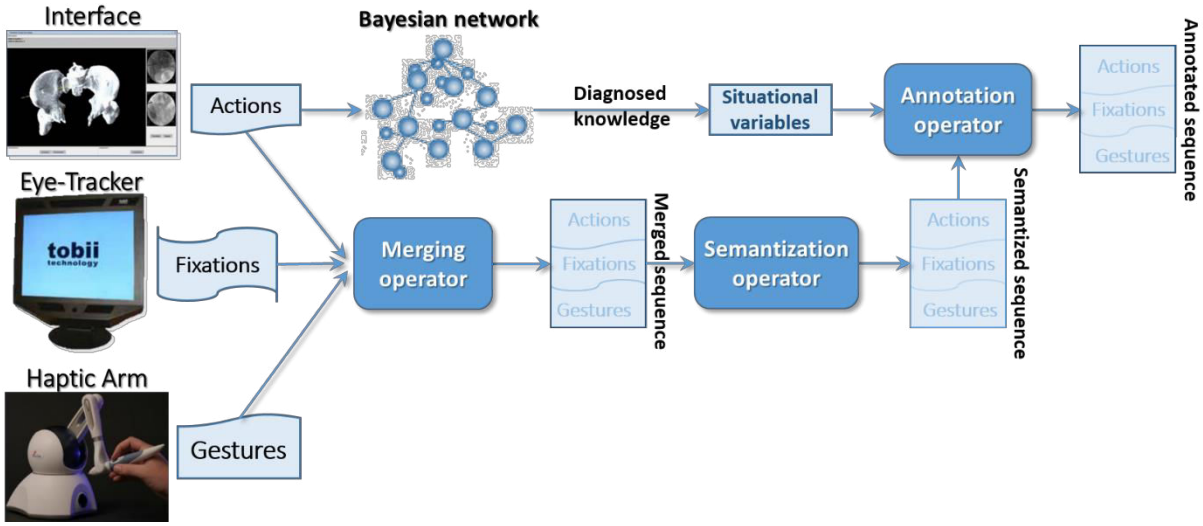



Figure 7.4. Schéma du processus d'annotation des séquences issues de TELEOS

Tel que schématisé dans la figure 7.4, l'annotateur reçoit en entrée les séquences sémantisées et les variables de situation calculées au cours d'une session de simulation. L'annotateur identifie ensuite les séquences pour lesquelles elles ont été calculées et les intègre dans ces séquences sous forme d'itemsets. En effet, une variable de situation est une « réaction » du système en réponse à

l'activité de l'apprenant (voir section *« 6.6.2. Prendre en compte les interactions du système »*). Le fonctionnement de l'opérateur est résumé dans la fiche du tableau 7.6.

**Tableau 7.6.** Fiche de fonctionnement de l'opérateur d'annotation dans le framework PeTRA

| OPERATEUR : ANNOTATEUR | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectif** | **Précédent** | **Suivant** | **Entrée** | **Sortie** |
| Enrichir les séquences avec des évaluations basées sur des règles expertes | Fusionneur ou sémantisateur | Répartiteur de phase | · Evaluations<br>· Traces issues de l'un des précédents | · Séquences perceptivo-gestuelles enrichies |

### Représentation des séquences annotées

Les séquences obtenues après cette opération sont des séquences perceptivo-gestuelles enrichies tel que détaillées dans la section *« 6.6.3. Formalisation des séquences perceptivo-gestuelles »*. Dans notre cas d'études, les séquences sont représentées comme suit:

$$S_a: < (\dagger_{i,}, S_{si}\,[\tau, f])_{\,i=1..\eta}\ ;\ (V_{q=1..v}[\upsilon_{r=1..4}])>$$

Le symbole $\dagger_i$ représente l'estampille temporelle de la séquence ; $S_{si}$, des séquences perceptivo-gestuelles ; les symboles « $\tau$ » et « $f$ » représentent respectivement les états du trocart et du fluoroscope dans chaque séquences $S_{si}$.

Avec $S_{si}$: $< (A \mid \mathcal{T} \mid \mathcal{F});\ (AOI_{k,\,k=1..v}\,[\delta_k] \mid POI_{kl,\,l=0..n}\,[\delta_k]) >$ *(voir la section précédente 7.3.2)*

Le symbole $V$ représente les variables de situation et $\upsilon$, leurs valeurs. Le symbole $\eta$ représente le nombre de séquences identifiées par l'opérateur d'annotation comme évaluées par les variables de situation $V$. Dans TELEOS, les variables de situations peuvent prendre quatre valeurs possibles : *« correct »*, *« incorrect »*, *« incorrect bon sens »* et *« incorrect mauvais sens »* (*Cf.* section *« 4.2.3. Diagnostic des connaissances »*).

## 7.3.4. L'opérateur de répartition de phases

### Objectif

Pour des exercices dont la résolution implique différentes phases, le répartiteur de phase permet d'identifier automatiquement la phase à laquelle appartient chaque séquence d'interactions enregistrée. L'objectif est de fournir un contexte à des interactions. En effet, si l'ensemble des interactions est considéré comme un tout homogène, certaines interactions observables uniquement dans des phases spécifiques de la résolution d'un problème seront invisibles pour des algorithmes de fouille de données. Or, si l'importance des interactions se rapporte à un contexte particulier, en l'occurrence une phase du problème, elle ne devrait pas être ignorées.

Dans notre cas d'étude, une simulation de vertébroplastie se réalise en trois phases :

1) *la phase de réglages du fluoroscope*
2) *la phase de repérage cutané*
3) *et la phase d'insertion du trocart*

La phase d'insertion du trocart est généralement la plus longue et produit de nombreuses séquences, contrairement aux phases précédentes relativement brèves. Cependant, les actions et gestes exécutés au cours de ces phases impactent directement la réalisation optimale de l'insertion du trocart. Elles sont de ce fait pertinentes à évaluer d'un point de vue didactique. Or,

considérant leur faible volume, les séquences enregistrées au cours de ces phases seront ignorées des algorithmes d'extraction de motifs d'actions fréquentes. Ces algorithmes sont conçus pour extraire les motifs d'actions les plus fréquents dans un ensemble de séquences donné et de ce fait ne se préoccuperont que des actions relatives à la phase d'insertion qui sont les plus fréquentes et donc, statistiquement, les plus importantes de l'ensemble.

Pour réduire ce biais, il faut considérer la conception d'algorithmes capables de prendre en compte le traitement des séquences sous l'angle d'une phase de résolution (nous détaillons une proposition de solution algorithmique en ce sens dans le chapitre suivant). Le rôle de l'opérateur de répartition de phase est de représenter chaque séquence de manière à ce qu'elles puissent être identifiées dans le contexte d'une phase par les algorithmes de fouille de données. Nous décrirons en détails la notion de phase dans la section *« 8.4. Caractérisation des phases de résolution »* du manuscrit.

### Fonctionnement

Tel que résumé dans le tableau 7.7, pour identifier la phase de résolution à laquelle appartient une interaction, l'opérateur exploite soit une liste prédéfinie d'actions de chaque phase, soit une liste des paramètres caractérisant chaque phase. En d'autres mots, il peut s'agir d'une liste à deux entrées énumérant les différentes phases d'un problème et les actions observables exclusivement dans ces phases.

Tableau 7.7. Fiche de fonctionnement de l'opérateur de répartition de phase du framework PeTRA

| OPERATEUR : REPARTITEUR DE PHASE | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectif** | **Précédent** | **Suivant** | **Entrée** | **Sortie** |
| Identifier les phases de résolution respectives des séquences d'interaction | Fusionneur ou annotateur | Codeur/Décodeur | · Liste de descripteurs des phases ou liste des actions pour chaque phase<br>· Traces issues de l'un des précédents | · Séquences perceptivo-gestuelles enrichies identifiée |

Dans le cas où des actions peuvent être observées dans différentes phases ou qu'il est impossible d'établir de manière exhaustive la liste des actions pouvant être exécutées dans une phase, il faut considérer la distinction des phases sous l'angle d'une classe avec des caractéristiques distinctives. Pour illustrer par un exemple simple de notre cas d'étude, on peut considérer que *« une action fait partie de la phase de réglages du fluoroscope SI son exécution impacte l'état du fluoroscope ET non l'état du trocart. SINON, il s'agit d'une action de la phase d'insertion du trocart »*.

L'opérateur passe en revue chaque séquence et analyse en ce sens sa correspondance avec une phase ou une autre. Il y imprime ensuite un tag qui permettra aux algorithmes d'extraction de connaissances de les traiter en comparaison avec des séquences appartenant à la même phase et non en concurrence avec toutes les séquences enregistrées.

### Représentation des séquences

La représentation d'une séquence perceptivo-gestuelle annotée après cette étape de traitement est la suivante.

$$S_c : < (\dagger_{i,}, S_{si}\,[\tau, f])_{\,i=1..\eta}\ ;\ (V_{q=1..v}[\upsilon_{r=1..4}]),\ \rho >$$

Avec ρ, le tag d'identification de la phase de la séquence. Les autres paramètres de la séquence sont détaillés dans les sections 7.3.2 et 7.3.3 du chapitre.

### 7.3.5. L'opérateur de codage/décodage

#### Objectif

L'encodeur de l'opérateur de codage/décodage permet de faire le lien entre le framework PeTRA et d'autres frameworks de traitements de données. L'objectif est d'exploiter des outils algorithmiques existants externes au framework PeTRA. Son rôle est de fournir aux séquences perceptivo-gestuelles le format lisibles et traitables par les outils externes ciblés.

L'encodage a aussi pour avantage d'optimiser le temps de calcul des algorithmes en leur fournissant des items encodés sous forme numérique à la place des chaînes de caractères.

Le décodeur de l'opérateur effectue l'opération inverse sur les ensembles de données une fois les traitements terminés.

#### Fonctionnement

L'encodeur prend en entrée les données issues de l'opérateur de fusion, de sémantisation ou de répartition de phases et un fichier de description du format ciblé (*Cf.* tableau 7.8). Le fichier de description contient les indications sur les séparateurs d'items, d'itemsets ainsi que les séparateurs de séquences tels qu'ils sont reconnus par les outils du framework externe qu'on cherche à exploiter. Il prend aussi en entrée un tableau de mappage faisant correspondre chaque action répertoriée à un code numérique unique.

Il parcourt l'ensemble des séquences perceptivo-gestuelles et les encode sur la base du fichier de description et du tableau de mappage.

Les résultats des traitements des séquences sont ensuite traduits par le décodeur dans le format d'origine de PeTRA. Là aussi, le format d'enregistrement des résultats doit être connu et décrit dans un fichier qui permettra à l'opérateur d'en effectuer la traduction.

Tableau 7.8. Fiche de fonctionnement de l'opérateur de codage/décodage dans le framework PeTRA

| **OPERATEUR : ENCODEUR/DECODEUR** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectif** | **Précédent** | **Suivant** | **Entrée** | **Sortie** |
| Encoder les séquences pour le traitement par des opérateurs externes.<br>Décoder les résultats des traitements (ex : patterns et règles). | Répartiteur de phase ou fusionneur | Base de séquences perceptivo-gestuelles | · Table de mapping *<interaction ; code>*<br>· Instructions de formatage<br>· Traces issues de l'un des précédents | · Codeur : séquences encodée<br>· Décodeur : patterns ou règles décodées |

## 7.4. ANALYSE DES SEQUENCES PERCEPTIVO-GESTUELLES

La phase d'analyse des séquences perceptivo-gestuelle fournit des opérateurs permettant d'effectuer des analyses de données d'apprentissage *(« learning analytics »)* en prenant en compte leur nature multimodale. Dans la version courante du framework, ce module contient 2 opérateurs : l'opérateur d'analyse de parcours de résolution et l'opérateur d'analyses statistiques.

### 7.4.1. L'opérateur d'analyse du parcours de résolution

#### Objectif

La validation de la résolution d'un problème composé de plusieurs phases implique la validation de chacune de ces phases. Dans certains environnements d'apprentissage, la validation correcte d'une phase est évaluée au cours de la résolution du problème. Le STI bloque l'apprenant dans une phase tant que celle-ci n'est pas correctement validée. D'autres systèmes permettent à l'apprenant de continuer à avancer à travers les phases même dans les cas de figure où certaines phases ne sont pas correctement validées. L'évaluation est effectuée *a posteriori* et pointe les erreurs de validation commises. Certains systèmes permettent en plus à l'apprenant de circuler librement entre les phases de résolution et n'imposent aucun ordre précis de validation des phases. Notre cas d'étude utilise une approche similaire.

En effet, dans TELEOS, quoiqu'il existe un ordre de déroulement des phases de résolution d'une vertébroplastie, le simulateur ne contraint pas l'évolution de la simulation dans un sens : l'interne peut circuler librement entre les phases au cours d'une session. L'analyseur du parcours de résolution a pour rôle d'analyser ce comportement.

#### Fonctionnement

Pour analyser le parcours de résolution d'un problème de l'apprenant, l'opérateur enregistre les validations de phases, les retours sur phase observés au cours de la simulation ainsi que les actions, gestes et perceptions effectués à chaque point du parcours. Il peut inférer le passage d'une phase à une autre en utilisant les séquences identifiées par le répartiteur de phase (*Cf.* Tableau 7.9).

Chaque retour à une phase précédente est interprété comme une erreur de validation constatée par l'apprenant lui-même et qu'il vise à corriger avant de poursuivre la résolution du problème. Plus ces erreurs de validation sont fréquentes plus l'apprenant trahit *a priori* une faible maîtrise des connaissances mises en jeu. Les actions, gestes et perceptions enregistrés au cours d'un retour sur phase sont interprétées comme des interactions de corrections. Pour une analyse fine de ces interactions, l'opérateur distingue les interactions en précisant les outils manipulés et les perceptions effectuées (perceptions de contrôle). Voir section *« 6.4 Différenciation des perceptions »*). Ainsi, l'opérateur génère le parcours de l'apprenant dont chaque point est représenté par un retour sur phase (équivalent à une erreur de validation) ; le nombre d'actions correctives effectuées ; le détail de chaque geste ou action corrective précisant l'outil manipulé et les types de perceptions accompagnant ces interactions.

Tableau 7.9. Fiche de fonctionnement de l'opérateur d'analyse de parcours de résolution du framework PeTRA

| OPERATEUR : ANALYSEUR DE PARCOURS DE RESOLUTION | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectif** | **Précédent** | **Suivant** | **Entrée** | **Sortie** |
| Identifier le parcours de résolution emprunté par l'apprenant en analysant les validations de phase, les retours sur phase et certaines interactions se produisant au cours d'un retour sur phase | Base de séquences perceptivo-gestuelles | Analyseur statistique | Détail des interactions (validations de phase, retours sur phase, interactions correctives) issu de l'analyseur statistique | Détails du parcours de résolution |

### 7.4.2. L'opérateur d'analyses statistiques

#### Objectif

L'opérateur d'analyses statistiques a pour rôle de faciliter des calculs statistiques sur les données d'apprentissage en offrant un ensemble de calculateurs préprogrammés. Dans le cadre de ce travail, il permet de décrypter les interactions de l'apprenant. En effet, il permet de calculer par exemple le ratio d'erreurs de validation sur l'ensemble des interactions effectuées au cours d'une simulation ou encore, la moyenne des interactions impliquant l'utilisation d'un outil spécifique de l'environnement de simulation.

Cet opérateur n'a pas vocation à offrir un ensemble exhaustif de fonctions statistiques. Il existe des plateformes spécialisées dans ce type de calculs et qui offrent un large panel de fonctions statistiques. C'est le cas par exemple de la plateforme UnderTracks, entre autres.

#### Fonctionnement

Le fonctionnement de l'analyseur statistique est résumé dans la fiche du tableau 7.10. L'opérateur utilise les données d'interactions détaillées par l'analyseur de parcours de résolution. Il reçoit en paramètre le sous-ensemble de données qu'on veut analyser (par exemple : « visualisations de contrôle » et « visualisations d'exploration ») et le type d'opération que l'on veut effectuer (par exemple : corrélation).

Tableau 7.10. Fiche de fonctionnement de l'opérateur d'analyses statistiques du framework PeTRA

| OPERATEUR : ANALYSEUR STATISTIQUE | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectif** | **Précédent** | **Suivant** | **Entrée** | **Sortie** |
| Offrir des outils de calculs statistiques à des fins d'analyse de l'apprentissage | Base de séquences perceptivo-gestuelles ou analyseur de parcours de résolution | Analyseur de parcours de résolution | · Choix d'un traitement statistique<br>· Ensemble de séquences perceptivo-gestuelles | · Résultats selon les calculs statistiques choisis<br>· Par défaut : dépouillement enregistré dans un tableur, des interactions pour chaque séquence perceptivo-gestuelle enrichie de l'ensemble fourni en entrée |

## 7.5. EXTRACTION DE CONNAISSANCES PERCEPTIVO-GESTUELLES

### 7.5.1. Les opérateurs d'extraction de patterns de connaissances

#### Objectif

Les opérateurs d'extraction de connaissances désignent l'opérateur d'extraction de patterns fréquents et l'opérateur d'extraction de règles d'association de notre framework. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux patterns séquentiels et aux règles séquentielles dans la mesure où l'ordre temporel des éléments composant ces patterns de connaissances est important, tant pour la modélisation de l'activité de l'apprenant que pour la modélisation des connaissances du domaine.

L'approche choisie est la mutualisation de différents algorithmes de fouille de données existant pour le traitement des séquences perceptivo-gestuelles générées tels que :

- *pour l'extraction d'itemsets fréquents (ex. : Apriori [Agrawal & Sikrant, 1994])*
- *pour l'extraction de patterns séquentiels (ex. : PrefixSpan [Pei et al, 2004])*
- *pour l'extraction de règles d'association (ex : OPUS [Webb, 1995])*
- *pour l'extraction de règles séquentielles (ex : Non-Redundant Sequential Rules Algorithm [Lo et al. 2009]).*

Ce sont des algorithmes de fouilles de données classiques de la littérature implémentés et proposés sous forme de librairies (JDMP : Java Data Mining Package[2], SPMF : Sequential Pattern Mining Framework[3]) ou de plateformes logicielles (Weka[4], RapidMiner[5], Orange[6]) facilitant leur exploitation. L'objectif des opérateurs d'extraction de connaissances de PeTRA est de rendre possible l'exploitation des algorithmes de différents frameworks et librairies existants sur des séquences perceptivo-gestuelles générées avec PeTRA. SPMF se distingue en offrant, parmi plus de 90 implémentations d'algorithmes de fouille de données classiques, des algorithmes originaux tels que CMRules [FournierVigier *et al.* 2012] et *FournierVigier et al. algorithm* [FournierVigier *et al.* 2008] ayant été testés sur des données éducationnelles enregistrées à partir d'un STI, CanadArmTutor. Une jonction entre PeTRA et les algorithmes de SPMF a été effectuée dans cette première version des opérateurs d'extraction de connaissances.

Dans le cadre de notre travail, nous proposons aussi un algorithme, phARules, pour l'extraction de règles séquentielles en général et de règles perceptivo-gestuelles en particulier. La nouveauté de PhARules se situe au niveau de sa capacité à considérer l'importance des items composant une règle relativement à une phase de résolution. Nous le décrirons en détails dans le chapitre suivant.

### Fonctionnement

Pour pouvoir exploiter les algorithmes existants, le principe est de lier notre opérateur au framework externe ou en intégrant la librairie choisie dans le framework PeTRA. Dans la mesure où chaque plateforme impose un format spécifique aux données à traiter par ses algorithmes, les données traitées par les extracteurs de notre framework doivent passer par l'opérateur de codage/décodage qui lui fournit la structure lisible par l'algorithme sélectionné (*Cf.* Tableau 7.11).

Tableau 7.11. Fiche de fonctionnement de l'opérateur d'extraction de patterns du framework PeTRA

| **OPERATEUR : EXTRACTEUR DE PATTERNS DE CONNAISSANCES** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectif** | **Précédent** | **Suivant** | **Entrée** | **Sortie** |
| Mutualiser différents algorithmes de fouille de patterns fréquents à partir des séquences perceptivo-gestuelles | Base de séquences perceptivo-gestuelles | Filtreur de patterns | · Choix d'un algorithme d'extraction<br>· Ensemble de séquences perceptivo-gestuelles | · Patterns de connaissances extraits |
| Mutualiser différents algorithmes de fouille de règles d'association à partir des séquences perceptivo-gestuelles | Base de séquences perceptivo-gestuelles | Filtreurs de règles | · Choix d'un algorithme d'extraction<br>· Ensemble de séquences perceptivo-gestuelles | · Règles extraites |

[2] https://jdmp.org/
[3] http://www.philippe-fournier-viger.com/spmf/
[4] http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/
[5] http://rapidminer.com/
[6] http://www.ailab.si/orange

A la fin de l'exécution de l'extraction des patterns fréquents, le décodeur effectue la démarche inverse en traduisant les patterns extraits dans leur format d'origine. La figure 7.5 illustre le processus avec des traces enregistrées sur TELEOS et des patterns obtenus avec un algorithme du framework SPMF. Il s'agit de l'algorithme d'extraction de patterns séquentiels proposé par Fournier-Vigier *et al.* (2008). La première séquence de l'image (en partant du bas) est une séquence perceptivo-gestuelle enrichie. Les symboles « ; » sépare les itemsets et les parenthèses délimitent les itemsets ayant plusieurs items cooccurrents. Cette séquence a été obtenue après le traitement des traces par les opérateurs de nettoyage, de filtrage, de fusion, de sémantisation et d'annotation.

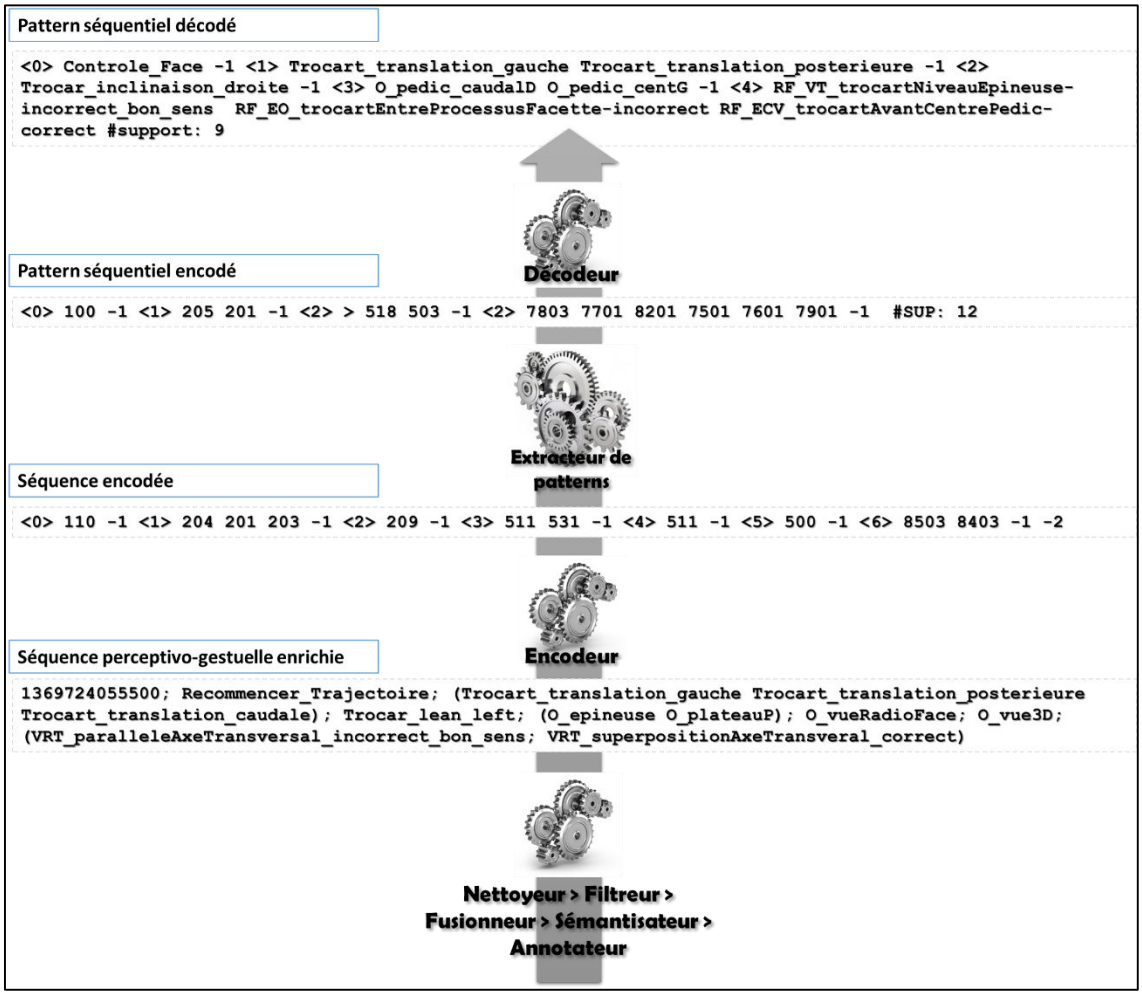



Figure 7.5. Processus de traitement avec un exemple réel de traces provenant de TELEOS

Avant l'application de l'algorithme, la séquence est traitée avec l'opérateur d'encodage. Celui-ci attribue un code numérique à chaque item et réécrit la séquence avec le format lisible pour l'algorithme visé. En l'occurrence, pour l'algorithme exploité dans cet exemple, le symbole « *<x>* » (*x* étant un chiffre) marque l'ordre temporel de chaque itemset, *<0>* marquant le début de la séquence. L'ordre temporel des itemsets se base sur leurs timestamps mais ceux-ci ne sont pas exploités dans cette représentation car à ce niveau, la séquentialité des items d'interactions suffit à l'analyse de l'activité de l'apprenant.

Le symbole *« -1 »* est le séparateur des itemsets et le symbole *« -2 »* marque la fin de la séquence.

L'algorithme est appliqué à l'ensemble des séquences ainsi encodées et produits des patterns dont les items seront décodés dans la prochaine étape.

Les séquences présentées dans la figure ont été sélectionnées à titre d'illustration et ne sont pas liées. Par exemple, la séquence encodée n'est pas la version reformatée de la séquence perceptivo-gestuelle enrichie.

Certains algorithmes d'extraction de patterns proposés dans la littérature sont performants et largement exploités. Cependant, ils ne permettent pas de prendre en compte les phases de résolution auxquelles appartiennent les séquences d'interaction. C'est une problématique liée à la structure des traces d'apprentissage relatives à des cas de résolution de problème impliquant plusieurs phases.

### 7.5.2. L'opérateur de sélection de patterns

#### Objectifs

Les patterns de connaissances fréquents peuvent inclure des items des différentes modalités des séquences perceptivo-gestuelles. Le sélecteur de patterns offre la possibilité de cibler dans l'ensemble certains patterns sur la base des modalités qui les composent. Par exemple, il est possible de cibler uniquement les patterns impliquant des gestes et des perceptions sans aucune action ponctuelle ni état de la simulation.

Dans le modèle que nous proposons pour la représentation des séquences, les évaluations sont aussi des items pouvant figurer dans les patterns extraits. Ainsi, on peut cibler des patterns spécifiques contenant des éléments d'évaluations. L'un des intérêts peut être de faire ressortir les liens existant entre les interactions fréquentes rapportées par les patterns et ces évaluations.

#### Fonctionnement

L'utilisateur spécifie les patterns qui doivent être sélectionnés en attribuant la valeur 0, 1 ou 2 pour chaque modalité avec 0 = exclusion ; 1 = inclusion ; 2 = indifférent. En d'autres mots une modalité spécifiée à

- *0 indique qu'un pattern qui la contient n'est pas sélectionnable ;*
- *1 indique qu'un pattern qui ne la contient pas n'est pas sélectionnable*
- *2 indique qu'elle n'a aucune influence sur la sélection du pattern*

Ces contraintes pourraient être intégrées dès le processus d'extraction des patterns. Cependant, nous pensons que cela limiterait les résultats dans la mesure où certains patterns fréquents seraient d'emblées ignorés. La possibilité d'extraire tous les patterns fréquents et de cibler *a posteriori* certains d'entre eux sur la base de leur contenu, nous semble offrir plus de flexibilité.

Le tableau 7.12 résume le fonctionnement de l'opérateur dans le framework.

Tableau 7.12. Fiche de fonctionnement de l'opérateur de sélection de patterns du framework PeTRA

| OPERATEUR : SELECTIONNEUR DE PATTERNS | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Objectif** | **Précédent** | **Suivant** | **Entrée** | **Sortie** |
| Sélectionner des patterns sur la base des modalités des items qui les composent | Extracteur de patterns | N/A | ·Configuration de la sélection<br>·Ensemble des patterns extraits | ·Patterns sélectionnés |
| Sélectionner des règles sur la base des modalités des items qui composent leurs antécédents et leurs conséquents (resp. les côtés IF et THEN de la règle) | Extracteur de règles | N/A | ·Configuration de la sélection<br>·Ensemble des règles extraites | ·Règles sélectionnées |

## 7.6. LIMITES DU FRAMEWORK PETRA

### 7.6.1. Limites générales du framework

La version actuelle du framework PeTRA est un prototype développé dans le but de prouver la faisabilité de la proposition théorique de représentation des séquences perceptivo-gestuelles et des séquences perceptivo-gestuelles enrichies.

Elle est largement perfectible en ce qui a trait à sa facilité d'utilisation. En particulier, les tâches de configuration requises pour certains opérateurs doivent se faire manuellement directement dans le code source. Tous les paramètres configurables sont cependant réunis dans la classe principale de chaque opérateur. L'évolution immédiate est d'éviter toute intervention du chercheur dans le code en lui fournissant la possibilité de configurer dans une console de commande ou, encore mieux, par le biais d'une interface graphique en s'appuyant sur la plateforme d'analyse Undertracks.

### 7.6.2. Limites des opérateurs

#### Limites du nettoyeur

Dans la littérature, le nettoyage des données se basent sur des analyses statistiques pour l'identification des bruits présents dans un ensemble des données [Xiong *et al.* 2006]. Par exemple, la validation croisée permet d'identifier les paramètres liés aux bruits dans les données et d'évaluer l'influence de ces paramètres sur les résultats des analyses. Le procédé permet aussi d'identifier les données aberrantes à écarter. Dans la version actuelle du framework PeTRA, l'opérateur n'exploite pas les modèles statistiques pour identifier les bruits à éliminer des traces brutes. Les erreurs qu'elles traitent doivent être connues ou anticipées par l'analyste qui doit aussi lui fournir la meilleure description possible de ces erreurs pour qu'il puisse les identifier. L'exploitation d'une approche statistique constitue une perspective d'amélioration du nettoyeur.

#### Limites du filtreur

Tout en sachant que certains paramètres sont non pertinents pour l'analyse des traces et peuvent potentiellement induire des biais dans les résultats de ces analyses, il n'est pas toujours possible de les identifier de manière précise et exhaustive. Dans, ce cas, on doit pouvoir garantir l'intégrité des analyses tout en prenant en compte cette incertitude. Des méthodes statistiques permettent de prendre en compte ce cas de figure. Il s'agit des modèles probabilistes pour l'analyse de données incertaines. L'exploitation de cette méthode pourrait étendre les catégories de données

pouvant être traitées par le filtreur à des données dont la pertinence des paramètres ne peut pas être déterminée *a priori*.

### Limites du fusionneur

Dans sa version courante, l'opérateur de fusion ne peut générer des séquences perceptivo-gestuelles que sur la base d'une seule configuration de la relation entre les interactions. Dans le cadre de ce travail, les interactions considérées sont de type « contrôle *a posteriori* ». Ce choix est un parti pris qui ne représente pas de manière exhaustive l'ensemble des liens pouvant se définir entre des actions, des perceptions et des gestes au cours d'une session de simulation. En effet, nous ne pouvons pas garantir que les différents liens possibles entre les modalités perceptivo-gestuelles ne s'alternent pas au cours d'une session. Le choix d'un lien spécifique entre les modalités vise à simplifier les analyses et traitements envisagées sur les données en assumant que chaque geste ou action exécutée est supportée par des prises d'informations perceptuelles destinées à les vérifier et/ou valider.

Une perspective d'amélioration consiste à permettre à l'opérateur d'alterner de manière dynamique les trois types de lien sur, la base de certains critères. Ces critères, en complément des critères de temps (la séquentialité des traces), permettraient d'inférer le lien entre une prise d'informations perceptuelles et les actions/gestes qui lui sont proches, là où il s'applique le mieux. Par exemple, on peut considérer que certains types de perceptions peuvent exclusivement précéder ou suivre une action/geste ou certaines catégories d'actions/gestes, etc.

### Limites du sémantisateur

La traduction sémantique de l'évolution des coordonnées des outils de l'environnement de simulation, se base sur un système de mapping faisant correspondre chaque déplacement dans un plan (x, y, z) avec la dénomination correspondante. La liste de ces correspondances doit être faite manuellement avant d'être fourni à l'opérateur. Cela limite l'application de l'opérateur de sémantisation à des environnements de simulation où il est possible de connaitre tous les déplacements possibles de tous les outils ainsi que leurs dénominations sémantiques.

### Limites du répartiteur de phase

Dans la version actuelle du framework PeTRA, le répartiteur de phase ne peut procéder à l'identification des phases des séquences que sur la base d'une description prédéfinie de ces phases ou d'un listing exhaustif des actions qu'on peut y observer. Il n'est pas toujours possible de réaliser cette tâche pour des domaines mal-définis et dans certains cas, même lorsque c'est possible, il s'agit d'une tâche ardue et fastidieuse.

L'identification automatique non-supervisée ou semi-supervisée des phases et des actions dans un ensemble de séquences d'interaction, est une perspective d'amélioration de cet opérateur (voir section 7.4.2).

### Limites du codeur/décodeur

La construction de la table de mapping utilisée par l'opérateur pour encoder les items des séquences est manuelle. En d'autres mots, un code est attribué à chaque interaction manuellement. Dans le cas de TELEOS, 273 interactions ont été encodées. Cette tâche est fastidieuse et rend ardue toute modification ou évolution de l'ensemble des codes. De plus, cette méthode limite les traitements à des environnements d'apprentissage où toutes les interactions de l'utilisateur et du système peuvent être listées de manière exhaustive. La perspective d'évolution est d'automatiser la génération des codes de manière à affranchir le chercheur du

travail de mapping. Il s'agit pour l'opérateur de parser, dans un premier temps, toutes les interactions enregistrées dans l'environnement d'apprentissage et d'attribuer à chacune un code unique. Dans l'éventualité où le STI évolue et intègre de nouvelles possibilités d'interactions (en intégrant par exemple des exercices faisant appels à de nouvelles actions ou gestes), l'opérateur peut faire évoluer la table de mapping sans la tâche ardue d'une vérification manuelle des codes existants pour garantir l'absence de doublons.

#### Limites de l'analyseur de parcours

Dans sa version actuelle, les analyses effectuées par l'opérateur visaient à fournir les données nécessaires à l'évaluation de l'hypothèse qu'il existe une influence des comportements liés aux prises d'informations visuelles sur la fréquence des erreurs de validation (voir le détail de cette étude dans le chapitre 9 du manuscrit). L'objectif consistait à fournir une preuve de concept des nouvelles possibilités d'analyse de l'apprentissage perceptivo-gestuel fournies par la proposition formulée pour la représentation des séquences multi-source hétérogènes.

La description détaillée de l'activité de l'apprenant fourni par cet opérateur peut faciliter des analyses didactiques et pédagogiques plus approfondies. Cependant, pour des analyses autres que celles utilisées pour notre étude, l'opérateur se contente de mettre à disposition le détail des traces d'activité analysées dans un tableur numérique. Il appartient au chercheur d'exploiter ces informations en s'aidant éventuellement des outils du tableur. Une perspective d'évolution serait de concevoir cet opérateur comme un outil auteur offrant d'une part des outils d'analyses de l'apprentissage et d'autre part des fonctionnalités d'interactions avec les informations fournies, offrant ainsi une plus grande flexibilité dans l'exploitation de ces dernières.

## 7.7. Bilan et Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le framework PeTRA conçu pour le traitement de traces d'activité hétérogènes multi-sources liées à des connaissances perceptivo-gestuelles. PeTRA facilite le traitement de ce type de traces par le biais d'une chaîne d'opérateurs qui permettent de générer des séquences perceptivo-gestuelles enrichies respectant la formalisation proposée dans le chapitre précédent.

En plus des opérateurs dédiés à leur représentation, PeTRA intègre des opérateurs avancés permettant d'exploiter les séquences perceptivo-gestuelles générées à des fins d'analyse de l'apprentissage *(learning analytics)* et d'extractions de patterns de connaissances *(educational data mining)*. Les patterns de connaissances (motifs fréquents et règles d'association) extraits par des algorithmes de fouille de données sont destinés à la modélisation de l'apprenant et à l'enrichissement de la base de connaissances du STI. Nous discuterons dans le chapitre suivant de la méthodologie envisagée pour atteindre ces deux objectifs.

PeTRA offre la possibilité d'exploiter des implémentations existantes d'algorithmes de fouille de données en permettant de créer une liaison avec des frameworks externes qui les proposent. Cette liaison est mise en œuvre par l'intégration des librairies d'algorithmes implémentés dans les opérateurs d'extraction de PeTRA et l'encodage des séquences perceptivo-gestuelles dans le format requis par ces frameworks. Les opérateurs d'extraction de patterns de PeTRA fonctionnent ainsi comme des interfaces de mutualisation de l'utilisation de ces algorithmes. Ceux-ci sont exploités tels qu'ils sont sans aucune contrainte sur la composition perceptivo-gestuelle des patterns à extraire. Cela constitue un choix de flexibilité de l'utilisation de notre framework qui

offre la possibilité de décider dans une étape de post-traitement, des motifs fréquents à cibler sur la base de leur composition, en d'autres mots, sur la base des modalités des items qui les composent.

Le tableau 7.12 présente un récapitulatif des opérateurs de PeTRA avec, pour chacun, un résumé de son objectif, les opérateurs qui peuvent le précéder et ceux qui peuvent le suivre, les données reçues en entrée, et les résultats produits en sortie.

Nous avons aussi relevé l'importance de prendre en compte les phases de résolution des interactions enregistrées dans un environnement d'apprentissage dans le processus d'extraction de patterns. Nous proposons dans cette optique un algorithme, PhARules, capable de considérer les séquences analysées relativement à la phase de résolution dans laquelle elles interviennent. Nous décrivons cette proposition dans le chapitre suivant.

**Tableau 7.13.** Présentation récapitulative des fiches de fonctionnement des opérateurs du framework PeTRA

| Opérateur | Objectif | Précédent | Suivant | Entrée | Sortie |
|---|---|---|---|---|---|
| **Nettoyeur** | Eliminer les bruits des données liés à des erreurs de formatage | Base de traces brutes | Filtreur ou fusionneur | ·Liste d'erreurs<br>·Instruction de correction<br>·Traces brutes | ·Traces nettoyées |
| **Filtreur** | Eliminer les bruits des données liés aux paramètres de séquences non pertinents pour la suite des traitements | Nettoyeur ou Base de traces brutes | Fusionneur | ·Liste des paramètres à filtrer<br>·Traces brutes ou traces nettoyées | ·Traces reconstitués sans les paramètres filtrées |
| **Fusionneur** | Produire des séquences perceptivo-gestuelles à partir d'un ensemble de traces multi-sources hétérogènes (jonction des actions, gestes et perceptions) | Nettoyeur ou filtreur ou Base de traces brute | Sémantisateur ou annotateur ou répartiteur de phase ou codeur/décodeur | ·Instruction de fusion<br>·Traces multi-sources brutes, nettoyées ou filtrées | ·Séquences perceptivo-gestuelles |
| **Sémantisateur** | Traduire les états de la simulation et les changements de positionnement des outils de l'environnement d'apprentissage | Fusionneur ou annotateur | Annotateur ou répartiteur de phase ou codeur décodeur | ·Table de mapping *< changement de coordonnées; dénomination sémantique>*<br>·Traces issues de l'un des précédents | ·Séquences sémantiques |
| **Annotateur** | Enrichir les séquences avec des évaluations expertes (variables de situation) | Fusionneur ou sémantisateur | Répartiteur de phase | ·Evaluations expertes<br>·Traces issues de l'un des précédents | ·Séquences perceptivo-gestuelles enrichies |
| **Répartiteur de phase** | Identifier les phases de résolution respectives des séquences d'interaction | Fusionneur ou annotateur | Codeur/Décodeur | ·Liste de descripteurs des phases ou liste des actions pour chaque phase<br>·Traces issues de l'un des précédents | ·Séquences perceptivo-gestuelles enrichies identifiée |
| **Codeur/ Décodeur** | Encoder les séquences pour le traitement par des opérateurs externes<br>Décoder les résultats des traitements (ex : patterns et règles) | Répartiteur de phase ou fusionneur | Base de séquences perceptivo-gestuelles | ·Table de mapping *<interaction ; code>*<br>·Instructions de formatage<br>·Traces issues de l'un des précédents | ·Codeur : séquences encodée<br>·Décodeur : patterns ou règles décodées |
| **Analyseur de parcours** | Définir le parcours de résolution emprunté par l'apprenant en analysant les validations de phase, les retours sur phase et certaines interactions se produisant au cours d'un retour sur phase | Base de séquences perceptivo-gestuelles | Analyseur statistique | ·Détail des interactions (validations de phase, retours sur phase, interactions correctives) issu de l'analyseur statistique | ·Détails de parcours de résolution |
| **Analyseur statistique** | Offrir un ensemble de calculs statistiques courants à des fins d'analyse de l'apprentissage | Base de séquences perceptivo-gestuelles ou analyseur de parcours de résolution | Analyseur de parcours de résolution | ·Choix d'un traitement statistique<br>·Ensemble de séquences perceptivo-gestuelles | ·Résultats selon les calculs statistiques choisis<br>·Par défaut : dépouillement enregistré dans un tableur, des interactions pour chaque séquence perceptivo-gestuelle enrichie de l'ensemble fourni en entrée |
| **Extracteur de patterns** | Mutualiser différents algorithmes de fouille de patterns fréquents à partir des séquences perceptivo-gestuelles | Base de séquences perceptivo-gestuelles | Filtreur de patterns | ·Choix d'un algorithme d'extraction<br>·Ensemble de séquences perceptivo-gestuelles | ·Patterns de connaissances extraits |
| **Extracteur de règles** | Mutualiser différents algorithmes de fouille de règles d'association à partir des séquences perceptivo-gestuelles | Base de séquences perceptivo-gestuelles | Filtreurs de règles | ·Choix d'un algorithme d'extraction<br>·Ensemble de séquences perceptivo-gestuelles | ·Règles d'association extraites |
| **Filtreur de patterns** | Sélectionner des patterns sur la base des modalités des items qui les composent | Extracteur de patterns | N/A | ·Configuration de la sélection<br>·Ensemble des patterns extraits | ·Patterns sélectionnés |
| **Filtreur de règles** | Sélectionner des règles sur la base des modalités des items qui composent leurs antécédents et leurs conséquents (resp. les côtés IF et THEN de la règle) | Extracteur de règles | N/A | ·Configuration de la sélection<br>·Ensemble des règles extraites | ·Règles sélectionnées |

## SYNTHESE

- Proposition d'un cadre de traitement des traces d'activité hétérogènes multi-sources
- Développement d'un ensemble d'opérateurs variés pour la préparation, la transformation, l'analyse, la fouille et le post-traitement de traces d'activité multimodales
- Flexibilité du framework PeTRA : les opérateurs peuvent être paramétrés selon les objectifs de traitement
- Modularité du framework PeTRA : les opérateurs peuvent être chaînés différemment selon les objectifs de traitement
- Extensibilité du framework PeTRA: des liens avec des plateformes externes disposant d'autres outils d'analyse et de fouille de données peuvent être créés à partir du framework

# CHAPITRE 8.

# PRESENTATION DE PHARULES : UN ALGORITHME DEDIE A L'EXTRACTION DE REGLES PERCEPTIVO-GESTUELLES ORIENTEES PHASE

*Dans ce chapitre, nous décrivons PhARules, notre proposition d'algorithme pour l'extraction de règles séquentielles communes à plusieurs séquences. L'originalité de l'algorithme est sa capacité à prendre en compte l'importance des séquences traitées relativement à une phase. Les phases sont des parties distinctes d'un cas de résolution de problème, en contexte d'apprentissage. L'extraction de règles orientées phase s'inscrit dans la problématique plus large de l'hétérogénéité interne des données en datamining. Après une définition préliminaire des concepts se rapportant à ce domaine, nous faisons une brève révision des travaux de l'état de l'art se préoccupant de l'hétérogénéité interne des données. Nous positionnons notre travail par rapport à ces propositions et décrivons notre contribution.*

## Sommaire

**8.1. Notions Préliminaires ..... 117**
8.1.1. Patterns fréquents ..... 117
8.1.2. Règles d'association ..... 117
8.1.3. Patterns et règles perceptivo-gestuels ..... 119
8.1.4. Applications ciblées des patterns et règles perceptivo-gestuels ..... 119
**8.2. Hétérogénéité Interne des Données ..... 120**
**8.3. Etat de l'Art des Propositions Adressant l'Hétérogénéité Interne des Données 121**
8.3.1. Hétérogénéité induite par la fréquence des items ..... 121
8.3.2. Hétérogénéité induite par la description des items ..... 123
8.3.3. Hétérogénéité induite par les liens entre les items ..... 124
8.3.4. Positionnement ..... 124
**8.4. Caractérisation des Phases de Résolution ..... 125**
**8.5. Extraction de Règles Séquentielles Orientées Phases avec PhARules ..... 127**
8.5.1. L'algorithme CMRules ..... 127
8.5.2. L'algorithme PhARules ..... 128
8.5.3. Complexité computationnelle ..... 132
8.5.4. Bilan ..... 134
**8.6. Conclusion ..... 134**
**Synthèse ..... 135**

## 8.1. NOTIONS PRELIMINAIRES

Nous définissons dans cette section quelques notions de base relatives aux patterns fréquents en fouille de données. Ensuite, nous abordons l'adaptation de ces concepts à notre problématique.

### 8.1.1. Patterns fréquents

Un **pattern fréquent** [Agrawal & Sikrant, 1994] est un ensemble d'items dont l'occurrence est observée dans un pourcentage de séquences dépassant un seuil donné. Une séquence contient un pattern lorsque, pour chaque item du pattern, il existe un itemset de la séquence qui contient cet item. Le seuil considéré est désigné sous le terme de **« support »**.

> Définition 8.1 *(support d'un pattern)*. Soit $D = (S_1, S_2, \ldots, S_n)$ une base de données de séquences*(ou base de séquences)*. Le support *minsup* d'un pattern dans *D* est le nombre de séquences S dans *D* qui contiennent ce pattern, avec $minsup \in \mathrm{N}^*$.

Une séquence contient un pattern si, pour chaque item de ce pattern, il existe un itemset de la séquence qui contient cet item.

Le support *minsup* est un seuil défini par l'utilisateur et au-delà duquel un **pattern** est considéré comme **fréquent**. Formellement un **pattern fréquent** est défini comme suit :

> Définition 8.2 *(pattern fréquent)*. Soit *D*, une base de séquences tel que $D = (S_1, S_2, \ldots, S_n)$. Un pattern fréquent $p : <a_1, a_2, \ldots, a_m>$, est un ensemble d'items $\{a_1, a_2, \ldots, a_m\}$ non ordonnés présent dans un nombre $n \in \mathrm{N}^*$ de séquences de *D* tel que $n \geq minsup$.

A titre d'illustration, un pattern extrait de la base de traces de notre cas d'étude pourrait être ainsi décrit : « Dans 30% des séquences enregistrées, on observe une visualisation du modèle 3D du patient, une prise de radio de face, une prise de radio de profil et une inclinaison du fluoroscope ». Ce pattern est considéré comme fréquent si les 30% dépassent le support minimum fixé. La séquentialité des items n'est pas prise en compte dans le processus d'extraction des patterns fréquents.

En plus de la fréquence d'un pattern, la séquentialité des items qui le composent est intéressante dans la mesure où l'ordre temporel de leurs occurrences apporte une précision supplémentaire. Lorsque cette séquentialité est prise en compte, on parle de fouille de **patterns séquentiels**. La définition formelle d'un pattern séquentiel est présentée ci-dessous.

> Définition 8.3 *(pattern séquentiel)*. Un pattern séquentiel $p_s$, est un pattern fréquent $p_s{:}<t_1a_1, t_2a_2, \ldots, t_ma_m>$ avec $\{t_1, t_2, \ldots, t_m\} \in \mathrm{N}^*$, un ensemble d'estampilles temporelles tel que $t_1 < t_2 < \ldots < t_m$.

Pour reprendre notre illustration, un pattern séquentiel de notre cas d'étude pourrait être décrit comme suit : « Dans 30% des séquences enregistrées, on observe une inclinaison du fluoroscope suivie d'une prise de radio de face et d'une prise de radio de profil, suivies d'une visualisation du modèle 3D du patient. »

### 8.1.2. Règles d'association

Les règles d'association sont, à l'instar des patterns fréquents, des « régularités » observables dans un ensemble de données à une certaine fréquence. De manière plus spécifique, les règles déterminent les relations de cooccurrence existant entre les items d'un ensemble de données. Ces

relations sont désignées sous le terme « associations ». Une règle est formellement définie comme suit :

> **Définition 8.4** *(règle d'association)*. Soit $I = \{i_1\ i_2 \ldots i_n\}$ un ensemble d'items. Une règle d'association est une expression d'implication de la forme $X \rightarrow Y$, avec X et Y des ensembles d'items non ordonnés, tel que $X \subset I$, $Y \subset I$ et $X \cap Y = \emptyset$.

L'objectif de la fouille de règles dans une base de séquences est d'extraire toutes les associations entre items dont la répétition dépasse un support et une confiance fournis par l'utilisateur.

Le support d'une règle d'association détermine le pourcentage de séquences dans lesquelles elle est présente. Il peut être interprété, pour une règle $X \rightarrow Y$, comme l'estimation de la probabilité $P(X \cup Y)$ d'observer une relation d'association entre les items de $X$ et les items de $Y$ dans l'ensemble des séquences. Formellement :

> **Définition 8.5** *(support d'une règle d'association)*. Soit $n$ la taille de la base $D$, soit le nombre de séquences de $D$. Le support d'une règle $X \rightarrow Y$ est le pourcentage de séquences dans $D$ contenant $X \cup Y$.

Il est donné par le rapport du cardinal $|X \cup Y|$ de l'ensemble $X \cup Y$ par la taille $n$ de la base de séquences :

$$support_r = \frac{|X \cup Y|}{n}$$

La confiance d'une règle est une mesure de la prédictibilité de la relation d'association entre les items de cette règle. En d'autres mots, elle permet de déterminer la probabilité d'avoir une association entre des items (ou ensemble d'items) donnés dans une base de séquences. Elle peut être interprétée, pour une règle X → Y, comme une estimation de la probabilité conditionnelle $P(Y \mid X)$. Formellement :

> **Définition 8.6** *(confiance)*. La confiance d'une règle X → Y est le pourcentage de séquences de la base D contenant X qui contiennent aussi Y.

Elle est donnée par le rapport du cardinal $|X \cup Y|$ de l'ensemble $X \cup Y$ sur le cardinal $|X|$ de l'ensemble X :

$$confiance_r = \frac{|X \cup Y|}{|X|}$$

Lorsque la séquentialité des itemsets X et Y est respectée, ils forment une **règle séquentielle**. Formellement :

> **Définition 8.7** *(règle séquentielle)*. Une règle séquentielle $X \xrightarrow{s} Y$ est une règle d'association où les itemsets $X$ et $Y$ sont temporellement ordonnés.

En d'autres mots, cette règle établit que les items de X précèdent les items de Y. Cette règle est considérée comme fréquente si, d'une part, elle est répétée dans les données un nombre de fois supérieur au support minimum fixé, et si, d'autre part, sur le nombre total de fois où X apparait dans les données, Y apparait aussi à un pourcentage supérieur à la confiance minimum fixée.

### 8.1.3. Patterns et règles perceptivo-gestuels

Dans les données que nous traitons, un item est un élément d'interaction entre l'apprenant et l'environnement d'apprentissage. Il peut appartenir à une modalité perceptivo-gestuelle, soit une action, un geste ou une perception ou encore à une catégorie d'interaction système, soit un état de la simulation ou une évaluation à partir de règles expertes (voir section *« 6.6.2. Prendre en compte les interactions du système »*). En complément de leur séquentialité, nous nous intéressons à la nature des items dans le processus d'extraction de patterns séquentiels et de règles séquentielles. Plus précisément, nous nous intéressons à l'extraction de patterns et de règles qui rendent compte du caractère perceptivo-gestuel des interactions fréquentes enregistrées dans l'environnement d'apprentissage. Nous introduisons les concepts de « **patterns perceptivo-gestuels** » et de « **règles perceptivo-gestuelles** » que nous définissons ci-dessous.

La nature des items composant un pattern est un élément de précision sur l'ensemble des séquences analysées. Dans notre cas d'étude, nous cherchons à connaître les caractéristiques perceptivo-gestuelles des patterns en considérant les modalités auxquelles appartiennent les items qui les composent. Lorsque les caractéristiques perceptivo-gestuelles des items sont prises en compte dans le processus, nous parlons de fouille de **patterns perceptivo-gestuels**.

> Définition 8.8 *(pattern perceptivo-gestuel)*. Soit $I = \{i_1, i_2, ..., i_n\}$ un ensemble d'items. Soit $A$, un ensemble d'items *« actions »*, avec $A \subset I$; soit G un ensemble d'items *« gestes »*, avec $G \subset I$; soit $P$ un ensemble d'items *« perceptions »*, avec $P \subset I$ ; tel que $A \cap G = \emptyset$, $G \cap P = \emptyset$, $A \cap P = \emptyset$, $A \cap G \cap P = \emptyset$. Un pattern perceptivo-gestuel $p_\alpha = <t_1a_1, t_2a_2, ..., t_ma_m>$ est un pattern séquentiel avec les items $a_1, a_2, ..., a_m \in A \cup G \cup P$ et $t_1, t_2, ..., t_m$, les estampilles temporelles des items.

Nous faisons référence à une **fouille de règles perceptivo-gestuelles** lorsque les modalités perceptivo-gestuelles des items composant les ensembles ayant une relation d'association, sont prises en compte.

> Définition 8.9 *(règle perceptivo-gestuelle)*. Soit $I = \{i_1 i_2 ... i_n\}$ un ensemble d'items. Soit $A$, un ensemble d'items *« actions »*, avec $A \subset I$; soit G un ensemble d'items *« gestes »*, avec $G \subset I$; soit $P$ un ensemble d'items *« perceptions »*, avec $P \subset I$ ; tel que $A \cap G = \emptyset$, $G \cap P = \emptyset$, $A \cap P = \emptyset$, $A \cap G \cap P = \emptyset$. Une règle perceptivo-gestuelle $X \xrightarrow{\alpha} Y$ est une règle séquentielle $X \xrightarrow{s} Y$ avec $X \cup Y \subseteq A \cup G \cup P$.

### 8.1.4. Applications ciblées des patterns et règles perceptivo-gestuels

Tel que schématisé dans la figure 8.1, les patterns et règles perceptivo-gestuels extraits sont destinés à deux principales applications : la **modélisation de l'apprenant** et l'**acquisition automatique des connaissances du domaine**.

L'acquisition automatique des connaissances du domaine se conçoit par la modélisation des connaissances du domaine à partir de l'analyse transversale de séquences issues de l'activité de plusieurs utilisateurs (apprenants et experts). Le but est d'extraire des patterns et règles perceptivo-gestuels dont les corrélations avec les évaluations automatiques à partir de règles expertes permettent de distinguer des éléments de connaissances pouvant être intégrés à la base de connaissances du STI. Ces éléments de connaissances, à l'instar des contrôles (voir section *« 4.2.2. Représentation des connaissances »*), peuvent autant définir des erreurs que des bonnes pratiques.

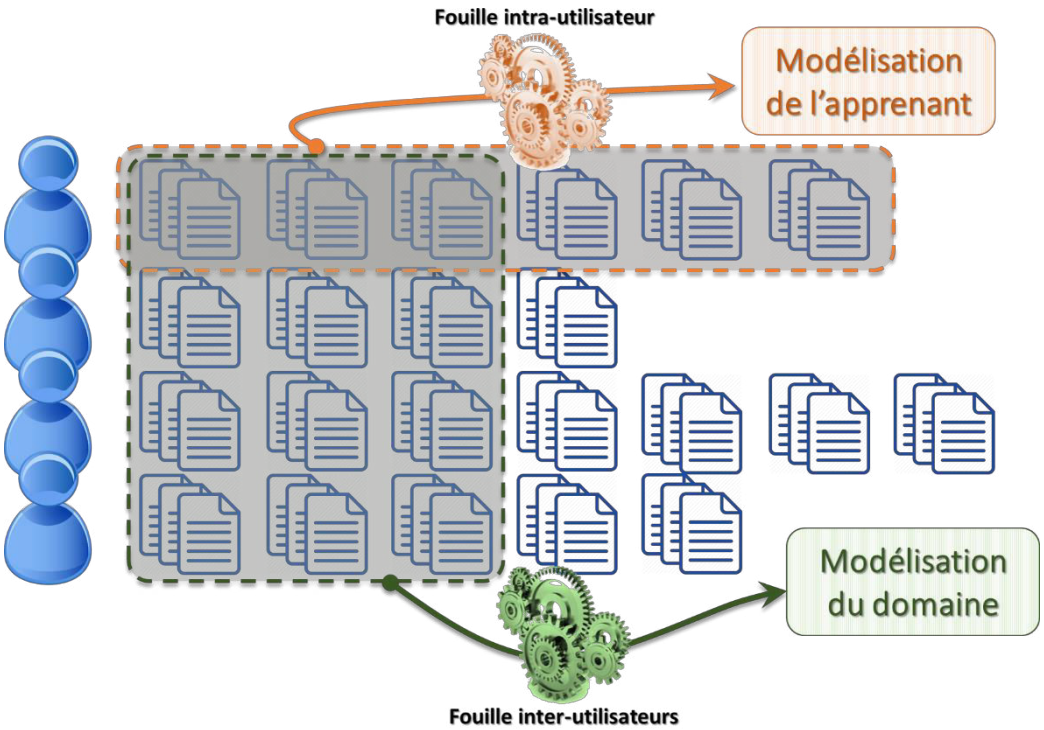



Figure 8.1. Méthodologie d'extractions de patterns d'interactions et applications

La modélisation des connaissances de l'apprenant se conçoit pour sa part par l'analyse spécifique des séquences issues de l'activité d'un apprenant unique. L'objectif est de permettre de diagnostiquer le comportement et les connaissances de l'apprenant en prenant en compte toutes les modalités des connaissances mises en jeu.

Les évaluations automatiques à partir de règles expertes représentées sous forme d'items dans les séquences, jouent un rôle important dans les deux cas. Leur corrélation avec des patterns d'interactions fréquentes permettent en effet de caractériser autant les interactions de l'apprenant qui conduisent à des erreurs ou des succès, que les combinaisons d'interactions pouvant être exploités par le STI pour évaluer, prévoir ou guider l'apprenant.

## 8.2. Heterogeneite Interne des Donnees

Les données réelles définissent rarement un ensemble homogène. En effet, il est très probable que cet ensemble soit structuré autour des caractéristiques plus ou moins variées des items et itemsets qui le composent (voir section *« 6.6.1. Items, Itemsets et séquences »*). Dans le cas du datamining, l'hétérogénéité interne des données peut être considérée à différents niveaux. Nous proposons de les classer autour des trois caractéristiques suivantes : la fréquence des items, la description des items, les liens entre les items.

La fréquence entre les items d'un ensemble de données peut être très variée, certains items pouvant se répéter naturellement plus que d'autres. Prenons l'exemple traditionnel du « panier de la ménagère » *(« market basket »* en anglais). Certains produits de consommation courante (aliments, cosmétiques) sont naturellement plus récurrents que des produits de confort ou d'utilisation prolongée (électro-ménagers, équipements sportifs).

Il peut être pertinent dans certains cas de considérer les items sur la base d'une caractéristique spécifique. Dans ce cas, la prise en compte de cette caractéristique dans l'extraction des données est essentielle pour la compréhension des patterns extraits. Pour reprendre l'image du panier de course, il peut s'agir par exemple de la différence de gammes des produits indépendamment de leur fréquence (ex : produits de premier prix, milieu ou haut de gamme).

Considérons maintenant la description des items. Par le terme « description » nous faisons référence aux attributs externes aux données elles-mêmes qui caractérisent un item ou une séquence. Dans notre exemple du panier de course, on peut imaginer le profil de l'acheteur comme des éléments de descriptions des items (ex : tranche d'âges, sexe, profession).

Enfin, au-delà de leur fréquence ou de leur description, les liens entre les items peuvent aussi induire une hétérogénéité à prendre en compte dans le processus de fouille. Dans notre exemple, l'achat de certains articles peut expliquer, ou est fortement corrélé, à l'achat de certains autres (ex : céréales et lait ; bière et chips).

Dans le contexte des traces d'apprentissage, l'hétérogénéité interne des données peut s'observer au niveau de la diversité des interactions provoquées selon le problème à résoudre, les phases du problème ou encore le niveau de difficulté ou le volume de travail requis par la résolution de chaque phase.

Dans le cadre de ce travail, nous portons notre attention sur les phases de résolution d'un problème. L'idée est d'identifier les interactions ayant une importance dans une phase même si elles sont rares sur la base de l'ensemble des traces d'activités enregistrées. C'est le cas par exemple de la tâche de repérage cutané. Celle-ci n'est observable que dans la deuxième phase d'une simulation de vertébroplastie et génère peu de données à l'échelle de l'ensemble des traces enregistrées au cours d'une session de simulation.

Dans la suite du chapitre, nous passons en revue des propositions de la littérature formulées pour adresser le problème de l'hétérogénéité interne des données sur différentes bases, soit la fréquence, la description ou les liens entre items. Ensuite, nous présentons notre proposition pour adresser cette problématique pour des données éducationnelles relatives à des cas de résolution de problème impliquant différentes phases de résolution.

## 8.3. ETAT DE L'ART DES PROPOSITIONS ADRESSANT L'HETEROGENEITE INTERNE DES DONNEES

### 8.3.1. Hétérogénéité induite par la fréquence des items

Lorsque la fréquence des items dans un ensemble de données varie beaucoup, le choix d'un support définissant le seuil d'un item fréquent se heurte au problème suivant :

(1) Si le support est trop élevé, les items dont la fréquence est faible seront ignorés
(2) Si le support est trop faible, il y a un risque d'explosion combinatoire de la tâche d'extraction des patterns fréquents car toutes les combinaisons possibles de liens entre items fréquents seront explorées.

Dans le cas d'un support faible, on peut aussi envisager le risque qu'un grand nombre de patterns redondants et d'un intérêt limité pour l'analyse des données, soient extraits et inondent les patterns intégrant les items rares ciblés.

Ce dilemme est appelé le « dilemme de l'item rare » ou encore « problème de l'item rare » (*the rare item problem*) [Liu *et al.* 1999]. Un item (ou un ensemble d'items) rare est un item (ou ensemble d'items) dont la fréquence est inférieure au support minimum fourni par l'utilisateur et très faible dans l'ensemble des données.

Pour adresser la problématique de l'item rare, les principales propositions de l'état de l'art sont de (1) cibler explicitement les items rares (au détriment des items fréquents) ; (2) partitionner les données en sous-ensembles homogènes; (3) utiliser des supports multiples.

### Fouille d'itemsets rares

Les travaux s'inscrivant dans l'approche de l'extraction d'itemsets rares partent du principe que les items rares portent des informations essentielles non fournies par les items fréquents [Szathmary *et al.* 2007 ; Haglin et Manning, 2007 ; Adda *et al.* 2012]. Par exemple, dans un ensemble de données médicales relatives à des symptômes, certaines combinaisons de symptômes rares sont potentiellement plus intéressantes pour aider à l'établissement d'un diagnostic que les combinaisons fréquentes plus évidentes.

Cette approche vise donc à cibler les patterns rares au détriment des patterns fréquents. [Szathmary *et al.* 2007] utilise une approche qui consiste, dans un premier temps, à créer un ensemble de données avec tous les itemsets rares rejetés par un algorithme de fouille de données classique (Apriori), et d'extraire, dans un deuxième temps, les items fréquents dans ce nouvel ensemble de données.

Haglin et Manning (2007) proposent le concept de fouille d'itemsets non-fréquents minimaux *(minimal infrequent itemset)*. Un *minimal infrequent itemset* est un itemset non fréquent dont tous les sous-ensembles sont fréquents. En d'autres mots, c'est une combinaison d'items non fréquents dans l'ensemble des données mais dont toutes les combinaisons qu'elle contient sont fréquentes.

### Fouille sur des partitions homogènes

Une autre approche adoptée pour éviter le dilemme de l'item rare consiste à partitionner l'ensemble des données en sous-ensembles homogènes. La nouveauté de l'approche réside dans l'organisation des données en sous-ensembles homogènes sur lesquels des algorithmes classiques d'extraction de patterns fréquents et de règles peuvent être appliqués. L'homogénéité se conçoit au niveau de la taille des sous-ensembles (ex. : Klawonn & Höppner, 2006]), de la similarité des items qu'ils contiennent (ex. : Kum *et al.* 2006; Klawonn & Höppner, 2006) ou encore de la fréquence des items (ex. : [Lee *et al.* 1998]).

### Fouille avec supports multiples

L'approche de fouille de données avec supports multiples (Liu *et al.* 1999 ; Lee *et al.* 2005 ; Hu & Chen, 2006 ; Madan Kumar et al (2012) offre à l'utilisateur la possibilité de spécifier un support minimum différent pour chaque item de l'ensemble de données à analyser. Ce choix est fait sur la base de l'hypothèse que ces supports minimums reflètent de manière plus cohérente qu'un support unique la fréquence et la nature des items pour lesquels ils ont été spécifiés. L'approche a été proposée par Liu *et al.* (1999). Ils ont aussi proposé l'algorithme MSApriori. Ce dernier est inspiré de l'algorithme Apriori d'Agrawal & Sikrant (1994). Il extrait des règles d'association intégrant des items rares tout en évitant de générer de nombreuses règles inintéressantes à partir des items très fréquents.

## 8.3.2. Hétérogénéité induite par la description des items

### Fouille de *Class Association Rule* (CAR)

La fouille de « *Class Association Rule* » [Li *et al.* 2001; Thonangi & Pudi, 2005; Vo & Le, 2008; Nguyen *et al.* 2012] a pour but de fournir une cible spécifique aux règles d'association extraites. En d'autres mots, les règles à extraire ciblent des items appartenant à des classes connues et labellisées dans l'ensemble de données. L'approche a été proposée par Liu *et al.* (1998) qui en définissent formellement le problème comme suit :

> Soit $T$ une base de données de transactions où chaque transaction est identifiée par un label $y$. Soit $I$, l'ensemble de tous les items dans $T$ et $Y$, l'ensemble des labels de classes tel que $I \cap Y = \emptyset$. Une « *class association rule* » est une implication de la forme : $X \rightarrow y$, avec $X \subseteq I$, et $y \in Y$.

Une transaction est définie comme une collection d'événements (items) enregistrée à un temps *t*. Dans le contexte de l'étude mentionnée ci-dessus, chaque transaction représente un ensemble d'items achetés par un consommateur à un temps *t*.

### Fouille multidimensionnelle

La fouille multidimensionnelle [Pinto *et al.* 2001 ; Songram *et al.* 2006 ; Rabatel *et al.* 2012] fait référence à la fouille prenant en compte des descriptions (ou attributs) des séquences. Ces descriptions sont les dimensions des séquences et peuvent définir diverses combinaisons pour orienter le processus d'extraction de patterns et de règles.

De manière formelle :

> Soit $D$, une base de séquences ; $I \subseteq D$ avec $I = i_1, \ldots, i_n$ l'ensemble des items dans $D$ ; et $\Delta$ un ensemble de dimensions, avec $\Delta = \Delta_1, \ldots, \Delta_n$. D est une base de séquences multidimensionnelles si chaque séquence $S \in D$, avec $S : <s_1, \ldots, s_n>$, a une valeur dans $\Delta$ tel que chaque élément $s_i$ de S est de la forme $(\delta_1, \ldots, \delta_n, s)$ et D, de la forme $(\Delta_1, \ldots, \Delta_n, S)$.

Les dimensions peuvent être, par exemple, les descriptions précisant le profil de l'apprenant à l'origine d'un ensemble de séquences dans un STI. Dans le travail de Fournier-Vigier (2010), les descriptions sont relatives au niveau d'expertise de l'apprenant (débutant, intermédiaire, expert), des habiletés qu'il maitrise (habileté1, habileté 2, habileté 3) et de l'état de la solution apportée par la séquence produite par l'apprenant. Par exemple, la séquence d'actions < (0, a), (1, c), (2, d) > est décrite par les dimensions suivantes :

- `état de la solution :` *`échec`*
- `expertise :` *`intermédiaire`*
- `habileté 1 :` *`non`*
- `habileté 2 :` *`oui`*
- `habileté 3 :` *`oui`*

Ces éléments donnent la séquence multidimensionnelle suivante : `(échec, intermédiaire, non, oui, oui, <(0,a),(1,c),(2,d)> )` [Fournier-Vigier, 2010, p. 98].

Dans la fouille de données, la prise en compte par exemple d'un niveau d'expertise et d'une habileté spécifiques permet de procéder à l'extraction de patterns et de règles ciblés contrairement à une fouille qui ignorerait ces informations additionnelles.

Rabatel *et al.* (2012) pour leur part font référence à la dimension des séquences comme un « contexte ». Le cas d'étude considéré est l'ensemble des transactions relatives aux achats d'articles de consommation courante dans un supermarché. Dans ce travail, un *contexte* est constitué par les informations additionnelles relatives à l'âge, au sexe ou au profil socio-professionnel du consommateur. L'extraction de patterns fréquents de transactions doit prendre en compte la classe d'âges (jeune, vieux) et le sexe (homme, femme) des consommateurs qui les ont effectuées sur la base de l'hypothèse que certaines transactions seront plus ou moins fréquentes selon les profils de consommateurs considérés.

En d'autres mots, le profil des consommateurs constitue un « contexte » explicatif des transactions réalisées. De ce fait, les algorithmes de fouille de données doivent prendre en compte la fréquence des items relativement aux items produits par des sujets de consommateurs de mêmes profils à différents niveaux. Par exemple, *<homme ; vieux>*, *(femmes ; hommes ; jeunes)* ou *(jeunes)*, *(femmes ; jeunes ; vielles)* ou *(femmes)*, (*hommes)*, etc. sont des profils définissant le contexte des transactions.

### 8.3.3. Hétérogénéité induite par les liens entre les items

#### Fouille basée sur les relations entre items

Les relations entre items sont des liens de dépendance définissant une structure de leurs occurrences dans un ensemble de données. Une relation courante entre les items est la séquentialité. Celle-ci définit une structure d'ordre temporel qui apporte une précision sur l'occurrence des items et ainsi sur les patterns qu'ils constituent dans le cas de la fouille de patterns séquentiels. D'autres formes de relations, intéressantes du point de vue des précisions qu'elles apportent à l'analyse et au traitement des données, peuvent exister entre les items. Certaines propositions de fouilles de données de la littérature visent à extraire des patterns et des règles qui rendent compte de ces relations (ex : Dánger *et al.* 2004 ; Hariri *et al.* 2012 ; Rodríguez-González *et al.* 2013).

Dánger *et al.* (2004) et Rodríguez-González *et al.* (2008, 2013) pour leur part se positionnent sur l'extraction de « patterns similaires ». Ceux-ci sont des patterns fréquents dont les items partagent des points communs. Dans cette approche, chaque item contient une description qui est utilisée pour en évaluer la similarité avec les autres. Cette évaluation est effectuée par une fonction de similarité classique telle que la similarité cosinus.

Hariri et al (2012) proposent un système de recommandations de chansons basé sur des patterns séquentiels extraits à partir des thèmes de chansons dans une base de playlists d'internautes. Ces thèmes sont inférés à partir des tags attribués par les internautes à chaque chanson. Les patterns fréquents extraits permettent de déterminer les séquences de transition fréquentes d'un thème à l'autre, et ainsi les séquences de transition d'une chanson liée à un thème à toutes les chansons liées au thème suivant.

### 8.3.4. Positionnement

Dans notre travail, l'ensemble des données produites au cours d'une session de simulation définit un flux allant d'un point de départ (début de l'exercice) à un point d'arrivée (fin de l'exercice) en passant par différentes phases marquant l'évolution de l'exercice.

Dans notre cas d'étude, une simulation de vertébroplastie se réalise en trois grandes phases : (1) la phase de réglages du fluoroscope ; (2) la phase de repérage cutané ; (3) la phase d'insertion du trocart.

La phase de réglages sert à chercher le positionnement du fluoroscope qui optimise la qualité des radiographies de face et de profil qui vont guider le chirurgien tout au long de l'opération. La phase de repérage cutané consiste à dessiner sur la peau du patient, les lignes définissant le repère d'insertion adéquat de l'outil chirurgical (le trocart). Enfin la phase d'insertion est celle où le trocart est manipulé de manière à atteindre la zone anatomique affectée.

Certaines interactions sont naturellement surreprésentées dans une phase et sous-représentées dans les autres. Par exemple, aucune interaction impliquant le trocart ne peut être observée en dehors de la phase 3 de l'opération. Les analyses visuelles ne sont pas les mêmes selon que le chirurgien est en train de calibrer le fluoroscope ou en train de procéder à la tâche critique d'insertion du trocart.

De ce fait, dans notre travail, l'hétérogénéité interne considérée dans les données se situe au niveau de la localisation des interactions relativement aux phases dans lesquelles elles ont été produites. Chaque interaction étant considérée comme un item, nous nous intéressons à l'importance des items relativement à une phase.

La séquentialité des antécédents et des conséquents (côtés *IF* et *THEN* d'une règle d'association) est importante dans notre cas dans la mesure où deux séquences comportant des interactions identiques sont différentes si les ordres d'occurrence de ces interactions sont différents. Pour illustrer par un exemple simple, la séquence *« Visualiser la vertèbre ciblée sur la radio de face > Enfoncer le trocart »*, est différente de la séquence *« Enfoncer le trocart > Visualiser la vertèbre ciblée sur la radio de face »*.

En résumé, considérant qu'un exercice est réalisé en différentes phases, nous voulons prendre en compte dans le processus de fouille de données, les informations relatives à la phase dans laquelle chaque interaction s'est produite. Cependant, les interactions appartenant aux phases générant un volume important d'interactions, peuvent submerger les interactions moins fréquentes provenant des autres phases et les rendre ainsi invisibles aux algorithmes classiques de fouille de données.

Nous nous intéressons donc à une solution permettant d'extraire des règles et patterns d'interactions en considérant leur importance relativement à une phase spécifique de la simulation. Dans cette optique nous proposons l'algorithme PhARules capable de procéder à la fouille de règles séquentielles en considérant leur fréquence à l'intérieur d'une phase spécifique. Avant de passer à la description de notre algorithme, nous détaillons dans la section suivante la notion de phase telle que nous la concevons.

## 8.4. Caracterisation des Phases de Resolution

Dans le processus de fouille de données, le support et la confiance des items sont d'emblée pris en compte relativement à tous les items de la base. Or, il est facile d'envisager des cas où l'importance des items doit être définie sur d'autres critères que la fréquence [Liu *et al.* 1999]. Le pourcentage de séquences contenant un item (ou un ensemble d'items) ne suffit pas toujours à définir l'importance de tous les patterns présents dans une base de séquences dans la mesure où

l'importance de certains items se conçoit dans un contexte spécifique. De fait, certains items seront naturellement plus nombreux que d'autres dans un ensemble de données.

Il s'agit ici de considérer l'hétérogénéité interne des données et le fait que l'occurrence de certains éléments (items ou ensemble d'items) peut être liée à des caractéristiques propres à certaines parties de l'ensemble données et de ce fait ne peuvent pas être analysés à concurrence de l'ensemble de tous les éléments de la base. Dans un contexte d'apprentissage, cette hétérogénéité peut être observée lorsqu'un problème requiert un processus de résolution en plusieurs phases (ou étapes)[7]. Dans le cadre du traitement des traces d'activité enregistrées à partir d'un STI, il convient de considérer que ces phases ne sont pas forcément homogènes. Plus précisément, il convient de prendre en compte les distinctions qu'elles induisent selon la nature des interactions générées ou le volume d'interactions généré. Le nombre d'interactions effectuées par l'apprenant peut varier largement d'une phase à l'autre. Certaines interactions seront plus fréquentes dans l'ensemble des séquences. Elles occultent ainsi pour les algorithmes de fouille de données, d'autres interactions peu fréquentes mais néanmoins importantes dans le contexte d'une phase.

Dans notre cas d'étude, la phase la plus longue est celle d'insertion du trocart. La phase de repérage cutanée qui la précède est en comparaison très brève. Cependant, la capacité à bien réaliser le repérage cutané est cruciale pour la réalisation de la phase d'insertion. Par conséquent, en dépit du faible nombre d'interactions enregistrées au cours de cette phase, celles-ci doivent être prises en compte dans le traitement des données car elles sont pertinentes pour l'analyse de l'activité d'apprentissage.

Pour pouvoir extraire un ensemble de patterns et de règles qui rendent compte des interactions importantes dans les différentes phases du processus de résolution de problème, il est nécessaire de pouvoir distinguer chaque séquence d'interaction selon la phase à laquelle elle appartient.

Formellement nous définissons une phase comme suit :

> **Définition 8.10** *(phase)*. Soit $D$, une base de séquences. Soit $I$ l'ensemble des items présents dans $D$. Une phase $\rho_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \ldots s_{im}\}$ est un sous-ensemble de séquences, tel que $\rho_i \subseteq D$ ; $\rho_1 \cup \ldots \cup \rho_i \cup \ldots \cup \rho_n = D$ ; $\rho_1, \ldots, \rho_i, \ldots, \rho_n$ sont distincts et disjoints. $\rho_i$ est décrite par un ensemble d'items $\alpha_i = \{\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \ldots, \alpha_{im}\}$ tel que $\alpha_i \subseteq I$ ; $\forall s_{ij} \in D, s_{ij} \in \rho_i \Rightarrow \alpha_i \subseteq s_{ij}$.

Par conséquent, chaque séquence perceptivo-gestuelle enrichie identifiée pour une phase est ainsi représentée :

$$S_a : < (\dagger_i, S_i [\tau_{ij, j=1..\mu}])_{i=1..\eta} (V_{q=1..v}[\upsilon_{r=1..w}]), \rho_i >$$

Avec « $\rho_i$ », l'identifiant de la phase à laquelle appartient la séquence.

Pour rappel (*Cf.* section *« 6.6.3. Formalisation des séquences perceptivo-gestuelles »*) :

- $\dagger_i = \dagger_1 \ldots \dagger_\eta$ *représente l'estampille temporelle marquant l'ordre de la séquence* $S_i$;
- $S_i = S_1 \ldots S_\eta$ *: l'ensemble des séquences perceptivo-gestuelles*
- $\tau_{ij} = \tau_{i1} \ldots \tau_{i\mu}$ *: un ensemble d'états de la simulation*
- $V_q = V_1 \ldots V_\eta$*: un ensemble de variables d'évaluations à partir de règles expertes*
- $\upsilon_r$*: les valeurs des variables* $V$

[7] Nous ne faisons pas de distinction particulière entre les termes *phase* et *étape*. Pour éviter toute confusion nous utiliserons uniquement le terme *phase* dans la suite du manuscrit.

## 8.5. EXTRACTION DE REGLES SEQUENTIELLES ORIENTEES PHASES AVEC PHARULES

L'algorithme PhARules est une version modifiée de l'algorithme CMRules proposé par Fournier-Vigier et al (2012) pour l'extraction de règles séquentielles communes à plusieurs séquences. PhARules a été proposé dans le but d'extraire des règles séquentielles perceptivo-gestuelles communes à plusieurs séquences en prenant en compte, dans le processus de fouille, la localisation de ces séquences, à savoir les phases auxquelles elles appartiennent, dans l'ensemble des traces d'activités.

Dans cette sous-section, nous présentons d'abord l'algorithme CMRules puis, nous décrivons le fonctionnement de PhARules.

### 8.5.1. L'algorithme CMRules

CMRules est un algorithme d'extractions de règles séquentielles communes à plusieurs séquences [Fournier-Vigier *et al.* 2012]. Il procède en considérant d'abord la base de séquences *D* fournie en entrée comme une base de transactions *D'*, en ignorant les informations temporelles des itemsets de *D*. Pour rappel, une séquence est un ensemble d'items (itemset) ordonnés en fonction de leur temps d'occurrence. Une transaction est un ensemble d'items dont la séquentialité n'est pas prise en compte. A titre d'illustration, supposons que nous avons les items suivants : a et b. Dans une base de transaction, les transactions <a, b> et <b, a> sont équivalentes. Dans une base de séquences, <a, b> et <b, a> constituent deux séquences distinctes.

Pour *D* et *D'*, chaque règle séquentielle $r = A \Rightarrow B$ de l'ensemble des règles séquentielles *R*, possède une règle d'association correspondante *r'* telle que $r' = A \rightarrow B$ dans l'ensemble des règles d'association *R'*. *minSup* et *minConf* sont respectivement le support et la confiance minimum des règles d'association de l'ensemble *R'* (voir section *« 8.1.2. Règles d'association »*). On notera *minSeqSup* et *minSeqConf* respectivement le support et la confiance minimum des règles séquentielles dans *R*.

Le support de la règle séquentielle $A \Rightarrow B$, $sup(A \blacksquare B)$, est toujours plus petit ou égal au support de la règle d'association $A \rightarrow B$, $sup(A \cup B)$. De ce fait, les relations $sup(r') \geq seqSup(r)$ et $conf(r') \geq seqConf(r)$ sont vraies pour toute règle séquentielle *r* et sa règle d'association correspondante *r'* [Fournier-Vigier *et al.* 2012]. Les règles d'association de la base de transactions sont d'abord extraites avec *minSup* = *minSeqSup* et *minConf* = *minSeqConf*. Ensuite, CMRules calcule le support et la confiance séquentiels de chaque règle d'association extraite. Toutes les règles dont le support et la confiance sont en deçà de *minSeqSup* et *minSeqConf* sont écartées. Les règles restantes forment l'ensemble des règles séquentielles ciblées.

algoCMRules($D$, $minSeqSup$, $minSeqConf$)

1. Obtenir la base de transactions $D'$ en enlevant l'information temporelle de $D$.
2. Trouver toutes les règles d'association dans la base de transactions en appliquant un algorithme de recherche de règles d'association comme *Apriori* [2]. Choisir $minsup = minSeqSup$ et $minconf = minSeqConf$.
3. Parcourir la base de séquences $D$ pour calculer la fréquence séquentielle et la confiance séquentielle de chaque règle d'association trouvée à l'étape précédente. Éliminer chaque règle $r$ telle que $seqSup(r) < minSeqSup$ ou $seqConf(r) < minSeqConf$.
4. Retourner l'ensemble des règles restantes.

Figure 8.1. L'algortihme CMRules ([Fournier-Vigier, 2010], p. 131)

## 8.5.2. L'algorithme PhARules

### Introduction

*PhARules* est l'acronyme de *PHase-Aware RULES* faisant référence à la capacité de l'algorithme à considérer l'importance d'une interaction selon la phase à laquelle elle appartient.

La section 6.7.4 décrit de manière détaillée la notion de phase telle que nous la concevons. Pour un bref rappel, une phase désigne une sous-partie d'un exercice et constitue un ensemble fini et distinct d'interactions enregistrées au cours de la résolution d'un problème –dans notre cas, des sessions de simulation. Les phases d'un exercice ne sont uniformes ni au niveau de leur durée, ni au niveau du volume de traces généré. La résolution d'un exercice peut varier grandement d'une session à l'autre qu'elle soit effectuée par le même utilisateur ou par différents utilisateurs. Il n'est donc pas non plus possible de prédire la durée d'une phase, ni le volume de traces d'interactions généré au cours de cette phase.

Tableau 8.1. Interactions observables sur la plateforme TELEOS, leurs périphériques source et les phases dans lesquelles elles sont réalisées.

| Interaction | Source | Phases | | |
|---|---|---|---|---|
| | | *Réglages* | *Repérage* | *Insertion* |
| Prise de radios de réglages | Interface de simulation | ✓ | ✓ | ✓ |
| Prise de radios de contrôles | Interface de simulation | | | ✓ |
| Prise de radios avec réglette | Interface de simulation | | ✓ | |
| Translation du fluoroscope | Interface de simulation | ✓ | | |
| Inclinaison du fluoroscope | Interface de simulation | ✓ | ✓ | ✓ |
| Tracé des repères cutanés | Interface de simulation | | ✓ | |
| Validation des repères cutanés | Interface de simulation | | ✓ | |
| Visualisation des panneaux de réglages des outils chirurgicaux | Oculomètre | ✓ | ✓ | ✓ |
| Visualisation des points d'intérêt de la vertèbre ciblée | Oculomètre | ✓ | ✓ | ✓ |
| Visualisation du modèle 3D du patient | Oculomètre | ✓ | ✓ | ✓ |
| Visualisation de l'outil (sur radios et modèle 3D) | Oculomètre | | | ✓ |
| Manipulation du trocart (placement, inclinaison, poussée, impact) | Bras haptique ou Interface de simulation | | | ✓ |
| Insertion et trajectoire du trocart (entrée dans le corps vertébral, sortie du corps vertébral, sortie de la vertèbre, reprise de la trajectoire) | Bras haptique ou Interface de simulation | | | ✓ |
| Retours haptiques durant l'insertion du trocart (impact, insertion, sortie) | Bras haptique | | | ✓ |

Dans ce cas de figure, la distinction des phases se situe soit au niveau des caractéristiques communes et exclusives des interactions qui y sont effectuées, soit au niveau des interactions spécifiques qui y sont observées et qui ne sont pas observables dans d'autres phases. Le tableau 8.1 résume les différentes interactions observables dans notre cas d'étude en précisant le périphérique qui en enregistre les traces et les phases dans lesquelles elles peuvent être observées. Par exemple, les interactions impliquant le trocart sont observables exclusivement dans la phase d'insertion.

### Fonctionnement

L'algorithme PhARules prend en entrée une base de séquences D, un ensemble de descripteurs de phases Ω, un support *minSeqSup* et une confiance *minSeqConf* des règles séquentielles à extraire. PhARules débute en parcourant les séquences de la base *D* pour identifier les phases auxquelles elles appartiennent. Cette opération est réalisée par la fonction *phaseDispatcher()* que nous décrirons plus en détails plus loin. Elle génère les sous-ensembles de séquences $D_{i=1,n}$, représentant les *n* phases identifiées et dans lesquelles les séquences de la base *D* sont réparties. Ensuite, pour chaque sous-ensemble $D_i$, l'algorithme enlève les informations temporelles des itemsets des séquences générant ainsi les sous-ensembles de transactions $D'_{i=1,n}$. Chaque sous-ensemble $D'_i$ est ensuite parcouru pour en extraire les règles d'association pour les seuils *minSeqSup* et *minSeqConf* fournis en entrée. Ces seuils, définis pour l'extraction des règles séquentielles, sont ainsi utilisés pour l'extraction des règles d'association. Ce choix est motivé par la preuve que, si des seuils minimum *minSup* et *minConf* doivent être définis pour l'extraction des règles d'association, le choix optimal est de considérer *minSup=minSeqSup* et *minConf=minSeqConf.* Cette égalité garantit l'extraction de toutes les règles présentes dans la base [Fournier-Vigier *et al.* 2012].

A partir de là, l'algorithme calcule pour chaque règle d'association ainsi obtenue dans $D'_i$, son support *seqSup* et sa confiance *seqConf* dans la base de séquences correspondante $D_i$. Enfin, les règles dont le support et la confiance sont inférieurs à *minSeqSup* et *minSeqConf* sont écartées, les règles restantes constituent l'ensemble des règles séquentielles orientées-phase extraites.

```
algoPhARules(Ω, D, minSeqSup, minSeqConf)
VARIABLES
1.   Ω : un ensemble de descripteurs
2.   D : une base de séquences
3.   minSeqSup: support minimum des règles séquentielles à extraire
4.   minSeqConf: confiance minimum des règles à extraire
5.   d ⊆ D : sous-ensemble de séquences représentant une phase
6.   D': base de transaction correspondant à la base de séquence D
7.   d': sous-ensemble de transactions correspondant à d
8.   r: règle d'association extraite dans d'
9.   n: nombre de phases dans D
10.  aRList: liste des règles d'association extraite dans d'
11.  m: nombre de règles dans aRList
12.  pRList: liste de toutes les règles séquentielles orientées phase extraites

PROCEDURE
1.   Générer les phases d(i) ={d(1), ..., d(n)} avec phaseDispatcher(Ω, D);
2.   Générer les bases de transactions d'(i)={d'(1), ..., d'(n)};
3.   POUR i allant de 1 à n FAIRE
4.       Trouver la liste aRList(i)={r(i1)...r(im)} des règles d'association dans d'(i) pour les seuils
         minSeqSup et minSeqConf
5.   POUR i allant de 1 à n FAIRE
6.       POUR j allant de 1 à m FAIRE
7.           Calculer le support et la confiance de r(ij), seqSup(r(ij)) et seqConf(r(ij)) dans d(i);
8.           SI (seqSup(r(ij)) < minSeqSup OU seqConf(r(ij)) < minSeqConf) ALORS
9.               Eliminer r(ij);
10.              SINON
11.                  Ajouter r(ij) dans pRList;
12.  Retourner pRList;
```

Figure 8.2. PhARules : algorithme d'extraction de règles séquentielles orientées phase

### La fonction *phaseDispatcher()*

Le fonctionnement de *phaseDispatcher(),* dont le but est d'identifier les phases de chaque séquence de la base D, a deux scénarios possibles. Ceux-ci dépendent du format des descripteurs de phases fournis à l'entrée. Les descripteurs de phase peuvent être sous la forme d'un ensemble regroupant plusieurs listes d'interactions, chaque liste représentant une phase ; ou sous la forme d'un ensemble de descripteurs caractérisant l'appartenance d'une séquence à une phase.

**Scénario #1**

Dans le premier cas, pour illustrer par un exemple simple, chaque phase peut être une énumération d'interactions telle que :

- `phase_1 = <déplacement_outilX; visualisations_typeX; visualisations_typeY>`
- `phase_2 = <réglages_outilY ; inclinaison_outilY>, …`
- `phase_n = <visualisations_typeZ ; validation_actionZ>`

Ce scénario convient aux cas où il est possible de déterminer des interactions appartenant exclusivement à une phase spécifique. La figure 8.3 résume le fonctionnement de *phaseDispatcher()* pour ce cas de figure.

La fonction *phaseDispatcher()* parcourt la base de séquences (*Cf.* Lignes 1 à 7 du bloc « PROCEDURE » de la figure 8.3), et vérifie les interactions contenues dans la séquence courante (ligne 5). Si l'une de ses interactions correspond à une phase spécifique, elle ajoute à séquence à la phase correspondante (ligne 6).

```
phaseDispatcher(Ω, D)
VARIABLES
1.  Ω : un ensemble de descripteurs
2.  D : une base de séquences
3.  d ⊆ D: sous-ensemble de séquences représentant une phase
4.  S ∈ D: séquence d'interactions
5.  S[]: tableau contenant les items d'interactions de la séquence S
6.  ω ∈ Ω: liste d'interactions d'une phase d
7.  n: nombre de phases dans D
8.  N = |D|: nombre de séquences dans D
9.  pList: liste des phases avec les séquences réparties

PROCEDURE
1.  POUR i allant de 1 à N FAIRE
2.    S[] ← tokenize(S(i)); //Décomposer S(i) en unités (tokens) d'interactions
3.    POUR j allant de 1 à S[].lentgh FAIRE
4.      POUR k allant de 1 à n FAIRE
5.        SI ω(k) contient S[j] ALORS
6.          ajouter S(i) dans d(k);
7.          break;
8.  Ajouter d(k) dans pList;
9.  Retourner pList;
```

Figure 8.3. Répartition des phases par la fonction *phaseDispatcher()*. Scénario 1.

**Scénario #2**

Dans les cas de figure où il est difficile, impossible ou non pertinent de répertorier la liste d'actions appartenant à chaque phase, l'alternative est de décrire de manière plus flexible les caractéristiques définissant l'appartenance d'une séquence à une phase. Pour ce faire, les descripteurs sont ainsi formatés:

```
<SI interaction_1 [ET | OU] interaction_2 [ET | OU] … interaction_n
                          ALORS Phase_x>
```

Ce descripteur indique à la méthode *phaseDispatcher()* que si la séquence en cours d'analyse contient les interactions indiquées, conjointement *(ET)* ou alternativement *(OU)*, alors elle appartient à la *phase x*. L'ordre des interactions n'est pas pris en compte dans le descripteur. Une séquence peut satisfaire plusieurs descripteurs faisant référence à la même phase.

Par exemple, on peut avoir la liste des descripteurs suivants pour un ensemble de traces :

- `<SI déplacement_outilX ET (visualisations_typeX OU visualisations_typeY) ALORS phase_1>`
- `<SI réglages_outilY OU inclinaison_outilY ALORS phase_2>`
- `<SI visualisations_typeZ ALORS phase_2>`
- `<Si visualisation_typeZ ET validation_actionZ ALORS phase_n>`

L'algorithme présentée dans la figure 8.4 décrit le fonctionnement de *phaseDispatcher()* dans ce cas de figure.

Pour chaque séquence de la base, la fonction *phaseDispatcher()* vérifie d'abord s'il y a des descripteurs qui contiennent au moins une des interactions qu'elle inclut (*Cf.* ligne 6 du bloc « PROCEDURE » de la figure 8.4). Ces descripteurs constituent l'ensemble des candidats possibles pour déterminer dans quelle phase la séquence va être répartie.

La fonction parcourt ensuite les descripteurs candidats (lignes 9 à 15) et vérifie que les interactions qu'ils contiennent se retrouvent bien dans la séquence en cours (lignes 11 à 13). Les descripteurs dont le contenu ne correspond pas à la séquence sont éliminés de la liste des candidats (ligne 13). Au bout du processus d'analyse d'une séquence, la liste des candidats ne doit contenir qu'un descripteur ou plusieurs descripteurs désignant la même phase. La séquence est attribuée à la phase indiquée dans ces descripteurs (ligne 15).

```
phaseDispatcher(Ω, D)
VARIABLES
1.   Ω : un ensemble de descripteurs
2.   D : une base de séquences
3.   d ⊆ D : phases décrites par les descripteurs de Ω
4.   S ∈ D: séquence d'interactions
5.   N = |D| : nombre de séquences dans D
6.   S[]: tableau contenant les items d'interactions de la séquence S
7.   ω ∈ Ω: descripteurs de phases
8.   n = |Ω| : nombre de descripteurs dans Ω
9.   ω[]: tableau contenant les items d'interactions d'un descripteur ω
10.  op: opérateur (ET, OU) précédant une interaction dans le descripteur
11.  descrCandList: liste des descripteurs candidats pour une séquence
12.  descr: descripteur correspondant à une séquence
13.  pList: liste des phases avec les séquences réparties

PROCEDURE
1.   POUR i allant de 1 à N FAIRE
2.     S[] ← tokenize(S(i)) //Décomposer S(i) en unités (tokens) d'interactions
3.     //Générer les descripteurs candidats
4.     POUR i allant de 1 à S[].length FAIRE
5.       POUR j allant de 1 à n FAIRE
6.         Si ω(j) contient S[i] ALORS
7.           Ajouter ω(j) dans descrCandList;

8.     //Enlever les descripteurs non pertinents parmi les candidats
9.     POUR i allant de 1 à descrCandList.size() FAIRE
10.      ω[] ← tokenize(descrCandList(i));
11.      POUR j allant de 1 à ω[].lentgh FAIRE
12.        SI (S(i) ne contient pas ω[j] && (op="ET")) ALORS
13.          Enlever descrCandList(i);
14.      descr ← descrCandList(0);
15.      Ajouter S(i) dans la phase d(x) //avec x la référence indiquée dans descr;
16.  Ajouter d(x) dans pList;
17.  Retourner pList;
```

Figure 8.4. Répartition des phases par la fonction *phaseDispatcher()*. Scénario 2.

### 8.5.3. Complexité computationnelle

La complexité de l'algorithme PhARules est fonction de la complexité de *phaseDispatcher()* à l'étape 1 (*Cf.* Figure 8.2) et de la complexité de l'algorithme d'extraction de règles d'association à l'étape 3. Des algorithmes de l'état de l'art, tel que Apriori, peuvent être utilisés pour cette tâche. La complexité computationnelle de ces algorithmes, est influencée par les principaux facteurs suivants : le support minimum fixé, le nombre d'items distincts, le nombre de séquences, la longueur moyenne des séquences (nombre moyen d'items que contient chaque séquence) [Tan *et al.* 2006, p. 345].

Pour le scénario 1 de l'exécution de PhARules, la complexité computationnelle de la fonction *phaseDispatcher()* est affectée par les paramètres suivants :

- *le nombre de séquences dans la base,*
- *la longueur moyenne des séquences*
- *et le nombre de phases.*

Pour le scénario 2, il faut ajouter le nombre de descripteurs fournis en entrée et le nombre moyen d'interactions incluses dans les descripteurs.

De manière générale, le temps d'exécution de PhARules est fonction :

- *des supports et confiance minimum fixés*
- *du nombre de phases à identifier*
- *du nombre de séquences de la base*
- *du nombre de séquences dans chaque phase*
- *de la longueur moyenne des séquences*

La réduction des seuils de support et de confiance ou l'incrémentation des autres paramètres, augmente le temps d'exécution et la consommation de ressources nécessaires à l'algorithme pour la répartition des phases et l'extraction de règles relatives à ces phases.

### Réduire le temps d'exécution de PhARules

La répartition des phases est une opération couteuse de l'algorithme PhARules, particulièrement dans le deuxième scénario décrit dans la section précédente. Pour réduire le temps d'exécution nécessaire à la répartition des phases, il est possible d'intervenir au niveau de la recherche de correspondances entre les interactions incluses dans la séquence en cours d'analyse et les interactions incluses dans les descripteurs.

Dans un premier temps, il s'agit d'encoder toutes les interactions avec des valeurs numériques. A partir de l'étape 2 du bloc « procédure » (Cf. figure 8.4), après la décomposition de la séquence en unités d'interaction, leurs codes numériques doivent être ordonnés dans l'ordre croissant. La vérification de la correspondance d'une séquence avec un descripteur peut ainsi se faire en appliquant la recherche dichotomique. La même opération doit être répétée à partir de l'étape 10 de la procédure. Le temps d'exécution de l'identification des phases des séquences peut être ainsi réduit en diminuant le nombre de comparaisons nécessaires à la fonction *phaseDispatcher()* pour identifier la phase d'une séquence.

Une autre méthode consiste à procéder à l'extraction des règles en deux temps en externalisant le processus de répartition des séquences dans des phases. Le framework PeTRA offre cette possibilité avec son opérateur de répartition de phases (voir section *« 7.3.4. L'opérateur de répartition de phase »*) qui permet de tagger les séquences avec la référence de la phase à laquelle elles appartiennent. Ensuite, l'algorithme PhARules est appliqué sans la fonction *phaseDispather()*. Il identifie les séquences sur la base de leur tag et peut ainsi procéder à l'extraction des règles en prenant en compte cette information pour le calcul du support et de la confiance de chaque règle.

Les deux alternatives peuvent être combinées en appliquant l'encodage et la recherche dichotomique à la tâche de répartition externalisée avant d'appliquer l'algorithme PhARules.

### 8.5.4. Bilan

L'algorithme PhARules a été conçu pour extraire des règles séquentielles communes à plusieurs séquences en considérant leur importance relativement à une phase d'exécution. L'intérêt est d'extraire des patterns fréquents d'interactions enregistrées dans des traces d'activités d'apprentissage, spécifiquement des activités impliquant des problèmes dont la résolution s'effectue en plusieurs phases.

L'exécution de PhARules est relativement coûteuse en temps à cause, notamment, de l'opération de répartition des séquences enregistrées dans les phases auxquelles elles correspondent. De plus, l'identification de la phase d'une séquence se base sur des descripteurs fournis par l'utilisateur. Ces descripteurs doivent être spécifiés. Ce travail de spécification est potentiellement fastidieux lorsque les frontières entre les phases ne sont pas connues, c'est-à-dire, lorsque l'ensemble des interactions survenant dans chaque phase ne peut pas être défini de façon exhaustive et de manière à être distinct des ensembles d'interactions relatifs aux autres phases. De plus, les descripteurs définis sont forcément dépendant du domaine.

Nous avons voulu explorer une alternative plus générique et qui affranchit de ce travail de spécification en détectant automatiquement les frontières entre les phases distinctes d'un processus de résolution de problème. Cette méthode vise par la même occasion à détecter automatiquement les comportements significatifs de l'apprenant au cours de la résolution du problème, fournissant ainsi une description de l'activité de l'apprentissage en réduisant le travail du chercheur (ou du tuteur) en amont. Cette méthode est décrite plus loin dans la section *« 9.3. Exploration d'une extension du modèle par la détection automatique du parcours de résolution de l'apprenant »*.

## 8.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'algorithme PhARules proposé dans le but d'extraire des règles séquentielles dont l'importance se conçoit relativement à une phase. Une phase est définie comme une partie distincte d'un cas de résolution de problème. Au-delà du contexte d'apprentissage, le concept de phases s'inscrit dans la problématique plus large de l'hétérogénéité interne des données en datamining. Nous avons fait une revue de l'état de l'art relatif à cette problématique après avoir défini quelques notions préliminaires. Celles-ci se réfèrent à l'extraction de connaissances avec les paradigmes du datamining (ex : patterns fréquents et règles d'association, patterns et règles séquentiels). Nous avons décrit l'adaptation de ces paradigmes aux connaissances de type perceptivo-gestuel qui nous intéresse dans ce travail. Nous avons ainsi proposé les notions de patterns et de règles perceptivo-gestuels. Ces derniers ciblent les interactions multimodales fréquentes de l'apprenant. L'exploitation de ces patterns et règles perceptivo-gestuels visent à modéliser les connaissances de l'apprenant ainsi que les connaissances du domaine en adéquation avec leur nature multimodale.

Après une revue de la littérature sur les propositions adressant la problématique de l'hétérogénéité interne des données, nous avons caractérisé la notion de phase telle que nous la concevons. Dans le contexte de l'analyse de traces d'apprentissage, la prise en compte des phases de résolution d'un problème est importante dans la mesure où cela permet de cibler les différentes parties d'un exercice et de ce fait, de cibler de manière plus fine l'activité de l'apprenant.

Dans le chapitre suivant, nous décrivons les expérimentations conduites pour évaluer nos différentes propositions.

## SYNTHESE

- Proposition d'un algorithme pour l'extraction de règles séquentielles orientées phase : PhARules
- Conception de la procédure *phaseDispatcher()* pour l'identification des phases de résolution d'un problème
- Proposition de spécification des descripteurs de phase de résolution selon deux scénarios
- Proposition des concepts de « patterns perceptivo-gestuels » et de « règles perceptivo-gestuelles »
- Caractérisation de la notion de « phase de résolution »

# PARTIE 4
# EXPERIMENTATIONS

# CHAPITRE 9.
# EXPERIMENTATIONS

*Dans ce chapitre, nous décrivons les expérimentations conduites pour l'évaluation des principales propositions de cette thèse : le modèle de représentation des séquences perceptivo-gestuelles, le framework PeTRA permettant de réifier ce modèle et PhARule,s l'algorithme d'extraction de règles perceptivo-gestuelles orientées phases. Nous présentons aussi ici les évaluations conduites sur une proposition de méthode de détection automatique des parcours de résolution de problèmes de l'apprenant.*

## Sommaire

**9.1. Introduction générale ..... 139**
**9.2. Evaluation du Modèle de Représentation des Séquences Perceptivo-Gestuelles 139**
9.2.1. Introduction ..... 139
9.2.2. Méthodologie ..... 140
9.2.3. Résultats ..... 142
9.2.4. Bilan ..... 144
**9.3. Exploration d'une Extension du Modèle par la Détection Automatique du Parcours de Résolution de l'Apprenant ..... 144**
9.3.1. Introduction ..... 144
9.3.2. Méthodologie ..... 145
9.3.3. Expérimentation ..... 149
9.3.4. Bilan ..... 153
**9.4. Evaluation de l'Extraction de Règles Orientées Phases de Résolution ..... 153**
9.4.1. Introduction ..... 153
9.4.2. Mise en place de l'expérimentation ..... 154
9.4.3. Partie 1 : Evaluation des performances computationnelles de PhARules ..... 154
9.4.4. Partie 2 : Evaluation de la pertinence des règles extraites ..... 159
**9.5. Généricité du Modèle de Représentation et du Framework de Traitements ..... 167**
**9.6. Conclusion et Perspectives ..... 167**
**Synthèse des Expérimentations ..... 168**

## 9.1. INTRODUCTION GENERALE

Nous présentons dans les sections qui suivent les expérimentations conduites pour l'évaluation de nos propositions détaillées dans les chapitres 6, 7 et 8 du manuscrit. La question de recherche principale définissant la ligne conductrice de ces expérimentations est la suivante :

> *Comment structurer la représentation et l'exploitation de traces multi-sources et hétérogènes sous-tendant des connaissances perceptivo-gestuelles, pour la production de services tutoriels dans un STI dédié à un domaine mal-défini ?*

Nous avons tout d'abord adressé le problème de l'hétérogénéité des traces en proposant un modèle de représentation des séquences reflétant les différentes facettes d'interactions multimodales. Dans cette optique nous avons conçu le framework PeTRA permettant d'implémenter ce modèle à partir d'un ensemble de traces brutes multi-sources et hétérogènes. Le cas d'étude est le STI TELEOS dédié à la chirurgie orthopédique percutanée, présenté en extension dans les chapitres 4 et 5 du manuscrit.

La première expérimentation vise à évaluer dans quelle mesure le modèle de représentation proposé permet d'analyser le comportement de l'apprenant sur la base des différentes modalités de ses interactions. Dans un deuxième temps, nous évaluons notre proposition d'étendre ce type d'analyse en automatisant la modélisation du comportement de l'apprenant.

Ensuite, nous nous préoccupons de la problématique d'extraction de patterns de connaissances à partir des traces d'activité enregistrées. L'objectif est d'exploiter ces patterns à des fins de production de services tutoriels. Nous voulons notamment les utiliser pour la modélisation des connaissances du domaine et la modélisation des connaissances de l'apprenant. Nous évaluons notre proposition d'algorithme sur deux volets : (1) ses performances computationnelles et (2) la pertinence de ses résultats.

## 9.2. EVALUATION DU MODELE DE REPRESENTATION DES SEQUENCES PERCEPTIVO-GESTUELLES

### 9.2.1. Introduction

Notre proposition de formalisation des séquences perceptivo-gestuelles a été de représenter celles-ci sous forme d'itemsets. Chaque itemset regroupe des items de différentes modalités ayant été identifié comme cooccurrents. Les séquences sont étendues avec les interactions du STI en réponse à l'activité de l'apprenant. Il s'agit concrètement d'intégrer dans ces séquences les états de la simulation et les évaluations des actions de l'apprenant générées par le STI.

Nous avons émis l'hypothèse ***(H1)*** que ***« l'intégration des interactions multimodales de l'apprenant dans des séquences perceptivo-gestuelles améliore la précision de l'analyse de ses activités dans un contexte d'apprentissage »***.

Nous évaluons cette hypothèse dans cette première partie de nos expérimentations. Les questions de recherche conduisant notre démarche expérimentale pour cette première partie sont les suivantes :

> **QR1 :** *La représentation multimodale des interactions de l'apprenant est-elle pertinente d'un point de vue didactique ?*

**QR2 :** *Quelle est la cohérence entre les actions/gestes de l'apprenant et ses perceptions ?*

Les réponses recherchées visent à estimer l'intérêt de cette proposition et par là même l'utilité générale du framework PeTRA proposé pour l'implémenter. En effet, les questions précédentes nous conduisent à celles de l'implémentation du modèle et à la possibilité de l'analyser et de l'exploiter. Elles nous mènent, plus spécifiquement, à celles de l'efficacité des outils proposés à prendre en charge ces traitements.

**QR3 :** *Les outils proposés permettent-ils d'implémenter le modèle proposé ?*

**QR4 :** *Les outils proposés, permettent-ils de modéliser l'activité de l'apprenant en intégrant les différentes facettes de ses interactions ?*

Ces questions sous-tendent l'hypothèse ***(H2)*** stipulant que *« **L'implémentation du modèle de représentation avec les outils informatiques proposés permet de structurer le traitement et l'analyse de l'activité de l'apprenant en adéquation avec la nature perceptivo-gestuelle de ses connaissances ».***

### 9.2.2. Méthodologie

Pour l'évaluation des hypothèses formulées (H1 et H2), nous mettons à l'épreuve, dans notre cas d'étude, la possibilité d'analyser le rapprochement entre les erreurs des internes et leurs perceptions visuelles, représentées dans les séquences perceptivo-gestuelles selon le modèle proposé. Pour pouvoir analyser le rapprochement entre les différentes parties de l'activité multimodale des internes, nous avons utilisé l'opérateur d'analyse du parcours de résolution du framework PeTRA.

Comme illustré dans la figure 9.1, les différents opérateurs utilisés pour la mise en place de l'étude sont les suivants :

1) le *nettoyeur* pour l'élimination des bruits dans les traces multi-sources
2) le *filtreur* pour la suppression des paramètres non pertinents des traces pour la suite des traitements
3) le *fusionneur* pour la jonction des traces en séquences perceptivo-gestuelles sur la base de notre modèle de représentation
4) le *sémantisateur* pour la traduction des états de la simulation et des caractéristiques des actions
5) l'*annotateur* pour l'intégration des évaluations expertes produites par le système
6) l'*analyseur de parcours de résolution* pour l'identification du parcours emprunté par l'apprenant à travers les différentes phases de la simulation.

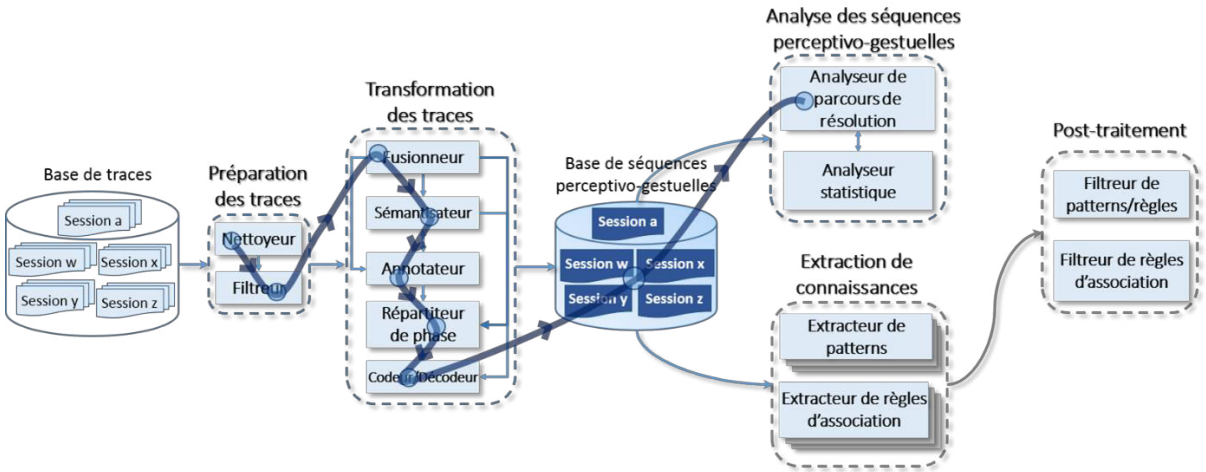



Figure 9.1. Les opérateurs de PeTRA appliquées sur les traces pour l'analyse du comportement de l'apprenant à travers son parcours de résolution d'un exercice de simulation de vertébroplastie.

Le parcours de résolution ciblé intègre trois types de comportements qui constituent les points de décisions définissant le parcours de l'apprenant au cours d'une simulation. Pour rappel, la vertébroplastie se réalise en trois phases et le STI TELEOS permet à l'apprenant de circuler librement entre les phases. En effet, l'apprenant peut choisir de commencer par n'importe quelle phase et peut revenir sur des phases déjà considérées comme validées s'il le souhaite. Dans le parcours qu'il définit ainsi tout au long d'une session de simulation, nous identifions (1) les validations de phase ; (2) les retours sur phase et (3) les actions correctives. Les validations de phase sont définies par la décision de passer à la phase suivante ; les retours sur phase sont définis par les passages à une phase antérieure motivés par une erreur de validation identifiée par l'apprenant ; enfin, les actions correctives constituent toutes les actions effectuées lors d'un retour sur phase dans le but de corriger l'erreur de validation identifiée.

### Protocole et données

Les traces utilisées pour cette étude proviennent de 9 sessions de simulation de vertébroplastie réalisées par 5 internes et 1 chirurgien expert du département d'Orthopédie Traumatologie du CHU de Grenoble. Hormis l'expert aucun des sujets n'avait utilisé le simulateur auparavant. Les exercices de simulation consistaient à traiter une fracture de la 11e et/ou 12e vertèbre thoracique. Avant de commencer, chaque sujet a visionné une vidéo de présentation du simulateur puis effectué une session de prise en main.

Le tableau 9.1 détaille les données recueillies et traitées. Le symbole « # » fait référence à « nombre », l'abréviation « p-g » désigne l'adjectif perceptivo-gestuelle et « VS », les mots variables de situation.

Tableau 9.1. Traces collectées et traitées

| Profil | N° Session | Vertèbre opérée | #Traces brutes | #Séquence p-g enrichies | #Visualisations | #VS incorrectes | #Erreurs validation | #Séquences correction |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Interne | S01 | 11e T | 2702 | 113 | 2033 | 750 | 9 | 11 |
| Interne | S02 | 11e T | 1636 | 37 | 885 | 178 | 4 | 4 |
| Interne | S03 | 12e T | 1118 | 33 | 690 | 208 | 3 | 5 |
| Interne | S04 | 11e T | 5107 | 128 | 2482 | 644 | 10 | 39 |
| | S05 | 12e T | 1677 | 41 | 858 | 174 | 6 | 10 |
| Expert | S06 | 11e T | 3432 | 59 | 1452 | 249 | 4 | 31 |
| | S07 | 12e T | 1828 | 47 | 1040 | 239 | 5 | 9 |
| Interne | S08 | 11e T | 5068 | 117 | 2514 | 644 | 20 | 36 |
| | S09 | 12e T | 1496 | 41 | 869 | 193 | 4 | 22 |

Les métadonnées présentées dans le tableau sous les rubriques « profil », « N° Session » et « Vertèbre opérée » ont été notées manuellement au cours de la collecte de données. Les autres caractéristiques ont été obtenues automatiquement avec l'opérateur d'analyse statistique appliqué dans un premier temps sur l'ensemble des traces brutes. Cette opération a permis le décompte du nombre de traces par session, toutes sources confondues. En d'autres mots, la rubrique « Traces brutes » présente le nombre total d'interactions enregistrées par les trois sources : l'interface de simulation, l'oculomètre et le bras haptique.

Dans un second temps l'opérateur d'analyse statistique a été appliqué aux séquences perceptivo-gestuelles enrichies. Ces séquences sont celles obtenues après le passage, sur les traces brutes, des opérateurs de nettoyage, de filtrage, de fusion, de sémantisation et d'annotation. Le nombre de traces brutes ne présume pas du nombre de séquences enrichies qui vont être générées. En effet, les volumes de traces générées au cours d'une session sont grandement influencés par l'utilisation du bras haptique et le comportement lié aux perceptions visuelles. Par exemple, une utilisation intensive du bras haptique, de nombreuses visualisations et peu d'actions ponctuelles vont générer beaucoup de traces brutes. Par contre, peu de séquences perceptivo-gestuelles vont être générées à partir de ces traces. En effet, les interactions perceptuelles et gestuelles sont fusionnées avec les actions ponctuelles auxquelles elles se rapportent. Cela explique par exemple, l'écart entre les volumes de traces brutes des sessions S01 et S08 (soit, respectivement, 2702 et 5068) et la proximité de leurs volumes de séquences enrichies (soit 113 et 117).

Dans un deuxième temps, l'opérateur de parcours de résolution est appliqué aux séquences perceptivo-gestuelles enrichies. Il identifie les variables de situation notées incorrectes, les erreurs de validation et les séquences de correction. Pour rappel, les variables de situation sont les évaluations à base de règles expertes effectuées par le module de diagnostic du STI ; les erreurs de validations sont assimilées aux retours sur phase motivés par des validations de phase erronées ; et les séquences de correction se réfèrent aux interactions enregistrées au cours des retours sur phase. L'opérateur d'analyse statistique appliqué ensuite, décompte ces éléments pour chaque session ainsi que le nombre de visualisations totales enregistrées.

### 9.2.3. Résultats

Le nombre de séquences variant beaucoup d'une session à l'autre, nous utilisons le nombre moyen de visualisations par séquence qui traduit mieux la tendance des analyses visuelles que le simple nombre des visualisations. Il en va de même pour les variables de situation incorrectes. Nous nous

intéressons au nombre d'erreurs de validation commises dans une session, le nombre d'actions consacrées à la correction de ces erreurs ainsi que les perceptions liées à ces actions de correction. Le graphique de la Figure 9.2 résume la distribution des visualisations, des variables de situation incorrectes et des erreurs de validation. La session avec la plus grande moyenne de visualisations (24,6) rapporte 19% de variables de situation incorrectes en moins que les autres. On peut constater la même relation entre les analyses visuelles et les erreurs de validation pour l'ensemble des sessions étudiées, excepté pour la session *S08*. En effet, cette session rapporte une forte moyenne d'analyses visuelles (21,5) mais néanmoins beaucoup d'erreurs de validation (20). Cela s'explique par le fait que le sujet exécute à la fois peu d'actions de correction et très peu d'analyses visuelles pour supporter ces actions. En effet, dans le graphique de la Figure 9.3, on constate que cette session a une faible moyenne de séquences liées à des corrections (1,8) lors d'un retour sur phase, couplée à la plus faible moyenne de visualisations de la série (15,5) pour ces corrections.

En comparaison, la session *S02* rapporte la plus faible moyenne d'actions de corrections (1,0. *Cf. Figure 9.3*) mais suffisamment d'analyses visuelles (20,5. *Cf. Figure 9.3*) pour consolider les décisions de validation et limiter les erreurs (4. *Cf. Figure 9.2*). De plus, on peut constater sur la *Figure 9.4* qu'une faible part des visualisations de la session *S08* est dédiée à des analyses visuelles de contrôle (7,7 contre 13,8 pour les visualisations liées à l'exploration). La session *S09* a été réalisée par le même sujet mais on observe moins d'erreurs de validation et moins de variables de situation incorrectes car tout en ayant sensiblement le même taux de visualisations, son comportement lié aux analyses visuelles s'est inversé et il consacre plus d'actions à la correction des erreurs.

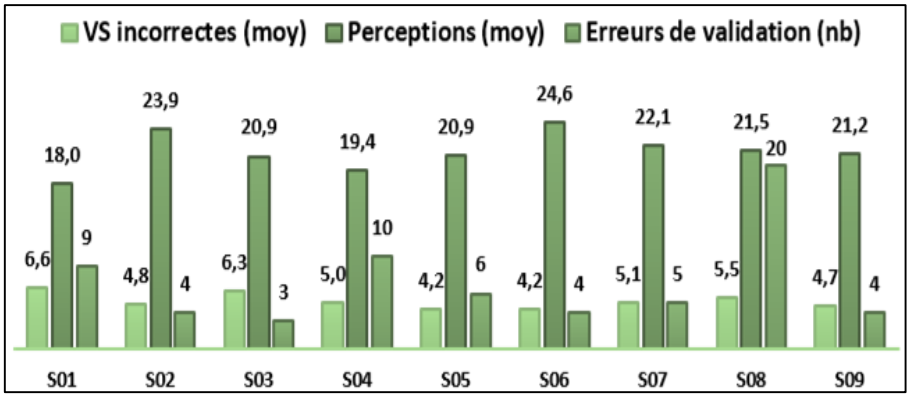



Figure 9.2. Histogramme des variables de situation incorrectes, visualisations et erreurs de validation

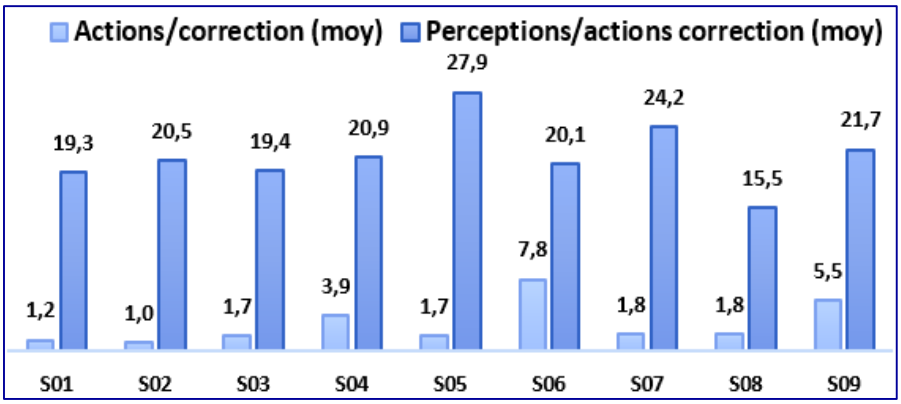



Figure 9.3. Histogramme des séquences liées à une correction et des visualisations accompagnant ces séquences

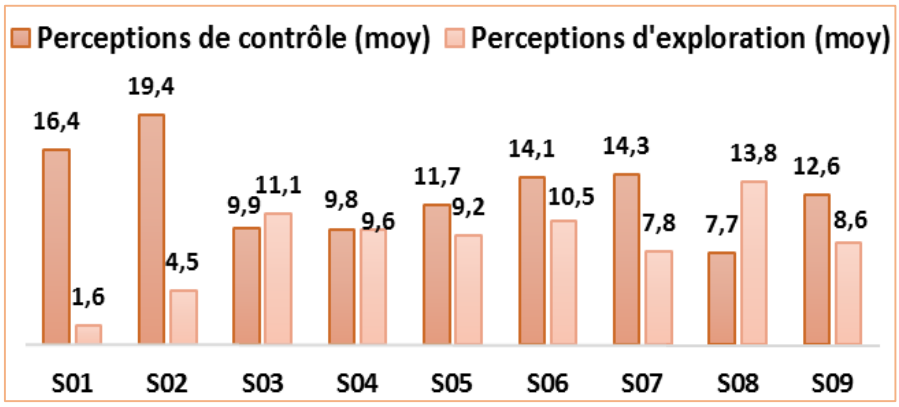



Figure 9.4. Histogramme des visualisations de contrôle et d'exploration

### 9.2.4. Bilan

Le modèle de représentation proposé, implémenté avec l'aide des opérateurs du framework PeTRA, a permis de représenter de manière cohérente des séquences d'interactions où des connaissances perceptivo-gestuelles sont mises en jeu. En effet, l'expérimentation décrite a démontré que les comportements de l'apprenant liés aux perceptions visuelles pouvaient être analysés de manière pertinente à partir des séquences ainsi représentées. Les résultats obtenus ont révélé une influence forte du comportement relatif aux analyses visuelles sur les erreurs commises au cours d'une session de simulation. Ces résultats vont donc dans le sens de l'hypothèse selon laquelle les différentes facettes des interactions apportent des précisions intéressantes à l'activité de l'apprenant.

Néanmoins, l'analyse de l'activité de l'apprenant à partir de son parcours de résolution demande un travail préalable de description des éléments du parcours à identifier. Il s'agit de la description des validations de phase, des retours sur phase et des actions correctives ou de tout autre comportement significatif que l'on voudrait identifier dans le parcours de résolution d'un exercice par l'apprenant.

Ceci constitue une limite pour laquelle nous avons voulu proposer une piste de solution. Dans cette optique nous avons effectué une étude exploratoire sur la possibilité de détecter de manière automatique les interactions significatives de l'apprenant. Nous décrivons cette proposition dans la section suivante.

## 9.3. Exploration d'une Extension du Modele par la Detection Automatique du Parcours de Resolution de l'Apprenant

### 9.3.1. Introduction

Dans la perspective d'affranchir le chercheur (ou le tuteur) de la tâche de description manuelle des interactions significatives à identifier dans le parcours de résolution de l'apprenant, nous avons orienté nos recherches sur la piste d'une identification automatique des interactions dans un ensemble de traces continues et des frontières entre les phases de résolution d'un problème. Nous rappelons que l'intérêt de ce travail se situe dans le fait que nous considérons l'exploitation d'un STI offrant à l'apprenant le plus de liberté possible dans l'exécution des exercices. En effet,

les cas que nous voulons adresser sont des cas de résolution de problème où l'apprenant peut circuler librement entre les différentes phases et revenir si nécessaire sur des phases incorrectement validées dans le but d'y apporter des modifications. Dans l'esprit du paradigme constructiviste, au-delà des interactions elles-mêmes (actions, gestes, perceptions), le parcours de résolution du problème emprunté par l'apprenant fournit des informations didactiques et pédagogiques pertinentes. En effet, diverses perspectives relatives à la production de services tutoriels exploitant l'analyse de parcours de résolution peuvent être considérées. Parmi celles-ci, on peut envisager la possibilité d'inférer le niveau de maîtrise des compétences du domaine par l'apprenant, la stratégie de résolution adoptée par l'apprenant ou encore, son profil pédagogique.

L'automatisation de cette tâche d'identification des phases ou phases de résolution vise aussi à optimiser l'ensemble du processus de traitement en libérant l'utilisateur (chercheur ou tuteur) du travail fastidieux qui consiste à lister les phases de résolution des exercices, à les décrire et à lister les interactions qui les caractérisent pour pouvoir être exploitées par des outils algorithmiques.

Ce travail exploratoire adresse autrement la question de recherche QR4 formulée dans la première partie des expérimentations conduites : « *Les outils proposés, permettent-ils de modéliser l'activité de l'apprenant en intégrant les différentes facettes de ses interactions ?* ». Cette fois, la question cible spécifiquement la possibilité d'exploiter de manière automatique non supervisée, les outils de traitement proposés.

### 9.3.2. Méthodologie

Pour mettre en place la méthode proposée, il faut pouvoir tout d'abord identifier dans un ensemble d'interactions continues, celles qui marquent un comportement ou interaction significative dans le parcours de résolution.

#### Caractérisation des interactions significatives du point de vue de la résolution d'un problème

Par « interactions significatives », nous désignons toutes interactions pouvant définir et décrire le parcours de résolution de l'apprenant. Il s'agit des interactions marquant le passage d'une phase à la suivante, celles indiquant un retour sur phase, les actions correctives exécutées au cours d'un retour sur phase et les modifications importantes apportées à une action ou un geste au cours de la phase courante.

Ces interactions marquent un comportement actif impliquant l'exécution d'actions ou de gestes. Nous pensons que, pour pouvoir définir un parcours de résolution ou, plus précisément, la stratégie que ce parcours sous-tend, elles doivent être complétées par des comportements n'impliquant aucune action ou geste spécifique, tels que le recul pris par l'apprenant pour vérifier, évaluer ou analyser ses actions ou ses gestes. Ces comportements sont liés à la prise d'informations perceptuelles. Dans notre cas d'étude, il se manifeste principalement par l'analyse visuelle de certains points de l'environnement de simulation. Il n'implique aucune interaction d'exécution mais revêt une grande importance dans l'analyse de l'activité d'apprentissage en apportant des précisions sur le temps pris par l'apprenant pour l'auto-analyse de ses interactions et la fréquence de cette auto-analyse. Celle-ci peut servir à vérifier la dernière action exécutée ou à décider de la prochaine action à exécuter.

### Caractérisation des critères de validation des phases de résolution

Outre les interactions significatives que nous visons à détecter, il convient de caractériser les critères de validation de chaque phase. L'objectif est de fournir à l'opérateur d'analyse de parcours de résolution, les éléments qui lui permettront d'inférer la frontière entre différentes phases et à partir de là, les retours correctifs sur des phases antérieures.

Pour illustrer avec notre cas d'étude, rappelons qu'un exercice de simulation de vertébroplastie se réalise en trois phases : le réglage du fluoroscope (phase 1), le repérage cutané (phase 2) et l'insertion du trocart (phase 3). Les radios constituent le principal outil de guidage de l'opération pour le chirurgien, et de ce fait, constituent les principaux éléments de l'environnement de simulation sur lesquels les critères de validation des phases sont évalués.

La phase 1 est validée si le positionnement du fluoroscope permet de générer des radios de face et de profil en adéquation avec certaines contraintes d'affichage. Ces contraintes assurent la qualité des radios de manière à éviter des approximations dans le rendu de la vertèbre ciblée. Elles assurent aussi que la trajectoire des outils chirurgicaux vers la vertèbre est adéquate. La validation de la phase 1, et donc du réglage du fluoroscope, s'évalue en fonction des critères suivants : le centrage de la vertèbre ciblée, la netteté des contours de celle-ci et la visibilité des épineuses de toutes les vertèbres affichées (*Cf. Figure 9.5*). La phase 2 est validée si le tracé des repères cutanés surplombe la vertèbre à opérer sur les radios. Enfin, la phase 3 est validée si la trajectoire renvoyée sur les radios est intra-osseuse.

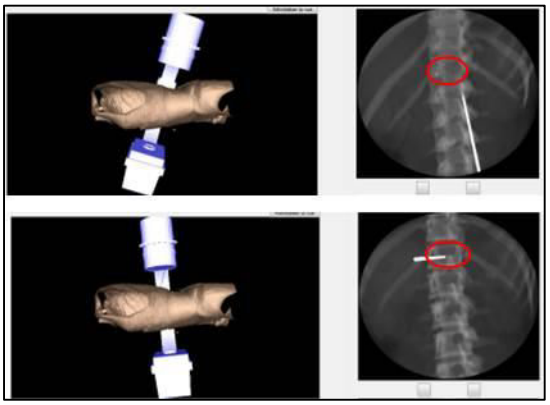


Figure 9.5. Validation de l'affichage d'une vertèbre

Les critères de validation que nous reportons ici pour chaque phase représentent un modèle simplifié du processus de validation. En effet, selon les cas cliniques, plus de critères relevant des connaissances déclaratives du domaine sont susceptibles d'être utilisés.

Nous considérerons ce cas simplifié pour les besoins des expérimentations préliminaires visant à évaluer la proposition que nous décrivons dans cette section.

### Identification des paramètres décrivant une interaction significative

Les interactions significatives et les critères de validation d'une phase une fois caractérisés, le défi est de définir les indices nécessaires à l'identification automatique dans l'ensemble des séquences, ces interactions et validations. Pour atteindre cet objectif, nous proposons d'identifier dans les séquences les paramètres dont les variations sont symptomatiques des interactions significatives ciblées.

Notre réflexion nous a mené à considérer la piste de la similarité entre des séquences perceptivo-gestuelles contiguës, comme un paramètre discriminant entre les interactions significatives.

L'idée de départ est de supposer que deux séquences contiguës définissant le continuum d'une même interaction, auront une forte similarité. En effet, si les interactions rapportées par ces séquences font partie du continuum d'une même action ou d'un même geste, elles ne bousculent pas l'état de la simulation. En d'autres mots, l'état de la simulation ne subit pas de changement significatif d'une séquence à la suivante si les interactions produites ne sont pas liées à une interaction significative.

Par exemple, considérons une trajectoire continue du trocart et supposons que l'interne décide, à un certain point de l'insertion, de reprendre la trajectoire ou de la modifier. Au moment où cette modification est produite, le continuum défini jusqu'ici par cette trajectoire est interrompu. Cette interruption est marquée par une séquence peu similaire avec les précédentes. La frontière de cette modification sera marquée par la dissemblance entre cette séquence et la dernière séquence définissant la trajectoire interrompue.

### Calcul de la similarité des séquences contiguës

Pour cette expérimentation, nous avons implémenté une version de l'analyseur du parcours de résolution qui prend en entrée une base de données de séquences perceptivo-gestuelles temporellement ordonnées, le seuil définissant une similarité forte et le seuil définissant un intervalle temporel grand. L'analyseur retourne un fichier listant les valeurs obtenues pour la similarité entre paires de séquences contiguës, l'intervalle de temps séparant ces séquences et l'ordre d'enregistrement de la séquence tel qu'il est reporté dans le fichier original fourni en entrée.

Nous avons fait le choix d'utiliser la « similarité cosinus » pour le calcul de la similarité entre séquences contiguës. La similarité entre deux séquences se base sur les coordonnées des outils de l'interface reportées dans ces séquences. Chaque séquence est représentée par un vecteur comportant les coordonnées de tous les outils de l'interface. Le résultat obtenu pour la fonction de similarité rend compte de l'importance du changement de position des outils d'une séquence à l'autre. Un déplacement important d'un outil de l'interface conduira à une similarité faible entre les séquences dans la mesure où ce déplacement marque l'écart entre les coordonnées des outils rapportées dans les séquences.

Formellement, la fonction de similarité calcule le produit scalaire de chaque paire de vecteurs de coordonnées contigus, c'est-à-dire, le produit de leur magnitude (ou longueur) et le cosinus de l'angle qu'ils forment. Ce produit est donné par la formule:

$$\mathrm{A} \cdot \mathrm{B} = ||\mathrm{A}||\,||B||\cos(\theta)$$

Dans l'équation ci-dessus, $||B||\cos(\theta)$ est la projection du vecteur B dans la direction du vecteur A, A et B étant de même longueur et non nuls.

Un produit scalaire de 0 signifie que A et B sont orthogonaux (l'angle qu'ils forment est de 90°) et leurs orientations sont différentes. Dans le cas où les vecteurs ont une même orientation, leur produit scalaire sera proche ou égal à 1, ce qui signifie que l'angle qu'ils forment est proche ou égal à 0. Cependant, utilisé dans un espace euclidien positif, ce qui est notre cas, le produit scalaire appartient à l'intervalle [0, 1].

Si nous résolvons l'équation du produit scalaire pour cos θ, nous obtenons la formule permettant de calculer le cosinus de l'angle formé par les deux vecteurs. Cette mesure exprime la proximité des orientations des deux vecteurs en se basant sur l'angle qu'ils forment et, par-là, le niveau de similarité des séquences qu'ils représentent. La formule de la similarité cosinus est la suivante:

$$\mathrm{sim}(A, B) = \cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{||A||\,||B||} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i \times B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} A_i^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n} B_i^2}}$$

La similarité cosinus est compris dans l'intervalle [0, 1], avec 1 représentant une parfait similarité entre les éléments des deux vecteurs et 0, une faible similarité entre eux.

La figure 9.6, montre les résultats obtenus pour le calcul de la similarité de paires de séquences contiguës d'une session de simulation de vertébroplastie. L'abscisse représente l'ordre dans lequel les séquences ont été enregistrées.

Nous pouvons remarquer que la grande majorité des résultats de similarité entre les paires de séquences contiguës de cette session est supérieure à 0,6. A l'inverse, d'autres paires, signalées par les points rouges sur le graphique, se démarquent avec des similarités plus faibles.

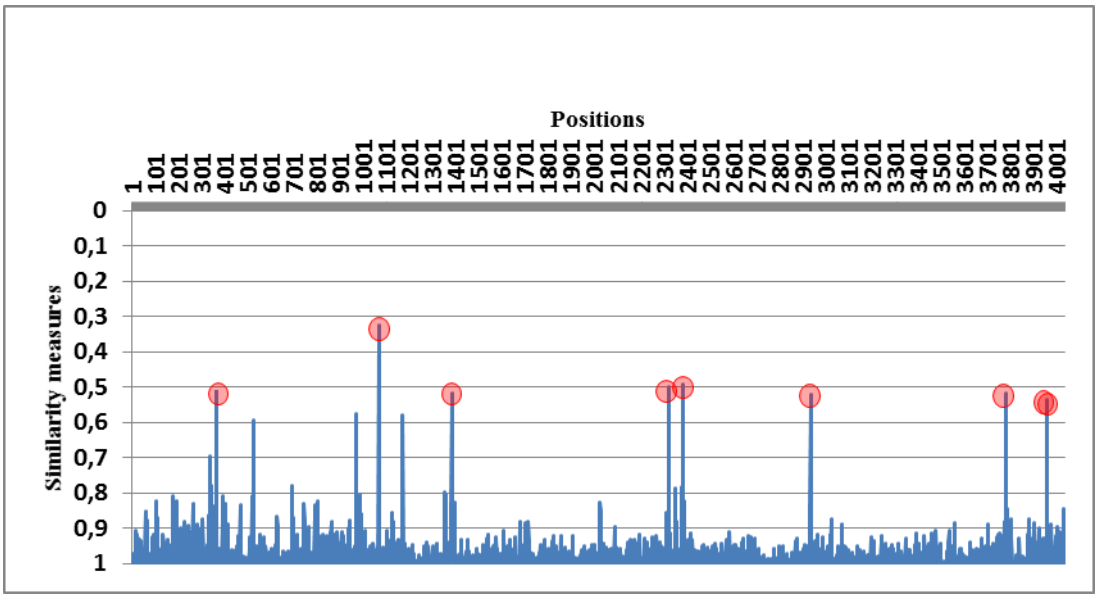



Figure 9.6. Résultats de la similarité cosinus pour les paires de séquences contigues d'une session de vertébroplastie.

Cependant, il apparaît très vite évident que la similarité seule ne permet pas de garantir la précision des détections. En effet, la frontière entre deux phases (soit le passage à une phase suivante ou un retour sur phase) sera marquée, selon notre hypothèse, par deux séquences ayant une faible similarité. Dans la même ligne d'idée, une séquence d'action corrective sera aussi marquée par une faible similarité avec celle qui la précède partant du fait que la correction d'une action en cours marque une rupture du continuum défini par les séquences précédentes.

Le même problème se pose pour ce qui a trait aux prises de recul pour l'analyse des actions exécutées ou, plus précisément, le recul pris par l'apprenant pour analyser ses actions et en vérifier les critères de validation. En effet, les séquences rapportant une prise de recul sont susceptibles d'être fortement similaires dans la mesure où cette interaction n'implique aucune exécution d'action ou de geste et donc, ne change pas l'état de la simulation. Or, tout couple de séquences contiguës ne définissant pas une modification ou une validation de phase, aura une forte similarité tout comme les prises de recul. De ce fait, la similarité seule ne peut pas constituer l'indice de détection que nous recherchons.

Nous proposons de prendre en compte l'intervalle temporel entre deux séquences contiguës comme paramètre complémentaire à la similarité entre ces séquences. Nous supposons que les

couples de séquences définissant une prise de recul seront marqués par une distance temporelle relativement grande (plus de 2 secondes). La distance temporelle entre les séquences contiguës deux à deux sera prise en compte comme paramètre complémentaire pouvant apporter plus de précision dans le processus de détection automatique des interactions significatives.

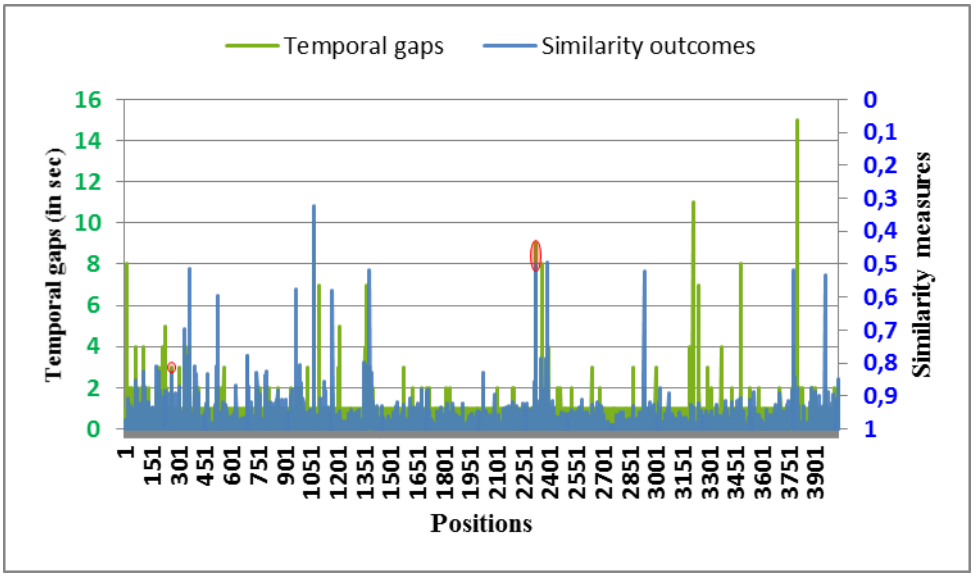



Figure 9.7. Superposition des résultats de similarité et des intervalles temporels des paires de séquences contiguës d'une session de simulation de vertébroplastie.

La figure 9.7 montre la superposition des valeurs obtenues pour la similarité et l'intervalle temporel entre chaque paire de séquences contiguës d'une session de simulation de vertébroplastie.

Sur la base de notre hypothèse, des paires de séquences telle que la 2324e (marquée en rouge), ayant une similarité de 0,49 et un intervalle temporel de 9 secondes sont susceptibles de marquer l'exécution d'une modification importante ou la reprise complète d'une action. De même, la paire 265 avec une similarité de 0,89 et un intervalle temporel de 3 secondes, est probablement une prise de recul liée par exemple à l'analyse visuelle d'une radio.

## 9.3.3. Expérimentation

### Protocole et données

Nous avons conduit une étude exploratoire sur cette proposition dans le but d'en évaluer l'intérêt pour la suite des traitements des traces. L'objectif est de s'assurer que l'automatisation du processus permet d'identifier les interactions pertinentes pour la définition du parcours emprunté par l'apprenant pour un problème dont la résolution s'effectue en plusieurs phases.

L'hypothèse de travail que nous évaluons dans cette expérimentation est la suivante :

*« La méthodologie proposée pour l'automatisation du processus d'extraction de parcours de résolution, permet de détecter avec précision les interactions significatives de l'apprenant. »*

Les traces exploitées ont été collectées à partir de cinq sessions de simulation de vertébroplastie exécutée sur TELEOS. Chaque session a été réalisée par un interne différent à l'hôpital

universitaire de Grenoble. En complément des traces enregistrées par le STI, chaque session a été enregistrée directement sur l'écran avec le logiciel de capture d'écran « Snaggit »[8].

Les traces ont ensuite été fournies à l'opérateur d'analyse de parcours de résolution qui produit pour chaque session le fichier listant les mesures de similarité et les intervalles temporels des paires de séquences contiguës. A partir de là, nous avons sélectionné un échantillon de séquences équivalant à trois minutes de simulation. Nous avons ensuite identifié le segment correspondant dans la vidéo enregistrée en se basant sur les premier et dernier timecodes des séquences de l'échantillon sélectionné.

Ensuite, nous avons listé, indépendamment de l'échantillon de séquences, toutes les interactions significatives et leur temps d'occurrence dans le fichier vidéo. Nous avons ensuite fait de même pour l'échantillon de séquences en listant toutes les paires de séquences appartenant à l'une ou l'autre de ces catégories :

- *Faible similarité et grand intervalle temporel (noté « FS/GT »)*
- *Faible similarité et petit intervalle temporel (noté « FS/PT »)*
- *Forte similarité et grand intervalle temporel (noté « S/GT »)*

Notre hypothèse de travail est que les paires de séquences avec une faible similarité et un grand intervalle temporel devraient représenter les corrections et reprises d'actions; les paires avec une faible similarité et un petit intervalle temporel, des changements de phase; et les paires avec une faible similarité et un grand intervalle temporel, les prises de recul pour la vérification des actions et des gestes.

Nous considérons comme fortement similaires des paires de séquences ayant une similarité supérieure à 0,8 et comme faiblement similaires, les paires de séquences dont la similarité est inférieure à 0,6. Un intervalle temporel de 2 secondes ou plus entre une paire de séquences est considéré comme grand (les séquences sont généralement séparées de quelques millisecondes). Ces seuils ont été déterminés de manière empirique à partir de l'observation des similarités et intervalles temporels moyens obtenus pour des séquences issues d'un ensemble aléatoire de sessions de simulation.

Les paires ayant des mesures de similarité et d'intervalles temporels en dehors de ces valeurs sont considérés comme négligeables dans le cadre de cette étude en ce sens qu'elles ne portent pas des interactions considérées significatives à intégrer au parcours de résolution.

Enfin, nous avons procédé à la comparaison des interactions listées à partir des vidéos avec la liste des interactions détectées automatiquement à partir des traces. L'objectif a été d'identifier les détections effectuées avec précision par l'opérateur ainsi que celles qui ont été manquées –soit les faux négatifs de la détection automatique– et celles qui sont erronées (soit les faux positifs de la détection automatique).

### Résultats

L'opérateur a détecté par la méthode automatique, 36 paires de séquences marquant une interaction significative toutes sessions et toutes catégories confondues. Le tableau 9.2 résume la distribution des séquences identifiées dans chaque catégorie et pour les échantillons issues de chacune des 5 sessions de simulation.

[8] http://www.techsmith.fr/snagit.html

Table 9.2. Distribution des paires de séquences identifiées automatiquement

| Sessions / Catégories | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
|---|---|---|---|---|---|
| FS/GT | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| FS/PT | 2 | 2 | 0 | 2 | 2 |
| S/GT | 5 | 2 | 9 | 6 | 3 |

Cependant, 47 interactions significatives ont été identifiées dans les vidéos. 30 de ces interactions ont été correctement détectées par l'opérateur. Par conséquent, l'opérateur n'a pas pu identifier 17 interactions significatives (faux négatifs) tout en rapportant 6 détections erronées (faux positifs).

Si l'on observe la répartition des détections pour chaque session, tel que détaillé dans le tableau 9.3, nous remarquons que l'opérateur a principalement produit des erreurs de détection sur les sessions 3 et 5. Pour la session 3, une validation de phase observée dans la vidéo n'a pas été détectée et les 2 validations de phase rapportées pour la session 5 sont des faux positifs. En effet, dans la vidéo de la session 3, on voit l'interne revenir à la phase de réglages et modifier la position et l'inclinaison du fluoroscope. Dans la session 5, l'interne est passé de la phase d'insertion du trocart à la phase repérage cutané et a redessiné l'axe transversal. Ces changements de phases n'ont pas été détectés, ni les modifications qui ont été exécutées au cours de ces retours sur phase.

Nous pensons que ces résultats sont la conséquence directe de notre hypothèse de travail. En effet, les seuils définis pour la catégorisation des mesures de similarité et des intervalles temporels ne conviennent pas à tous les profils d'apprenants.

De fait, les sessions 3 et 5 présentent globalement moins de paires de séquences faiblement similaires que les trois autres sessions. L'observation des différentes sessions révèle que les internes qui ont effectué ces sessions ont été plus hésitants que les autres dans leurs interactions, générant ainsi des flux de séquences plus homogènes même dans les cas de modifications/reprises d'actions et de changements de phase. Cela révèle la sensibilité des résultats de la similarité entre les séquences relativement à un facteur en particulier qui n'a pas été pris en compte dans cette étude préliminaire. Il s'agit du profil des sujets, plus spécifiquement de leur expérience ou de leur niveau de compétence. En effet, l'assurance (ou le manque d'assurance) de l'apprenant liée à ses compétences et expérience, est susceptible d'influencer le niveau de similarité des séquences contiguës qu'il génère au cours d'une simulation et des intervalles temporels entre ces séquences. En d'autres mots, un interne expérimenté exécutera des gestes moins hésitants qu'un débutant et prendra globalement moins de temps à passer d'un geste à l'autre. Ainsi, il génère à la fois des séquences dont les paires contiguës sont temporellement proches et les frontières plus nettes du point de vue de la similarité.

Tableau 9.3. Faux négatifs et faux positifs des détections automatiques d'interactions

| Détections / Sessions | Détections reportées | | | Détections manquées (faux négatifs) | | | Détections erronées (faux positifs) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *FS/GT* | *FS/PT* | *S/GT* | *FS/GT* | *FS/PT* | *S/GT* | *FS/GT* | *FS/PT* | *S/GT* |
| S1 | 2 | 0 | 5 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| S2 | 2 | 3 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| S3 | 0 | 0 | 9 | 1 | 4 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| S4 | 2 | 0 | 6 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| S5 | 2 | 0 | 3 | 1 | 2 | 0 | 2 | 0 | 1 |

Pour mesurer l'intérêt de l'automatisation de la détection des interactions significatives, nous avons calculé la précision, le rappel et le F-score associés aux résultats de l'opérateur détaillé dans le tableau 9.4.

La précision est le rapport du nombre de détections correctes rapportées sur le nombre total de détections. Le rappel est le rapport du nombre de détections correctes sur le nombre total de détections correctes existantes ; il peut être interprété comme la mesure de la sensibilité de la méthode de détection automatique. Le F-score est la moyenne harmonique pondérée de la précision et du rappel. C'est une mesure statistique qui évalue la méthode sur ses performances liées à la fois à la précision et au rappel. Nous avons, plus précisément, utilisé le F1-score qui pondère au même niveau la précision et le rappel. Cette pondération balancée est pertinente dans notre cas, car la précision et le rappel sont tout aussi importants pour la modélisation de l'activité de l'apprenant. En effet, nous voulons capturer les interactions de l'apprenant dans le but d'identifier son parcours de résolution d'un exercice donné. Le parcours de résolution est un modèle de l'activité de l'apprenant constituant une base d'analyse de l'apprentissage ; cette analyse serait biaisée autant pour un résultat imprécis (précision faible) qu'incomplet (rappel faible).

Tel qu'on peut le voir dans le tableau 9.4, la méthode automatique obtient globalement une précision et un rappel élevé (respectivement « 0,91 » et « 0,71 ») pour la détection des prises de recul (analyses visuelles des radios) pour toutes les sessions. Pour cette catégorie d'interactions, le F-score est de 0,83. De bonnes performances sont aussi rapportées pour la précision des détections de modifications ou reprises d'actions (1,0).

Cependant, le rappel des détections pour cette même catégorie est relativement faible (0,4). Ce résultat influence négativement le F-score des détections pour cette catégorie d'interactions, ramenant le résultat à 0,57.

Le F-score pour la détection des changements de phase est aussi faible (0,42) à cause des scores obtenus pour le rappel, négativement influencés par les détections manquées des changements de phase pour les sessions 3, 4 et 5 alors que la précision globale obtenue pour cette catégorie est de 0,6.

Tableau 9.4. Précision, rappel et F-score des détections automatiques d'interactions.

| Détections / Sessions | Précision | | | Rappel | | | $F_1$-score | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | FS/GT | FS/PT | S/GT | FS/GT | FS/PT | S/GT | FS/GT | FS/PT | S/GT |
| S1 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.67 | 0.00 | 0.83 | 0.80 | 0.00 | 0.91 |
| S2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.75 | 1.00 | 1.00 | 0.86 |
| S3 | 1.00 | 1.00 | 0.89 | 0.00 | 0.00 | 0.82 | 1.00 | 1.00 | 0.89 |
| S4 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 1.00 | 0.75 | 1.00 | 1.00 | 0.86 |
| S5 | 0.00 | 1.00 | 0.67 | 0.00 | 0.00 | 0.67 | 1.00 | 1.00 | 0.67 |
| Total | 0.60 | 1 | 0.91 | 0.33 | 0.40 | 0.76 | 0.42 | 0.57 | 0.83 |
| | 0.83 | | | 0.49 | | | 0.61 | | |

### 9.3.4. Bilan

La méthode présentée dans cette section pour l'automatisation de la détection d'interactions significatives constituant un parcours de résolution, a produit de bons résultats en ce qui concerne la précision des détections (83%). Par contre, les résultats obtenus pour le rappel des détections sont relativement faibles (49%). Cela constitue une limite importante dans notre cas dans la mesure où les faibles performances de la méthode pour le rappel des détections indiquent que beaucoup d'interactions significatives risquent d'être ignorées, induisant ainsi un biais dans le parcours de résolution de l'apprenant.

Les performances limitées de la méthode pour le rappel des détections, particulièrement pour les sessions 3 et 5, est une conséquence immédiate de notre hypothèse de travail sur le choix des seuils catégorisant le niveau des mesures de similarité et des intervalles temporels entre les paires de séquences contiguës.

Nous faisons l'hypothèse que la performance de la méthode automatisée dépend fortement de la capacité à identifier avec précision le profil de l'apprenant, et de la capacité à calibrer le choix des seuils de similarité et d'intervalle temporel sur cette base.

Cette hypothèse reste encore à explorer. Pour notre cas d'étude et la suite des expérimentations, nous nous sommes basées sur la définition manuelle des phases préalablement effectuée de manière à favoriser la justesse des autres types de traitements ciblés, à savoir, l'extraction de patterns de connaissances reflétant la nature perceptivo-gestuelle des interactions enregistrées.

Dans l'expérimentation présentée dans la section suivante, nous évaluons la capacité de notre proposition d'algorithme PhARules *(Phase-Aware sequential Rules mining algorithm)* à extraire des règles perceptivo-gestuelles prenant en compte l'importance des interactions effectuées au cours d'une simulation relativement aux phases spécifiques dans lesquelles elles ont été exécutées.

## 9.4. Evaluation de l'Extraction de Regles Orientees Phases de Resolution

### 9.4.1. Introduction

Dans les sections précédentes, nous avons présenté les évaluations conduites sur nos propositions dédiées à l'analyse de l'activité d'apprentissage en prenant en compte la nature multimodale des interactions effectuées par l'apprenant en situation d'apprentissage sur le STI. Dans cette section,

notre intérêt se porte sur la deuxième catégorie de traitements visée, à savoir, l'extraction de patterns fréquents à partir de la base de séquences perceptivo-gestuelles générées dans les phases précédentes du framework de traitement PeTRA.

Au niveau des opérateurs d'extraction, nous avons proposé un nouvel algorithme, PhARules, prenant en compte l'importance relative des interactions selon la phase de l'exercice dans laquelle elle a été effectuée. L'objectif est d'extraire des règles perceptivo-gestuelles prenant en compte les phases de résolution distinctes des sessions de simulation.

Nous avons émis l'hypothèse ***(H3)*** que ***« La prise en compte de l'hétérogénéité interne des traces par les algorithmes d'extraction de patterns fréquents, permet de mieux cerner l'activité de l'apprenant dans un contexte d'apprentissage »***.

Dans les sections qui vont suivre, nous présentons les évaluations conduites sur l'algorithme PhARules.

### 9.4.2. Mise en place de l'expérimentation

L'expérimentation sur l'extraction des règles perceptivo-gestuelles a été conduite sur deux volets sous-tendant deux questions de recherche. Le premier volet concerne l'évaluation des performances computationnelles de notre proposition d'algorithme PhARules pour l'extraction des règles perceptivo-gestuelles, et le second volet se préoccupe de l'évaluation de la pertinence des règles extraites.

Les questions que nous cherchons à répondre ici sont les suivantes :

> **QR5 :** *Les outils algorithmiques proposés pour l'extraction de patterns avec différenciation des phases obtiennent-ils des résultats plus précis que des algorithmes ne prenant pas en compte cette différentiation ?*
>
> **QR6 :** *Les résultats produits par les outils algorithmiques proposés, sont-ils intéressants et pertinents du point de vue des experts du domaine ?*

Nous détaillons les évaluations conduites dans les sections qui suivent.

### 9.4.3. Partie 1 : Evaluation des performances computationnelles de PhARules

#### Protocoles et données

Les traces utilisées pour cette expérimentation ont été collectées à partir de 9 sessions de simulation de vertébroplastie réalisées par 5 internes et 1 chirurgien expert du département Orthopédie et Traumatologie du Centre Hospitalier Universitaire de Grenoble. Les exercices de simulation proposés consistaient à traiter la 11e et ou la 12e vertèbre thoracique d'un patient dont la colonne ne présente aucune déformation. Pour cette première partie des expérimentations les données ont été regroupées dans un seul ensemble de données. Le tableau 9.5 résume les caractéristiques de ces données. Le symbole « # » fait référence à « nombre », « it » est une abréviation pour « item », « its » pour « itemset » et « seq » pour « séquence ».

Tableau 9.5. Caractéristiques des données collectées

| Nombre de Séquences | | | | #its | #it | #distincts it | Moy. #its/seq | Moy. #it/seq | Moy. #distinct it/seq |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Total | Phase 1 | Phase 2 | Phase 3 | | | | | | |
| 616 | 171 | 89 | 356 | 10 618 | 20 605 | 47 | 17.2 (σ=13) | 33.45 (σ=22.1) | 20.9 (σ=7.9) |

Tel qu'illustré par la figure 9.8 ci-dessous, les opérateurs de préparation et de transformation ont été appliqués sur les traces pour obtenir l'ensemble de séquences perceptivo-gestuelles à partir desquelles nous voulons extraire les règles perceptivo-gestuelles. Chaque item des séquences a été encodé sous forme d'entier naturel dans le but d'accélérer l'exécution de l'algorithme. Les règles extraites ont été ensuite soumises à l'opérateur de décodage pour la retranscription des items dans leur dénomination d'origine. Le répartiteur de phase n'a pas été utilisé, cette opération étant effectuée directement par PhARules.

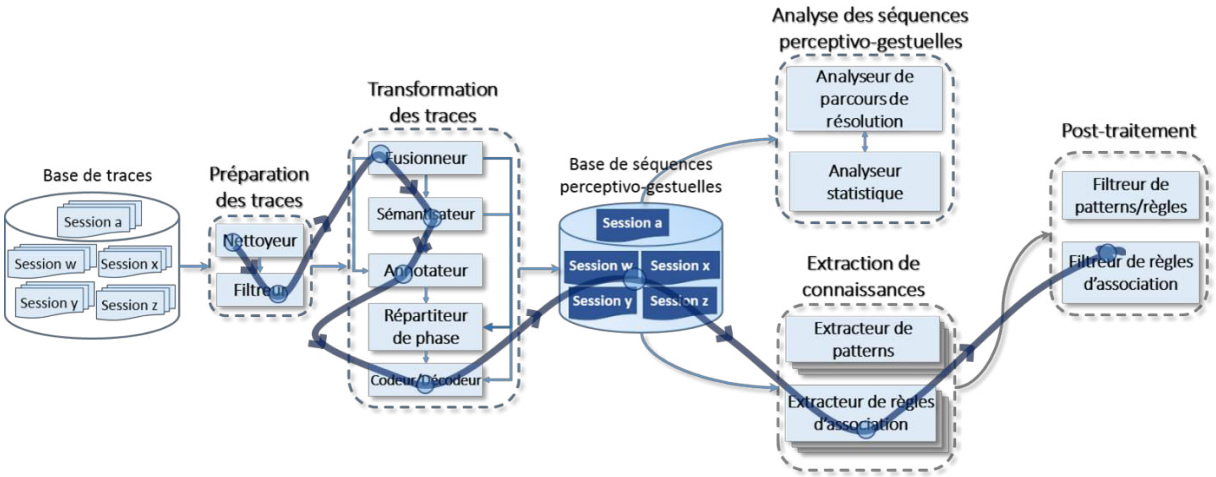



Figure 9.8. Les opérateurs impliqués dans l'expérimentation sur l'évaluation des performances computationnelles de PhARules

Nous voulons évaluer les performances computationnelles de PhARules comparativement à CMRules. Ce dernier est un algorithme d'extraction de règles séquentielles à partir duquel PhARules a été développé (voir section *« 8.5.1. L'algorithme CMRules »*). L'évaluation comparative est conduite sur trois paramètres : le temps d'exécution, la consommation mémoire et le nombre de règles extraites.

Les tests de performances ont été réalisés sur un ordinateur de marque *HP ZBook* avec un processeur *Intel® Core™ i7-4800MQ* de 4 cœurs avec une fréquence de base de 2,7 GHz, une fréquence turbo maximale de 3,7 GHz et 16 Go de mémoire vive.

Les algorithmes ont été exécutés pour une confiance minimum de 0,7 sélectionnée aléatoirement et plusieurs supports minimum allant, dans l'ordre décroissant, de 1 à 0,1. La variabilité du support minimum permet de tester les performances computationnelles des algorithmes pour plusieurs niveaux de la charge de travail d'extraction des règles. Plus le support minimum baisse, plus le processus d'extraction de règles est lourd.

### Résultats

La figure 9.9 résume les résultats des performances computationnelles de PhARules (en noir) et de CMRules (en bleu) en termes de consommation mémoire (*Figure 9.9.a*), de temps d'exécution (*Figure 9.9.b*) et de nombre de règles extraites (*Figure9.9. c*). Les graphes a) et b) retraçant respectivement le temps d'exécution et la consommation mémoire des algorithmes, montrent que CMRules a réalisé de meilleures performances pour ces paramètres, notamment pour les supports minimums *minSeqSup*=0,15 et *minSeqSup*=0,1. Cependant PhARules a maintenu un niveau plus stable de consommation mémoire pour les différents supports minimums supérieurs ou égaux à 0,15.

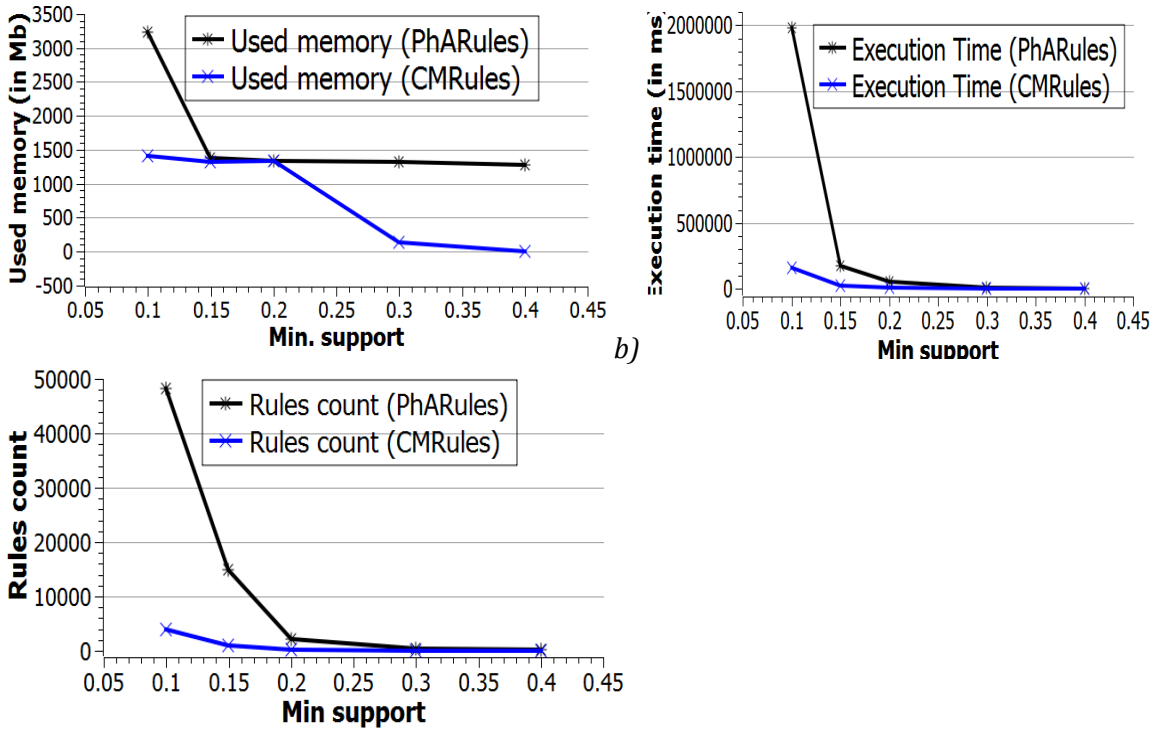



**Figure 9.9.** Résultats de l'évaluation comparative de PhARules et CMRules pour (a) la consommation mémoire ; (b) le temps d'exécution et (c) le nombre de règles extraites

Les règles extraites par CMRules intègrent exclusivement des interactions effectuées au cours de la troisième phase des sessions de simulation. Dans la mesure où toutes les phases d'un exercice sont importantes pour l'analyse de l'activité d'apprentissage et que le volume d'interactions exécutées au cours d'une phase ne détermine pas son niveau d'importance par rapport aux autres phases, la capacité à cibler les interactions d'une phase au cours de l'extraction est une fonctionnalité pertinente et essentielle. PhARules a obtenu, en ce sens, de meilleurs résultats. La figure 9.10 présente quelques exemples de règles extraites par PhARules. Le signe « > » marque la séquentialité des items. Par exemple, *x > y > z* signifie que l'occurrence de l'item *x* précède celle de l'item *y* qui, elle-même, précède celle de l'item *z*. Le signe « ; » marque la simultanéité ou l'absence de séquentialité entre les items. Par exemple *x ; y ; z* signifie que les occurrences de ces items sont simultanées ou encore que leur séquentialité n'est pas prise en compte. Le signe « => » marque la séparation entre les clauses *IF* et *THEN* de la règle. Par exemple, *x ; y => z* signifie qu'à chaque occurrence des items *x* et *y*, on observe une occurrence de l'item *z* (à hauteur d'un support et d'une confiance donnés). PhARules n'est pas restreint à l'extraction exclusive de règles perceptivo-gestuelles. Ces dernières peuvent être ciblées a postériori par les sélecteurs de

patterns du framework PeTRA qui offrent à l'analyste la possibilité de configurer la sélection des règles sur la base des items qu'elles contiennent.

1 : *Phase Réglages.* Visualisation radio de face
**=>** Prise de radio de face **>** visualisation panel réglages profil du fluoroscope
*Support: 0,5 ; Confiance: 0,8*

2 : *Phase Réglages.* Prise radio de face **>** Visualisation radio de face **>** Visualisation panel réglages du fluoroscope **>** Visualisation positionnement de la limite caudale du pédicule droit **>** Visualisation non définie
**=>** (Sur la radio de face) centrage de la vertèbre, correct
*Support: 0,3 ; Confiance: 0,5*

3 *: Phase Repérage cutané.* Fluoroscope en position « face », inclinaison craniale ; Prise de radio avec réglette **>** Visualisation processus épineux sur radio de face
**=>** Repère cutané transverse, correct ; repère cutané gauche, correct
*Support: 0,3 ; Confiance: 0,7*

4 *: Phase Repérage cutané.* Prise de radio avec réglette
**=>** Validation repère cutané droit
*Support: 0,75 ; Confiance: 1,0*

5 : *Phase Insertion.* Translation caudale du trocart **>** Visualisation limite antérieure du plateau de la vertèbre
**=>** Visualisation radio de face
*Support: 0,8 ; Confiance:1,0*

6 : *Phase Insertion*. Prise radio de face ; Fluoroscope en position « face », inclinaison caudale, inclinaison latérale droite **>** Visualisation radio de face **>** Visualisation panel réglages du fluoroscope
**=>** Inclinaison du trocart à l'entrée du corps vertébral, correct
*Support: 0,7 ; Confiance : 0,9*

Figure 9.10. Exemples de règles extraites par PhARules

Sur les graphes de la figure 9.11, on peut constater que PhARules a pu identifier des règles séquentielles pour chacune des phases d'une simulation de vertébroplastie, pour tous les supports minimums *minSeqSup* fournis. La confiance minimum, *minSeqConf* est de 0,7, soit la même confiance sélectionnée pour l'évaluation des performances computationnelles des deux algorithmes.

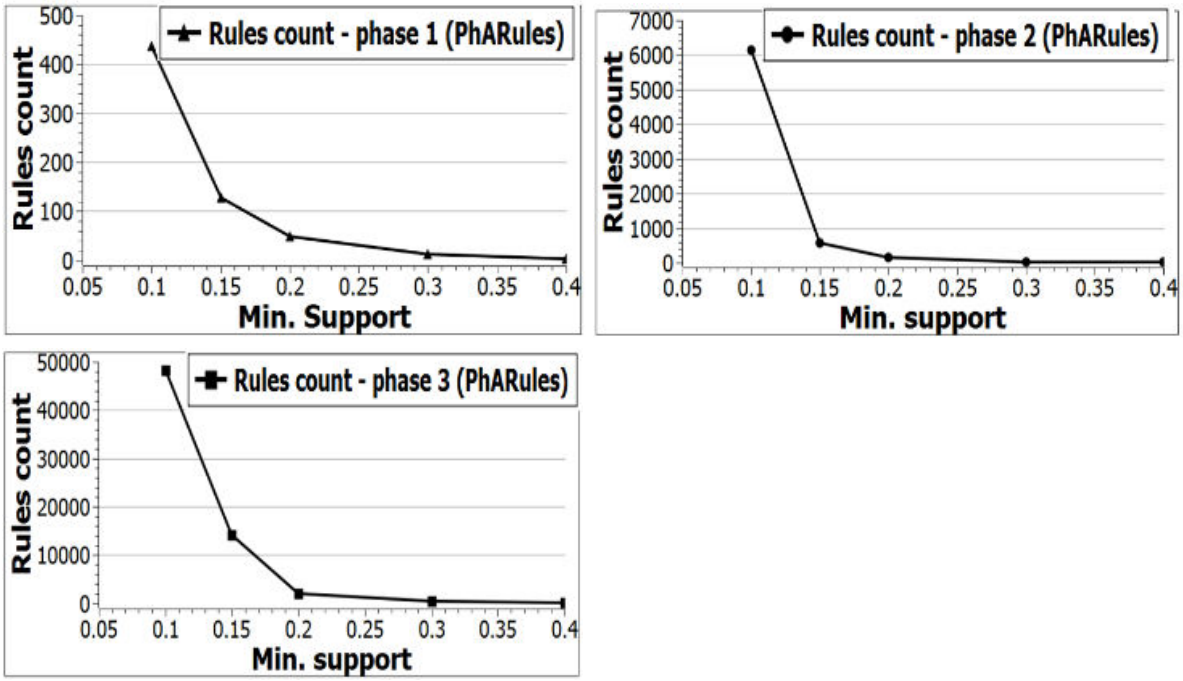



Figure 9.11. Règles séquentielles extraites par PhARules pour chaque phase d'une session de simulation pour différents supports minimums.

### Bilan

Cette expérimentation a démontré la capacité de notre proposition d'algorithme, PhARules, à extraire des règles séquentielles en prenant en compte l'importance des interactions qu'elles contiennent selon la phase dans laquelle elles ont été effectuées. Cependant, la fréquence d'une règle, même ciblée dans le contexte d'une phase, ne suffit pas à en confirmer l'intérêt. En effet, l'intérêt d'une règle se conçoit à deux niveaux. Il s'agit (1) de l'intérêt objectif déterminé par l'importance statistique de la règle (son support et sa confiance) et (2) l'intérêt subjectif de la règle déterminé par l'importance qu'elle revêt pour le domaine. Ce second point est évalué par les experts du domaine qui estiment l'intérêt d'une règle sur la base de plusieurs paramètres tels que son originalité ou sa réutilisabilité. Nous reviendrons sur ces paramètres plus loin. Cette évaluation est pertinente dans la mesure où l'intérêt objectif des règles n'est pas corrélé à leur intérêt subjectif. En d'autres mots, les règles ayant un support et une confiance élevés et donc intéressantes pour les algorithmes de fouille de données, ne sont pas forcément pertinentes du point de vue des experts du domaine. C'est le cas par exemples des règles très fréquentes dans un ensemble de données mais faisant ressortir des évidences.

De ce fait, nous avons évalué notre proposition sur la base de la pertinence des résultats produits, à savoir, la pertinence des règles extraites du point de vue des experts du domaine. Nous décrivons cette évaluation dans la section suivante.

### 9.4.4. Partie 2 : Evaluation de la pertinence des règles extraites

#### Protocole et données

Pour cette évaluation, nous faisons intervenir les opérateurs de post-traitement du framework PeTRA pour la sélection de règles perceptivo-gestuelles (voir section *« 7.5.2. L'opérateur de sélection de patterns »*). Les sélecteurs de patterns ont donc été paramétrés pour sélectionner des règles contenant au moins une action ponctuelle ou un geste et des interactions liées aux perceptions visuelles. Chaque règle sélectionnée doit aussi contenir des items sur l'état de la simulation et des variables de situation. Les modalités peuvent figurer indifféremment du côté « prédicat » (clause « IF ») ou du côté « conséquent » (clause « THEN ») de la règle.

*Phase Insertion*. Prise radio de face ; Fluoroscope en position « face », inclinaison caudale, inclinaison latérale droite **>** Visualisation radio de face **>** Visualisation panel réglages du fluoroscope
**=>** Inclinaison du trocart à l'entrée du corps vertébral, correct

Figure 9.12. Un exemple de règle perceptivo-gestuelle extraite par PhARules

Nous avons appliqué l'algorithme séparément sur les données de chacune des 9 sessions de simulation de vertébroplastie. Comme mentionné dans la section précédente, un support et une confiance élevés ne garantissent pas l'intérêt de la règle du point de vue des experts du domaine. De même, un support et une confiance faible ne suffit pas à établir une règle comme non pertinente. De ce fait, nous avons empiriquement sélectionné des seuils pour le support et la confiance suffisamment bas pour extraire des règles peu fréquentes et suffisamment élevés pour éviter d'extraire trop de règles évidentes ou tautologiques. Les seuils sélectionnés pour le support et la confiance sont respectivement de 0,3 et 0,7. Les règles extraites ont été au nombre de 188 803. Le sélecteur de règles a identifié 3895 règles perceptivo-gestuelles parmi celles-ci.

Nous avons sélectionné un échantillon aléatoire de 20 règles perceptivo-gestuelles que nous avons soumis à 5 chirurgiens experts en vertébroplastie dont 4 sont enseignants. Il leur a été demandé d'estimer chaque règle sur la base de 5 variables :

**L'intérêt pédagogique :** l'évaluation de cette variable vise à estimer la pertinence de l'information fournie par la règle d'un point de vue pédagogique ou didactique.

**La réutilisabilité :** cette variable estime l'intérêt d'exploiter une règle comme éléments de connaissances pouvant être intégrés dans le STI à des fins de productions de services tutoriels ciblant toutes les modalités des interactions perceptivo-gestuelles.

**L'originalité :** l'évaluation de cette variable sert à déterminer si les règles extraites apportent des informations significatives nouvelles sur les performances de l'apprenant ; en d'autres mots, des informations difficiles ou impossibles à saisir dans les conditions réelles d'enseignement en salle d'opération.

**La pertinence des perceptions visuelles :** cette variable sert à évaluer la complémentarité de l'information portée par les visualisations avec les actions et les gestes rapportés dans une règle.

**La pertinence des états de la simulation :** de même que pour les perceptions visuelles, l'objectif ici est d'estimer la pertinence de l'information portée par les items d'états de la simulation à une règle.

Ces variables devaient être évaluées par les experts par des scores sur une échelle allant de 1 à 5, 1 étant très faible et 5, très élevé.

Pour mesurer le niveau d'accord entre les experts, nous avons calculé la distance de Jaccard des scores attribués par chacun aux règles perceptivo-gestuelles et pour chacune des variables susmentionnées. La distance de Jaccard est une mesure statistique qui calcule la dissemblance entre des ensembles de données. La distance de Jaccard entre deux ensembles de données X et Y est donnée par la fonction $J_\delta(X, Y)$ tel que $J_\delta(X, Y) = 1 - J(X, Y)$ avec $J(X,Y)$ l'indice de Jaccard. $J(X, Y)$ est la taille de l'intersection entre X et Y divisée par la taille de leur union.

Formellement : $J(X,Y) = \frac{|X \cap Y|}{|X \cup Y|}$

Par conséquent : $J_\delta(X,Y) = \frac{|X \cup Y| - |X \cap Y|}{|X \cup Y|}$

Dans le cas des ensembles de scores assignés aux règles, la distance de Jaccard entre ces ensembles est interprétable comme le pourcentage de désaccord entre les experts deux-à-deux. En d'autres mots, elle permet de répondre à la question qui est de savoir jusqu'à quel point les experts assignent les mêmes scores aux mêmes règles.

### Résultats

**Scores des règles pour les variables étudiées.** La figure 9.13 résume le score moyen assigné par les 5 experts à chaque règle pour chacune des 5 variables étudiées. Le score global moyen des règles pour la variable « intérêt didactique » est de 3,8. La moyenne la plus faible observée est de 3/5 pour une règle (R9). Les scores moyens pour les 19 autres règles se situent entre 3,2 et 4,4 dont 12 avec un score moyen supérieur ou égal à la moyenne globale de 3,8. Cela révèle que les règles évaluées sont, du point de vue des experts, d'un intérêt élevé ou très élevé. On peut observer des scores globalement élevés pour les autres variables à l'exception de ceux attribués pour la variable « originalité ». Le score global moyen pour cette dernière est de 2,44. Le score le plus faible est de 1,8 pour une règle (R14). Le score le plus élevé est de 3,4 pour une règle (R6).

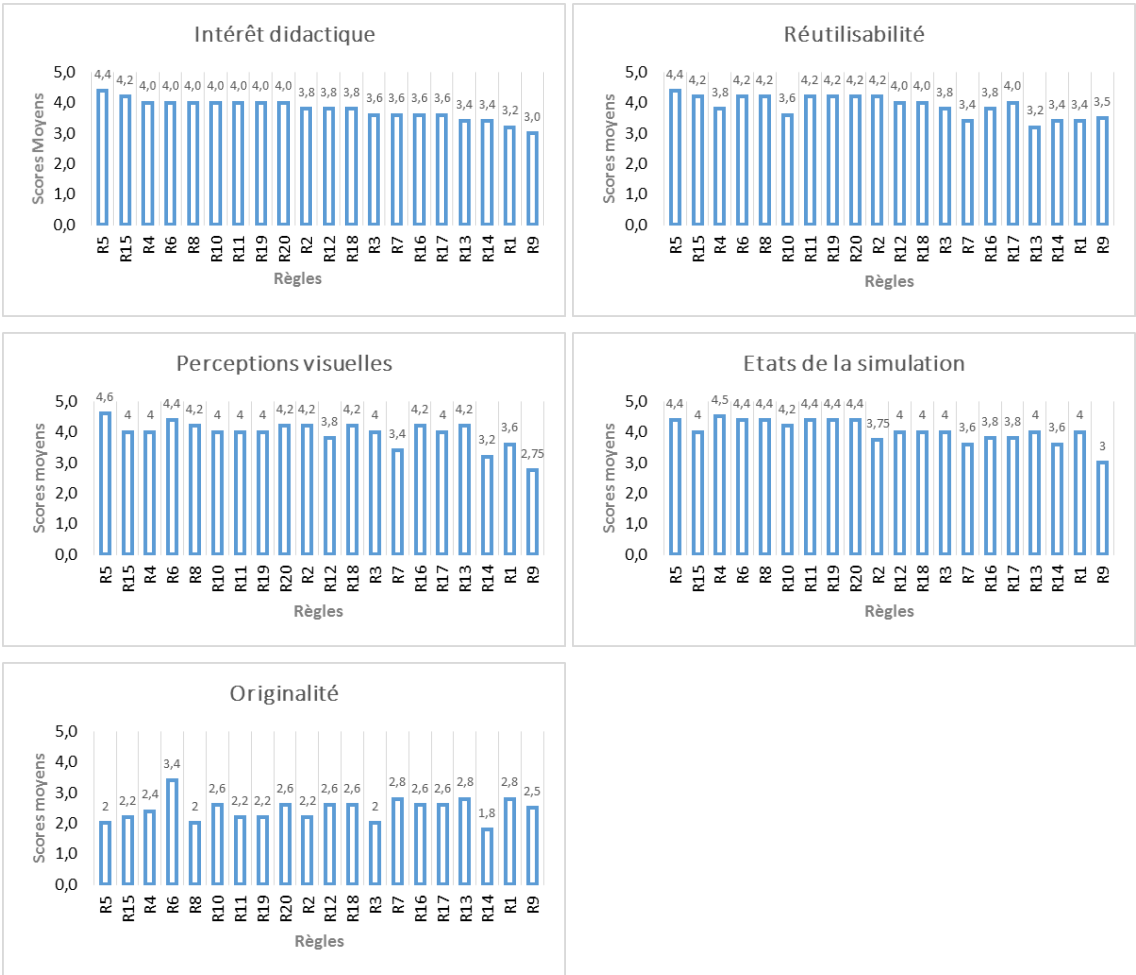


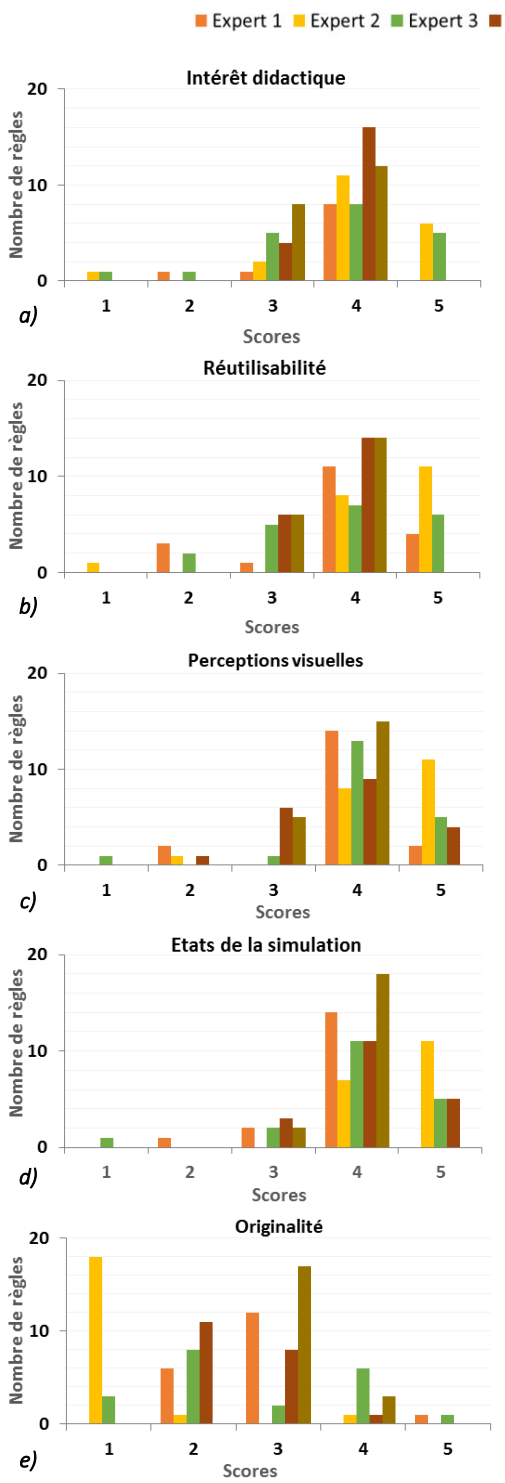

Figure 9.13. Scores moyens attribués aux règles perceptivo-gestuelles par les experts

**Accord inter-évaluateurs.** La figure 9.14 montre, pour les 5 variables étudiées, le nombre de règles assignées par chaque expert aux scores allant de 1 à 5 ainsi que la matrice des distances de Jaccard correspondante traduisant leur niveau d'accord deux-à-deux sur ces scores.

La distance de Jaccard calculée pour l'intérêt didactique, dénote un haut niveau d'accord entre les experts considérés deux-à-deux. En effet, la plus large distance observée est de 22% entre les scores des experts 3 et 5 (*Cf. Figure 9.14.a*). Ce pourcentage est aussi le niveau de désaccord le plus élevé enregistré, toutes variables confondues.

La même tendance est observée pour la réutilisabilité des règles, la pertinence des perceptions visuelles et la pertinence des états de la simulation qui y sont rapportés. Le niveau de désaccord des experts est très faible descendant jusqu'à 5% entre les experts 4 et 5 pour la pertinence des états de la simulation (*Cf. Figure 9.14.d*).

Au niveau de l'accord inter-évaluateur la variable « originalité » fait aussi exception. En effet, contrairement aux autres variables, le désaccord des experts, sur les scores évaluant l'originalité des règles, est relativement élevé. Il atteint jusqu'à 52% entre les experts 2 et 5 (*Cf. Figure 9.14.e*).




| | Expert 1 | Expert 2 | Expert 3 | Expert 4 | Expert 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Expert 1 | 0 | | | | |
| Expert 2 | .19 | 0 | | | |
| Expert 3 | .20 | .15 | 0 | | |
| Expert 4 | .13 | .10 | .15 | 0 | |
| Expert 5 | .15 | .20 | **.22** | .14 | 0 |

| | Expert 1 | Expert 2 | Expert 3 | Expert 4 | Expert 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Expert 1 | 0 | | | | |
| Expert 2 | .16 | 0 | | | |
| Expert 3 | **.21** | .18 | 0 | | |
| Expert 4 | .16 | .13 | .19 | 0 | |
| Expert 5 | .16 | .13 | .16 | .10 | 0 |

| | Expert 1 | Expert 2 | Expert 3 | Expert 4 | Expert 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Expert 1 | 0 | | | | |
| Expert 2 | .11 | 0 | | | |
| Expert 3 | .12 | .12 | 0 | | |
| Expert 4 | .14 | .14 | .15 | 0 | |
| Expert 5 | .13 | .15 | .13 | **.19** | 0 |

| | Expert 1 | Expert 2 | Expert 3 | Expert 4 | Expert 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Expert 1 | 0 | | | | |
| Expert 2 | .07 | 0 | | | |
| Expert 3 | .13 | .08 | 0 | | |
| Expert 4 | **.15** | .09 | .12 | 0 | |
| Expert 5 | .08 | .07 | .11 | .05 | 0 |

| | Expert 1 | Expert 2 | Expert 3 | Expert 4 | Expert 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Expert 1 | 0 | | | | |
| Expert 2 | .44 | 0 | | | |
| Expert 3 | .35 | .42 | 0 | | |
| Expert 4 | .33 | .38 | .41 | 0 | |
| Expert 5 | .24 | **.52** | .44 | .34 | 0 |

Figure 9.14. Distribution des règles selon les scores pour chaque expert et la matrice des distances de Jaccard inter-évaluateurs pour les 5 variables étudiées : (a) intérêt didactique ; (b) réutilisabilité ; (c) pertinence des états de la simulation ; (d) pertinence des perceptions visuelles ; (e) originalité.

**Classement global des règles.** Pour aller plus loin dans notre analyse des évaluations des règles par les experts, nous voulons trouver le moyen de les distinguer sur la base des scores obtenus pour l'ensemble des variables étudiées. Nous considérons tout d'abord le classement des règles selon leur score moyen global tous évaluateurs et toutes variables confondues. Pour mesurer l'influence des variables étudiées sur ce score moyen global, nous avons calculé la corrélation de ce dernier avec chacune des variables. Les mesures obtenues sont présentés dans le tableau 9.6.

Tableau 9.6. Coefficients de corrélation entre chacune des 5 variables étudiées et le score global moyen des règles

| | Intérêt didactique | Réutilisabilité | Originalité | Visualisations | Etats de la simulation |
|---|---|---|---|---|---|
| Score global moyen | 0,86 | 0,76 | 0,18 | 0,9 | 0,86 |

Les résultats rapportés dans le tableau ci-dessus révèlent une corrélation forte entre les variables étudiées et le score global moyen des règles, à l'exception de la variable originalité. En effet, la corrélation entre les scores assignés aux règles par les experts pour cette variable et les scores moyens globaux des règles est de 0,18. En d'autres mots, les faibles scores liés à cette variable ont une influence très limitée sur le classement global des règles. Ce résultat est illustré dans la figure 9.15 ci-dessous présentant le classement des règles selon leurs scores moyens globaux (a) incluant toutes les variables et (b) sans la variable « originalité ».

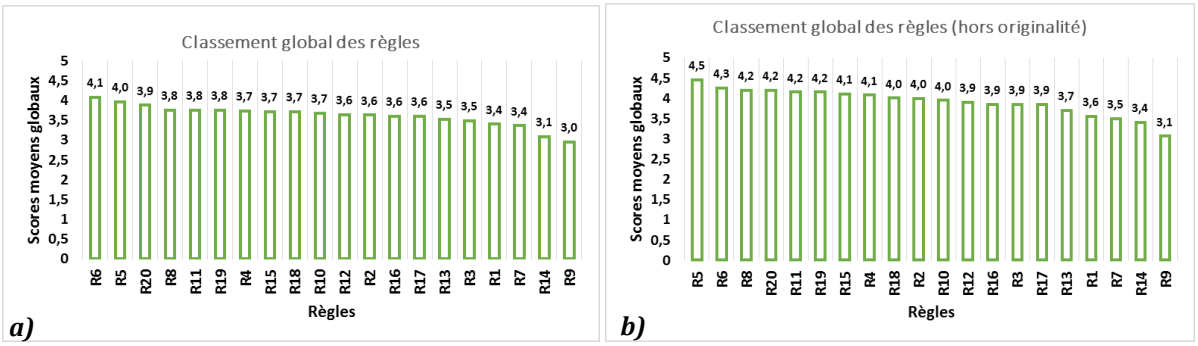



Figure 9.15. Classement des règles par score moyen global (a) tous évaluateurs et toutes variables confondus et (b) tous évaluateurs et toutes variables confondus hormis la variable « originalité ».

La figure 9.15 présente le classement global des règles (a) incluant les scores de la variable « originalité » et (b) sans les scores relatifs à cette variable. Considérons la moyenne globale des règles dans les deux cas, soit 3,6 avec les scores relatifs à l'originalité (cas 1) et 3,9 sans les scores relatifs à l'originalité (cas 2). Les règles peuvent être divisées en deux grandes catégories : celles dont le score est supérieur à la moyenne globale et celles dont le score est inférieur ou égal à la moyenne globale.

Les classements des règles selon ces deux catégories et dans les deux cas mentionnés (avec et sans la variable « originalité ») sont présentés dans le tableau 9.7.

Tableau 9.7. Classements des règles en deux catégories relativement au score global moyen

Cas 1. Scores incluant la variable *« originalité »*

| *Catégorie : Scores > à la moyenne globale (3,6)* | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rang | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Règle | R6 | R5 | R20 | R8 | R11 | R19 | R4 | R15 | R18 | R10 |
| Score | 4,1 | 4 | 3,9 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,7 | 3,7 | 3,7 | 3,7 |
| *Catégorie : Scores ≥ à la moyenne globale (3,6)* | | | | | | | | | | |
| Rang | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Règle | R12 | R2 | R16 | R17 | R13 | R3 | R1 | R7 | R14 | R9 |
| Score | 3,6 | 3,6 | 3,6 | 3,6 | 3,5 | 3,5 | 3,4 | 3,4 | 3,1 | 3 |

Cas 2. Scores excluant la variable *« originalité »*

| *Catégorie : Scores > à la moyenne globale (3,9)* | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rang | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Règle | R5 | R6 | R8 | R20 | R11 | R19 | R15 | R4 | R18 | R2 | R10 |
| Score | 4,5 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 4,1 | 4 | 4 | 4 |
| *Catégorie : Scores ≥ à la moyenne globale (3,9)* | | | | | | | | | | | |
| Rang | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | | |
| Règle | R12 | R16 | R3 | R17 | R13 | R1 | R7 | R14 | R9 | | |
| Score | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 3,7 | 3,6 | 3,5 | 3,4 | 3,1 | | |

Les deux catégories de règles subissent très peu de changements entre les cas 1 et 2. La suppression de la variable « originalité » a en effet une influence très limitée sur le classement des règles dans les deux catégories à l'exception de la règle R2 dont le score moyen dépasse la moyenne globale lorsque la variable « originalité » est écartée.

**Analyse des règles.** A partir du classement présenté dans la section précédente, nous voulons identifier les caractéristiques communes aux règles les mieux notées et les moins bien notées par les experts chirurgiens. L'objectif est de pouvoir exploiter ces caractéristiques comme des critères de paramétrage de la sélectivité de notre algorithme d'extraction de règles perceptivo-gestuelles. Les figures 9.16 et 9.17 présentent, à titre d'exemple, les 3 règles les mieux classées et les 3 règles les moins bien classées suivant le classement global sur la base des scores moyens. Pour chaque exemple, les informations sur les supports et confiances ainsi que les scores pour les 5 variables évaluées par les experts, sont aussi reportées.

R6

*Phase de repérages cutanés.* Visualisation modèle 3D du patient **>** Visualisation panel de réglages profil du fluoroscope **>** Prise radio avec réglette **>** Visualisation épineuse de la vertèbre ciblée

**=>** *(Sur la radio de face)* trait cutané droit, correct ; trait cutané gauche, incorrect ; trait cutané transversal, incorrect.

***Intérêt didactique :*** *4;* ***Réutilisabilité :*** *4,2;* ***Originalité :*** *3,4;* ***Pertinence visualisations :*** *4,4;* ***Pertinence états de la simulation :*** *4,4.*

R5

*Phase de repérages cutanés.* Fluoroscope en position « face », inclinaison crâniale ; Prise radio avec réglette **>** Visualisation radio.

**=>** *(Sur la radio de face)* trait cutané transversal, correct ; trait cutané gauche, correct.

***Intérêt didactique :*** *4,4;* ***Réutilisabilité :*** *4,4;* ***Originalité :*** *2;* ***Pertinence visualisations :*** *4,6;* ***Pertinence états de la simulation :*** *4,4.*

R20

*Phase d'insertion.* Déplacement trocart axe antéro→postérieur **>** Visualisation trocart sur modèle 3D du patient **>** Visualisation radio de face.

**=>** Visualisation panel de réglages du fluoroscope ; *(Sur la radio de face)* point d'entrée cutané sur axe longitudinal à l'aplomb de l'épineuse, incorrect ; point de contact osseux sur processus transverse et facette de l'arc interneural, incorrect ; point de contact osseux sur processus transverse incorrect.

***Intérêt didactique :*** *4;* ***Réutilisabilité :*** *4,2;* ***Originalité :*** *2,6;* ***Pertinence visualisations :*** *4,2;* ***Pertinence états de la simulation :*** *4,4.*

Figure 9.16. Les trois règles les mieux classées par les experts chirurgiens toutes variables confondues

En analysant les règles ainsi différenciées, l'un des points communs observables entre les mieux classées est leur concision. En effet, les règles les mieux notées sont en général concises en considérant le nombre d'items composant leurs clauses IF et THEN.

Cependant, quoique la plupart des règles les moins bien classées soient plus verbeuses que les autres, quelques-unes d'entre elles sont aussi concises. Cela nous a conduits à considérer la nature des items qu'elles contiennent. A ce niveau, la caractéristique commune entre les meilleures règles et qui ne se retrouve pas dans les règles concises de l'autre catégorie, est la précision des visualisations. En effet, celles-ci se rapportent plus à des points d'intérêt qu'à des zones d'intérêt moins précises. La combinaison de ces deux caractéristiques marque une distinction nette entre les deux catégories de règles. Cependant, si cette analyse nous permet de dire que cette combinaison de caractéristique est nécessaire, nous ne pouvons pas être sûrs qu'elle est suffisante.

R7

*Phase de repérages cutanés.* Fluoroscope en position « face », inclinaison latérale gauche ; Prise radio avec la réglette > Visualisation du modèle 3D du patient **>** Visualisation radio de face **>** Visualisation panel réglages profil du fluoroscope

**=>** *(Sur la radio de face)* trait cutané droit, correct ; trait cutané transversal, incorrect.

***Intérêt didactique :*** *3,6;* ***Réutilisabilité :*** *3,4;* ***Originalité :*** *2,8;* ***Pertinence visualisations :*** *3,4;* ***Pertinence états de la simulation :*** *3,6.*

R14

*Phase d'insertion*. Déplacement trocart axe postéro→antérieur **>** Prise radio de face **>** Visualisation positionnement du trocart sur radio de face ; Trocart non inséré dans la vertèbre.

=> *(Sur la radio de face)* Inclinaison trocart à l'entrée cutanée, correcte ; Point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule, incorrect ; Point final de l'insertion sur la ligne transverse dans l'axe longitudinal au niveau de l'épineuse, incorrect ; Point d'entrée pédiculaire du trocart, correct ; Point de sortie pédiculaire dans le plan transverse, incorrect ; Point d'entrée cutané sur l'axe longitudinal à l'aplomb de l'épineuse, incorrect.

***Intérêt didactique :*** *3,4;* ***Réutilisabilité :*** *3,4;* ***Originalité :*** *1,8 ;* ***Pertinence visualisations :*** *3,2* ***; Pertinence états de la simulation :*** *3,6.*

R9

*Phase d'insertion.* Déplacement trocart axe postéro→antérieur ET axe céphalo→caudal **>** Visualisation dernière radio de face prise **>** Visualisation panel réglages du fluoroscope **>** Visualisation non définie

=> (Sur la radio de face) Point de contact osseux entre le processus transverse et la facette de l'arc interneural, incorrect ; Point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule, correct ; Point d'entrée pédiculaire du trocart, correct ; Point de sortie pédiculaire dans le plan transverse, incorrect.

***Intérêt didactique :*** *3;* ***Réutilisabilité :*** *3,5;* ***Originalité :*** *2,5;* ***Pertinence visualisations :*** *2,75;* ***Pertinence états de la simulation :*** *3.*

Figure 9.17. Les trois règles les moins bien classées par les experts chirurgiens toutes variables confondues

### Bilan

Nous avons présenté dans cette section la seconde partie des expérimentations conduites sur les règles perceptivo-gestuelles extraites par notre proposition d'algorithme PhARules. Ce volet des expérimentations visait à mesurer la pertinence des règles extraites en les soumettant à l'évaluation d'experts chirurgiens sur 5 variables différentes : l'intérêt didactique de l'information portée par une règle, sa réutilisabilité dans le STI, l'originalité de l'information, la pertinence des informations relatives aux perceptions visuelles et aux états de la simulation qu'elle comporte. Les scores assignés sont en général élevés pour quatre de ces variables avec une forte ressemblance entre les évaluations des différents experts. La variable originalité fait exception dans la mesure où les scores sont au mieux moyens et éloignés d'un expert à l'autre. Ces scores n'influencent cependant pas le classement global des règles tous évaluateurs et toutes variables confondus. Nous avons donc poursuivi des analyses plus poussées sur la structure des règles de manière à extraire les caractéristiques communes aux règles les mieux classées dans l'objectif d'améliorer les résultats produits par notre algorithme.

## 9.5. GENERICITE DU MODELE DE REPRESENTATION ET DU FRAMEWORK DE TRAITEMENTS

Le modèle proposé pour la représentation des séquences perceptivo-gestuelles est facile à mettre en œuvre pour la génération de séquences intégrant des interactions multimodales. Cependant, la séquentialité des items appartenant aux différentes modalités peut varier d'un domaine à l'autre. Il est donc nécessaire d'effectuer un travail de réflexion sur l'ordre séquentiel pertinent des items multimodaux selon le domaine d'application. Il s'agit, à ce niveau, de décider de la place des perceptions dans les connaissances du domaine. Sont-elles principalement exploitées à des fins de contrôle, d'exploration ? Existe-t-il des procédures du domaine les plaçant systématiquement avant les actions ou les gestes ? Si plusieurs types de perceptions entrent en jeux dans les connaissances du domaine, il est important aussi de déterminer leurs rôles respectifs. Certaines perceptions sont-elles généralement utilisées à des fins de contrôle ou d'exploration ?

Ces questionnements sont quelques exemples d'éléments de réflexion sur la démarche de réflexion à conduire pour décider de la configuration à donner aux séquences perceptivo-gestuelles. Une fois la configuration séquentielle des items choisie, l'application des opérateurs du framework pour leur implémentation est relativement aisée. En effet, les opérateurs de notre framework sont implémentés dans l'optique de prendre en charge différents types de configurations séquentielles des items quant à la fusion et l'enrichissement des séquences.

De même notre algorithme d'extraction de règles perceptivo-gestuelles peut être appliqué sur des données indépendamment du domaine. Pour cela, il faut lui fournir une description pertinente des phases, tel que nous le décrivons dans le chapitre 8 du manuscrit.

Nous présentons dans le chapitre suivant une preuve de concept de la généricité de nos propositions en les mettant à l'épreuve sur des données multimodales issues d'une plateforme de simulation de pilotage d'avions légers monomoteurs.

## 9.6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté dans ce chapitre les expérimentations conduites sur les propositions formulées dans le cadre de nos recherches. Les contributions apportées consistent en un modèle de représentation de séquences d'interactions multimodales. Plus précisément, le modèle a été proposé pour la représentation de séquences d'interactions perceptivo-gestuelles mises en jeu dans les STI. Ces contributions consistent également en un framework intégrant des outils logiciels dédiés au traitement de ce type de séquences. Enfin, elles comportent un outil algorithmique adressant la problématique d'extraction de patterns de connaissances à partir de traces d'exercices dont la résolution implique plusieurs phases.

Nous avons démontré à travers les expérimentations conduites qu'il était possible d'étudier le comportement de l'apprenant sur la base des différentes modalités de ses interactions. Nous avons ainsi démontré la possibilité de générer des séquences perceptivo-gestuelles cohérentes à partir de traces multi-sources et hétérogènes de notre cas d'étude, TELEOS. Enfin, nous avons démontré la capacité de notre proposition d'algorithme à extraire des règles séquentielles, reflétant la nature multimodale des interactions, qui soient pertinentes du point de vue des experts du domaine.

Les analyses effectuées sont cependant comportementales. La perspective immédiate est d'apporter un gain en précision du diagnostic épistémique des connaissances de l'apprenant en prenant en compte les différentes facettes de ces connaissances.

Une autre perspective est de faciliter la modélisation d'interactions multimodales cohérentes, avec les interactions mises en jeu, dans l'environnement d'apprentissage.

Il est aussi important d'envisager la définition de critères de sélection pertinents des règles perceptivo-gestuelles extraites dans la mesure où celles-ci constituent la matière première des services tutoriels mentionnés précédemment. Pour ce faire, nous envisageons de soumettre les règles extraites par notre algorithme à un plus grand panel d'experts du domaine. Nous devons aussi souligner que, dans ce travail, nous avons exploité seulement le support et la confiance d'une règle comme mesure de leur intérêt objectif. Il existe d'autres mesures statistiques telles que le lift, la couverture *(« coverage »)*, la conviction, l'influence *(« leverage »)*, pouvant être envisagées dans le but d'améliorer la sélection des règles à extraire [Weiß, 2008].

Enfin, il convient de vérifier dans quelle mesure ces propositions peuvent s'appliquer à d'autres domaines. Nous avons conduit une expérimentation dans le but de fournir la preuve de concept de la généricité de ces propositions. Le cas d'étude exploité est l'aviation. Nous décrivons en détail la mise en place de l'étude et les évaluations conduites dans le chapitre suivant.

## SYNTHESE DES EXPERIMENTATIONS

- Evaluation du modèle de représentation proposé pour les séquences perceptivo-gestuelles enrichies en analysant la possibilité de faire le lien entre les performances de l'apprenant et ses erreurs rapportées par les séquences ainsi représentées.
- Evaluation de l'implémentation du modèle avec les opérateurs de PeTRA, notre proposition de framework.
- Evaluation préliminaire d'une proposition d'automatisation de la modélisation de l'activité de l'apprenant à partir de ses traces d'activités.
- Evaluations des performances de PhARules, notre proposition d'algorithme.
- Evaluation de la pertinence des résultats produits par PhARules du point de vue des experts du domaine.

# CHAPITRE 10.

# GENERICITE DU MODELE DE REPRESENTATION ET DU FRAMEWORK DE TRAITEMENT DE TRACES

*Dans ce chapitre, nous décrivons les expérimentations conduites pour évaluer la possibilité d'adapter les propositions formulées et présentées dans les chapitres 6, 7 et 8, sur des données relatives à un domaine autre que la chirurgie orthopédique, le cas d'étude de la thèse. L'objectif est d'apporter la preuve de concept de la généricité de ces propositions.*

## Sommaire

**10.1. Introduction** ..... **171**
**10.2. Le Domaine d'Application : l'Aviation** ..... **171**
10.2.1. L'enseignement dans le domaine ..... 171
10.2.2. Le caractère multimodal des connaissances du domaine ..... 172
**10.3. Le Simulateur PILOTE 2** ..... **173**
10.3.1. L'environnement de simulation ..... 173
10.3.2. Architecture du système ..... 175
10.3.3. Description des traces ..... 175
**10.4. Intégration de Services Tutoriels dans le Simulateur PILOTE 2** ..... **177**
10.4.1. Exercice de référence pour les simulations de pilotage ..... 177
10.4.2. Compétences ciblées dans le cadre de l'expérimentation ..... 178
10.4.3. Création des variables de situation ..... 178
**10.5. Evaluations** ..... **180**
10.5.1. Introduction ..... 180
10.5.2. Collecte des données ..... 180
10.5.3. Traitement des traces de simulations de vol ..... 181
10.5.4. Discussion ..... 183
**10.6. Conclusion** ..... **186**
**Synthèse** ..... **186**

## 10.1. INTRODUCTION

L'expérimentation présentée dans les sections suivantes a pour but d'évaluer la possibilité d'appliquer avec succès nos propositions à des domaines autres que notre cas d'étude et sur des traces enregistrées à partir d'autres STI.

L'hypothèse ***(H4)*** que nous cherchons à évaluer stipule que ***« Les contributions de cette recherche sont applicables à des domaines et environnements d'apprentissage autres que le cas d'étude autour duquel elles ont été développées »***.

Spécifiquement, il s'agit d'évaluer pour un autre domaine que la chirurgie orthopédique percutanée et des traces issues d'un autre STI que TELEOS, nos différentes propositions. Notre question de recherche est la suivante :

> **QR7 :** *Quelle est la généricité du modèle de représentation, du framework et de l'algorithme proposés ?*

Le domaine d'application choisie est l'aviation, un domaine impliquant des connaissances perceptivo-gestuelles, ainsi que des connaissances procédurales et empiriques. L'environnement d'apprentissage utilisé est le simulateur PILOTE 2. Nous ferons plus loin une description détaillée du domaine quant à la nature perceptivo-gestuelle des connaissances qu'il implique et la pratique de l'enseignement du domaine ainsi qu'une présentation du simulateur PILOTE 2. Nous détaillerons ensuite les modifications apportées au simulateur dans une démarche d'enrichissement de ses fonctionnalités par des services tutoriels. Enfin, nous décrivons le processus de traitements des traces par les outils de notre framework et les résultats produits.

## 10.2. LE DOMAINE D'APPLICATION : L'AVIATION

### 10.2.1. L'enseignement dans le domaine

Au-delà de la simple manipulation d'un avion, le pilotage implique de gérer un appareil dans un environnement complexe et dynamique. L'enseignement du domaine vise à inculquer aux apprenants le bagage de connaissances et de compétences nécessaires pour le faire en toute sécurité. Cela passe par l'entrainement régulier sur des simulateurs pleine échelle permettant de scénariser diverses situations de prise en main de l'appareil.

Les situations de formation sont regroupées sous trois grandes catégories [Larrieu, 2008]:

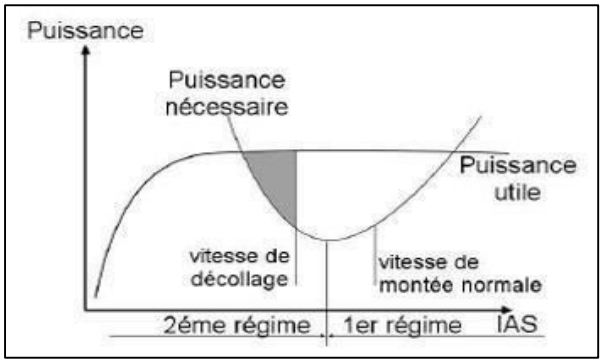
- Les situations simples faisant intervenir des stimuli visant à produire des réactions immédiates, sans ambiguïté
- Les situations compliquées impliquant une combinaison de problèmes simples mais nombreux.
- Les situations complexes pour lesquelles il n'existe pas de réponse simple ou immédiate au moment où elles interviennent.

Pour des raisons pratiques d'exploitation des simulateurs, les situations complexes sont généralement les plus privilégiées dans la formation pratique des pilotes. Elles font intervenir les connaissances décisionnelles et gestuelles liées à l'application des procédures, les connaissances déclaratives étant considérées comme acquises et assimilées.

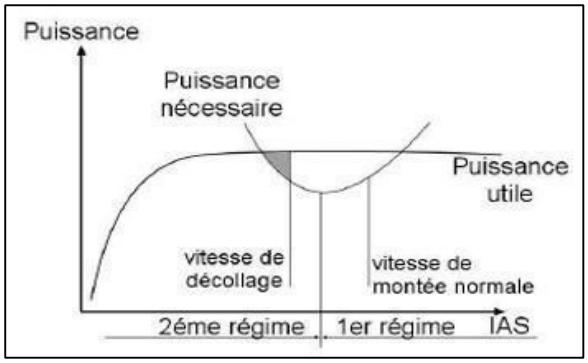
Cela constitue un vide entre la formation théorique et pratique des pilotes [Mulgund *et al.* 1995; Remolina *et al.* 2004; Larrieu *et al.* 2005]. En effet, les connaissances déclaratives liées aux concepts appliqués dans l'exécution des procédures ne sont pas révisées au cours des entraînements. Au fil des simulations, les automatismes liés à l'application des procédures se développent au détriment des connaissances déclaratives qui sous-tendent ces procédures. Par exemple, la figure 10.1 illustre des concepts théoriques liés au décollage d'un avion avec un « excédent de puissance » et la procédure de décollage qui sera appliquée en situation réelle ou sur un simulateur. Ces connaissances théoriques vont progressivement faire place à l'application automatique des procédures à un certain niveau de répétition des tâches.

Concepts théoriques

*Avion avec un excédent de puissance important*




*Avion avec un excédent de puissance faible*




Procédure appliquée

- Mettre plein gaz avec les freins maintenus puis les lâcher.
- Vérifier la puissance moteur (2600 tour/min disponible).
- Garder l'axe de piste (alignement) jusqu'à ce que la vitesse soit d'environ 55 nœuds avec un cran de volet.
- Lever le nez de l'avion et stabiliser la vitesse à 70 nœuds.
- Maintenir cette vitesse tout le long de la montée.
- Une fois à 300 pieds au-dessus du sol, rentrer le cran de volet.
- La vitesse de montée doit être de 80 nœuds.

**Figure 10.1.** Décollage d'avion : concepts théoriques VS procédure

### 10.2.2. Le caractère multimodal des connaissances du domaine

Les connaissances déclaratives en aviation se réfèrent aux concepts explicatifs liés aux procédures de manipulation de l'appareil. La vitesse nécessaire pour le décollage de l'appareil en considérant son poids, la longueur de la piste et une altitude déterminée à atteindre au plus vite, en est un exemple. Les connaissances procédurales sont une combinaison des connaissances décisionnelles et gestuelles. Ces connaissances font références aux processus cognitifs liés à la prise de décision se basant sur l'état de l'appareil et de l'état du monde (l'environnement de l'appareil) ainsi qu'aux habiletés motrices nécessaires à la manipulation de l'interface de guidage (volant, manche).

La prise d'information liée à l'état de l'appareil et à son environnement est hautement perceptuelle. Il s'agit d'une manière générale des analyses visuelles des indicateurs du tableau de bord et de la prise d'information sur l'environnement autour de l'appareil ; de manière plus poussée, dans le cas du pilotage aux instruments, l'activité requiert des connaissances spécifiques

sur la lecture des indicateurs pour la prise de décision lorsque la visibilité de l'environnement est réduite ou inexistante dans le cas de dégradations météorologiques.

Ces connaissances sont empiriques et souvent tacites. La mise en évidence des processus cognitifs motivant certaines décisions doit souvent passer par la verbalisation [Larrieu *et al.* 2005]. En contexte de formation, deux approches sont utilisées : l'approche de performance qui cible l'accomplissement d'une tâche donnée et l'approche de compétence qui cible les aptitudes en exigeant du pilote une explication déclarative de ses décisions.

Nous détaillons dans la section suivante la méthodologie utilisée pour capter différentes modalités des interactions et des connaissances qu'elles sous-tendent à partir de la plateforme PILOTE 2, utilisée dans le cadre de cette étude.

## 10.3. Le Simulateur PILOTE 2

### 10.3.1. L'environnement de simulation

L'environnement de simulation de la plateforme PILOTE 2 reproduit le cockpit d'un avion de tourisme de type Cessna 172. Les commandes de vols sont simulées par des dispositifs physiques, les instruments du tableau de bord sont représentés virtuellement sur un écran, et la vue extérieure de l'appareil est reproduite sur trois écrans en affichage combiné (*Cf. Figure 10.2*). Le logiciel de simulation utilisé est *Flight Simulator X Edition Professionnelle* de Microsoft.

Figure 10.2. L'environnement de simulation de la plateforme PILOTE 2

L'écran affichant les instruments du tableau de bord est un oculomètre permettant de déterminer les moments où le regard du pilote se porte sur ces instruments et ainsi d'en déduire les prises d'information du pilote sur l'état de l'appareil tout au long de la simulation. Des outils de

monitoring permettent de suivre l'évolution de la session sur des ordinateurs distincts de l'environnement de simulation. Parmi ceux-ci, l'outil de monitoring des visualisations du pilote permet d'identifier le comportement perceptuel du pilote vis-à-vis des instruments du tableau de bord (*Cf. Figure 10.3*).

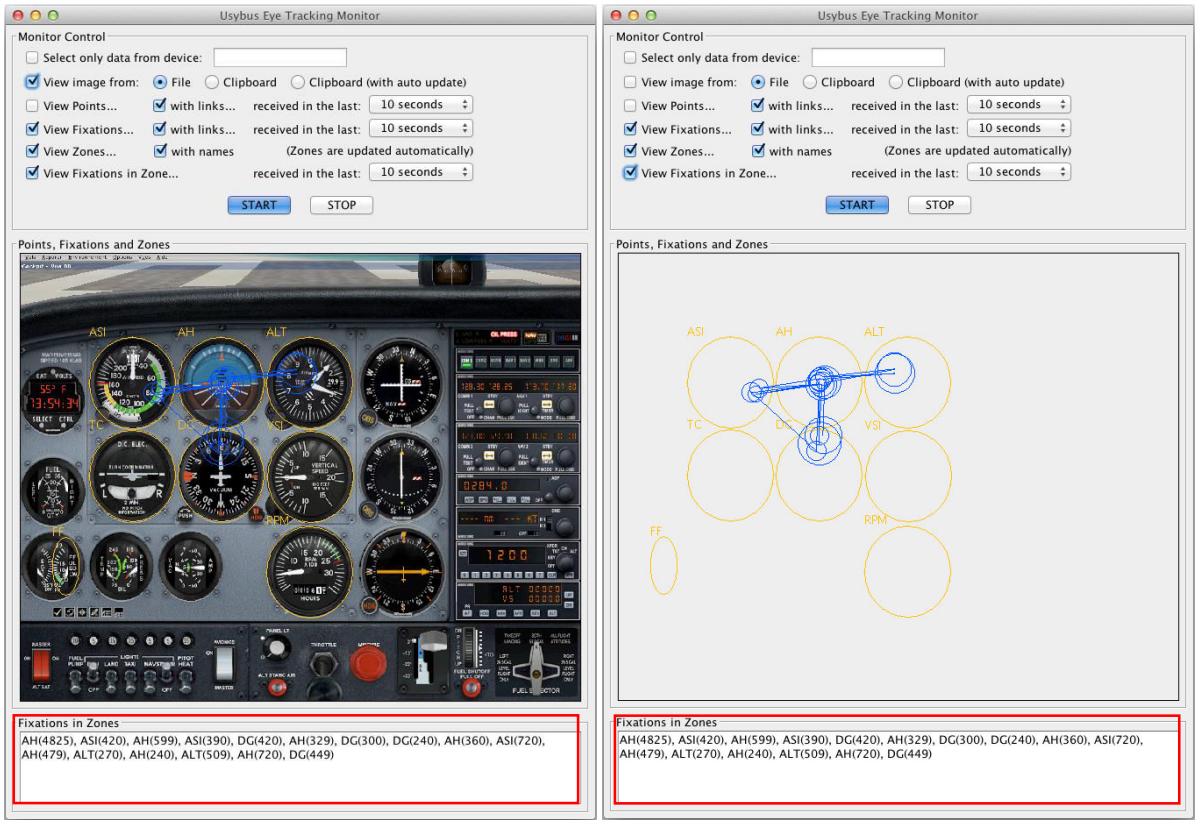



Figure 10.3. Monitoring des visualisations du pilote en temps réel

Sur la figure ci-dessus, on peut observer les positions du regard du pilote : à gauche, l'image du tableau de bord est reproduite afin de faciliter l'identification des différents instruments ; à droite, seuls les contours des instruments analysés sont affichés. Chaque visualisation d'un instrument par le pilote est reportée de manière synthétique (acronyme de l'instrument et durée de lecture en milliseconde) au bas de l'écran de monitoring (*Cf. Figure 10.3 – partie* encadrée en rouge).

Comparées à notre principal cas d'étude, TELEOS, les zones d'intérêt du simulateur de vol sont moins complexes. Dans PILOTE 2, les zones d'intérêt sont les instruments du tableau de bord. Ces zones sont fixes et peu nombreuses comparativement aux différentes parties d'une vertèbre et de l'interface de simulation à prendre en compte dans TELEOS. Pour rappel, l'affichage des zones et points d'intérêt des vertèbres dans TELEOS changent selon l'angle d'affichage des radios prises (voir section *« 5.4. Les perceptions visuelles »*).

Les zones d'intérêt considérées dans PILOTE 2 sont les instruments suivants :

- *ASI (Air Speed Indicator) : Vitesse de l'avion par rapport à l'air*
- *AH (Artificial Horizon) : Horizon artificiel, indique l'assiette et l'inclinaison de l'avion*
- *ALT (ALTitude) : Altitude*
- *TC (Turn Coordinator) : Indicateur de virage et de symétrie de la trajectoire de l'avion*
- *DG (Directional Gyro) : Conservateur de cap, indique le cap suivi par l'avion*
- *VSI (Vertical Speed Indicator) : Vitesse verticale de l'avion*

- *RPM (Round Per Minute) : Vitesse de rotation du moteur, permet d'en déduire la puissance fournie*
- *FF (Fuel Flow) : quantité de carburant consommée par le moteur*

### 10.3.2. Architecture du système

La plateforme PILOTE 2 est structurée comme un ensemble d'agents logiciels pouvant être situés sur des ordinateurs distincts et dont la communication entre agents est assurée par un bus de données. Deux agents, le simulateur de vol et l'oculomètre, fournissent l'essentiel des données brutes sur l'activité du pilote et l'état de la simulation. Deux autres agents sont chargés d'analyser les données de perception et d'en fournir une représentation symbolique. Un agent s'intéresse à reconnaître la phase de vol courante dans le tour de piste (*Cf.* Figure 10.8.). Un autre agent est chargé d'identifier la bonne exécution de procédures. Enfin, l'ensemble de ces données est utilisé pour l'analyse des connaissances. Cette architecture est illustrée dans la figure 10.4.

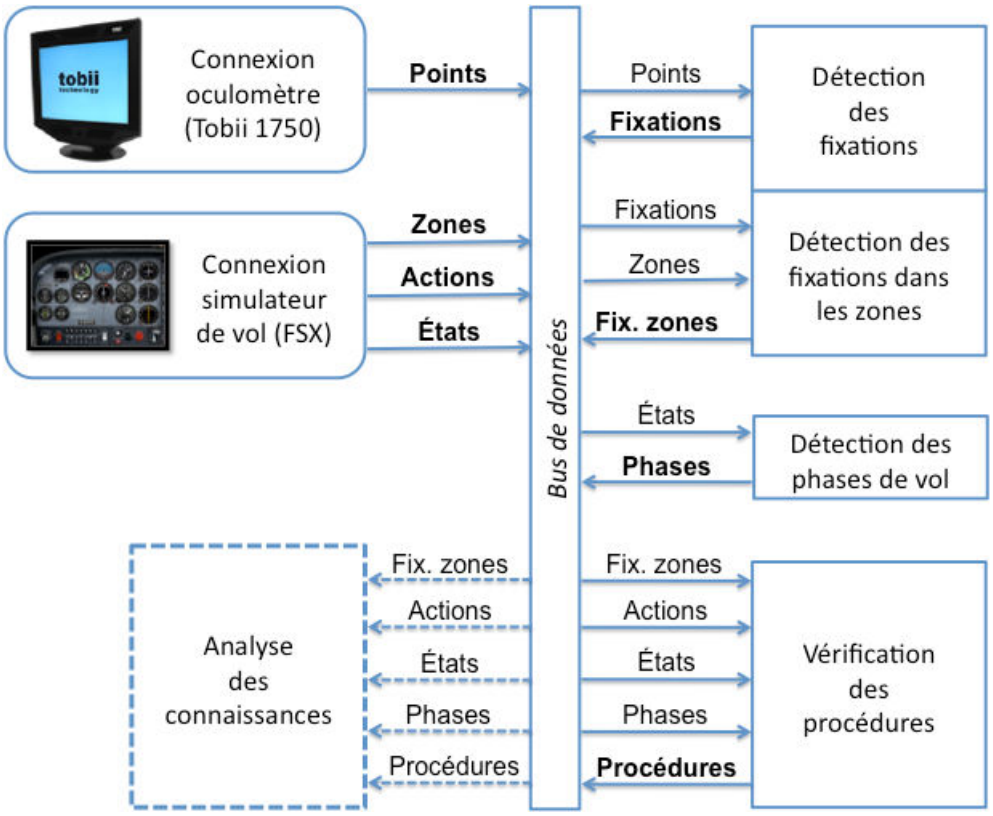



Figure 10.4. Architecture de la plateforme de simulation PILOTE 2

### 10.3.3. Description des traces

Les messages transmis par un agent sur le bus de données sont identifiées par les autres agents selon leur type et leur origine. Le type caractérise le contenu du message (ex. : *« type:fixinzone »* pour désigner les messages relatifs aux fixations dans des zones de l'interface de simulation envoyées par l'oculomètre). L'origine précise l'agent émetteur du message. Les agents pouvant émettre des messages simultanément, cette précision permet d'éviter aux agents récepteurs la confusion entre les messages qu'ils ciblent. Ces informations d'identification sont comprises dans l'entête des messages. Le corps des messages contient les informations structurées dans diverses variables selon son type du message ou l'agent émetteur. La figure 10.5 illustre la représentation conceptuelle d'un message.

```
UsybusMsg: type=type_des_donnees (: sous-type_des_données)*;
from=application_émettrice( ;data=données)*
```

Figure 10.5. Représentation conceptuelle d'un message sur le bus de données de PILOTE 2

Le caractère *« ; »* est le séparateur des principaux paramètres du message. *Type* indique le type du message qui peut être suivi de plusieurs sous-types séparés par le caractère *« : »*. *From* précise l'origine du message, c'est-à-dire, l'agent du bus de données qui l'a émis. *Data* précise le contenu du message.

```
Event
UsybusMsg: type=fsx:event | from=FlightSimConnect@binoclar | tc=1432027519987 |
name=ELEV_TRIM_UP | device=simulator

Variables
UsybusMsg: type=fsx:variables | from=FlightSimConnect@binoclar | FLAPS HANDLE
INDEX=0 | GENERAL ENG FUEL PUMP SWITCH:1=0 | RUDDER POSITION=0 | GENERAL ENG
THROTTLE LEVER POSITION:1=96 | data=controls | GENERAL ENG MIXTURE LEVER
POSITION:1=99 | GENERAL ENG PROPELLER LEVER POSITION:1=99 | tc=1426523947953 |
ELEVATOR POSITION=0 | BRAKE RIGHT POSITION=0 | FLAPS NUM HANDLE POSITIONS=3 |
BRAKE LEFT POSITION=0 | device=simulator | AILERON POSITION=0 | RECIP ENG LEFT
MAGNETO:1=0 | RECIP ENG RIGHT MAGNETO:1=0 | ENG ANTI ICE:1=0

UsybusMsg: type=fsx:variables | from=FlightSimConnect@binoclar | STALL WARNING=0
| data=dashboard | VERTICAL SPEED=0 | HEADING INDICATOR=89 | ATTITUDE INDICATOR
BANK DEGREES=28 | AIRSPEED INDICATED=0 | tc=1426523947953 | TURN COORDINATOR
BALL=0 | TURN INDICATOR RATE=0 | MAGNETIC COMPASS=89 | device=simulator | ENG
FUEL FLOW GPH:1=0 | ATTITUDE INDICATOR PITCH DEGREES=-19 | GENERAL ENG RPM:1=0 |
INDICATED ALTITUDE=1305
```

Figure 10.6. Exemples de traces brutes envoyées par l'interface de simulation de PILOTE 2

Selon qu'une action a été exécutée par le pilote ou qu'il s'agit d'information sur l'état de la simulation, le contenu des traces envoyées par l'interface est différent. Cette différence est illustrée dans la figure 10.6. Si une action a été exécutée, le message est de type *« event »* et contient le timecode de l'exécution de l'action, le nom de l'agent émetteur, le périphérique hébergeant l'agent et le nom de l'action exécutée. S'il s'agit de l'état de la simulation, le message est de type *« variables »* et peut contenir deux types de données différentes *: « controls »* ou *« dashboard »*. Les données de type *« controls »* contiennent l'état courant de toutes les commandes de l'avion (manette des volets, manette des gaz, etc.). Le type *« dashboard »* fait état des informations affichées par tous les indicateurs du tableau de bord (ex : vitesse, altitude, etc.).

Cependant, en raison de certains bugs liés au logiciel de simulation, les actions exécutées à partir de l'interface n'ont pas été prises en compte dans les traces enregistrées. Les actions devront de ce fait être déduites par l'opérateur de sémantisation de notre framework à partir des changements des états de la simulation.

Les données envoyées par l'oculomètre sont captés sous la forme du message illustré dans la figure 10.7.

```
UsybusMsg: type=eyetracking:fixinzone | from=EyeTrackingAnalyzer@hydre |
duration=269 | tc=1432029792954 | name=VSI | device=simulator
```

Figure 10.7. Exemple de traces brutes envoyées par l'oculomètre

Cet agent récupère les informations de visualisation lorsque celles-ci sont portées sur des zones d'intérêt de l'interface de simulation. Le message capté rapporte le timecode de la visualisation, le nom du dispositif oculométrique, le nom de la zone d'intérêt visualisée et la durée de la visualisation.

## 10.4. Integration de Services Tutoriels dans le Simulateur PILOTE 2

La plateforme PILOTE 2 ne disposant pas de services tutoriels automatisés dans sa version d'origine, nous avons progressivement intégré des modules didactiques dans le système. Le premier travail réalisé en ce sens consistait à (1) modéliser les instructions relatives à l'application des procédures de vol pour un tour de piste ; (2) modéliser les variables de situation qui permettront d'évaluer les performances de l'apprenti pilote. Dans la suite, nous décrivons ce en quoi consiste un tour de piste, puis nous décrivons les compétences ciblées au cours de cette activité.

### 10.4.1. Exercice de référence pour les simulations de pilotage

Le tour de piste est l'exercice de référence choisi pour l'entrainement au pilotage d'un avion dans la plateforme PILOTE 2. Tel qu'illustré dans la figure 10.8, cet exercice est un vol simplifié consistant à faire décoller l'appareil d'une piste et à le reposer sur la même piste après l'enchainement d'une suite de phases constituant un circuit autour de la piste.

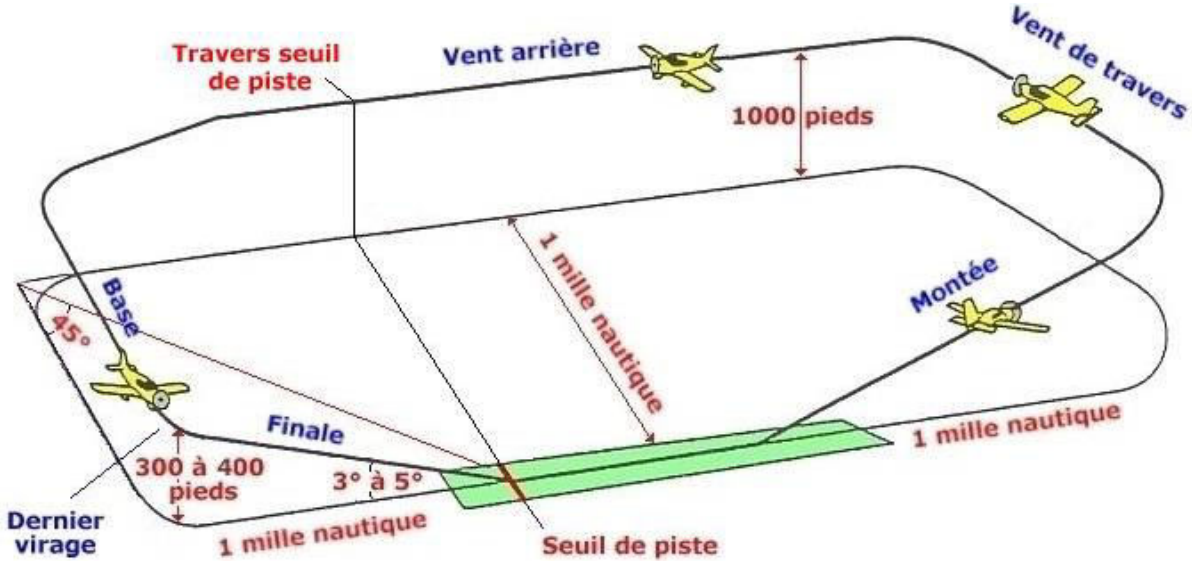



Figure 10.8. L'exercice du tour de piste en aviation

On peut distinguer les cinq principales phases de vol. Il s'agit, dans l'ordre, de la montée initiale, le vent traversier, le vent arrière, la base et l'approche finale. Nous avons considéré en plus les phases d'alignement et d'accélération de l'appareil sur la piste juste avant le décollage (rotation jusqu'au passage des 15m) ainsi que l'atterrissage (passage des 15m jusqu'à l'arrondi) et la décélération de l'avion sur la piste juste après l'approche finale. Ces phases complémentaires font intervenir des procédures spécifiques que nous voulons évaluer.

La difficulté de l'exercice peut être accrue en y ajoutant des perturbateurs liés au fonctionnement de l'appareil (ex. : panne d'un instrument, panne électrique, etc.), à l'environnement de l'appareil (ex. : météo réduisant la visibilité, vent traversier fort, longueur limitée de la piste, etc.) ou encore en exigeant des manœuvres spécifiques. Ces manœuvres peuvent consister par exemple à effectuer une *« remise de gaz »* au cours de l'atterrissage, c'est-à-dire à remettre l'avion en vol juste avant de toucher la piste; à effectuer un *« touché »*, consistant à passer directement de la phase de décélération à celle d'accélération ; ou à effectuer une procédure anti-bruit exigeant une trajectoire spécifique.

### 10.4.2. Compétences ciblées dans le cadre de l'expérimentation

Cette section présente les principales compétences ciblées au cours d'une session de simulation par le biais des variables de situations que ce soit dans le cas d'un tour de piste normal ou d'un tour de piste avec perturbateurs.

#### Respect des vitesses

Cette compétence est évaluée en comparant la vitesse appliquée à la vitesse attendue ou conseillée au cours d'une phase de vol. Les principales situations impliquant une vitesse attendue bien définie sont la rotation au moment du décollage, la montée initiale, la rentrée et la sortie des volets et l'approche finale juste avant l'atterrissage.

#### Respect des altitudes

Comme dans le cas précédent, il s'agit de vérifier l'altitude maintenue par le pilote dans différentes situations en comparaison à l'altitude attendue ou conseillée dans chacune de ces situations. L'altitude attendue est définie d'une manière générale sur l'ensemble du tour de piste mais le respect de la procédure est plus particulièrement critique lors de la rentrée et de la sortie des volets (et de la coupure de la pompe électrique sur certains types d'avions).

#### Respect des configurations de l'appareil

La configuration de l'appareil implique principalement l'état des volets tout au long du vol. Le pilote doit être capable de mettre en place et de maintenir au besoin les configurations désignées pour chacune des phases de vol. Cette configuration est particulièrement jugée au cours du décollage, de la préparation à l'atterrissage et à de l'atterrissage.

#### Lecture des instruments

Cet élément cible les contrôles visuels à effectuer tout au long du vol par le pilote. Les instruments à visualiser varient d'une situation à l'autre ou encore d'une phase à l'autre. Ces contrôles visuels, de préférence réguliers, sont cruciaux pour assurer la configuration de l'appareil et le respect des procédures.

### 10.4.3. Création des variables de situation

L'élève pilote est évalué autant sur les actions effectuées influençant l'état des outils de l'environnement de simulation que sur son comportement lié aux perceptions visuelles. Chaque variable de situation précise la phase qu'elle cible, l'outil de l'environnement de simulation dont l'état est évalué, et la valeur de l'évaluation. Les outils ciblés par les variables de situation ainsi que le nombre de variables de situation, varient d'une phase à l'autre. Il en va de même des

contrôles visuels : les zones d'intérêt à visualiser ainsi que leur nombre ne sont pas uniformes d'une phase à l'autre.

**Tableau 10.1.** Variables de situation du simulateur pilote selon les phases de vol

| Phase | Contrôles | Contrôles visuels | Variables de situation |
|---|---|---|---|
| ACCELERATION<br>*(ACCELERATION)* | **Volets** = 1<br>**Vitesse** ≤ 55<br>**Gaz** = *TOGA* | ASI<br>RPM | `ACC_volets-[valeur]`<br>`ACC_vitesse-[valeur]`<br>`ACC_gaz-[valeur]`<br>`ACC_ctrl-[valeur]` |
| MONTEE INITIALE<br>*(UPWIND)* | **Volets**=0 OU **Volets**=1<br>SI **Hauteur** ≤ 300 ALORS **Volets**=1<br>**Vitesse** ≥ 70 ET **Vitesse** ≤ 80<br>**Gaz** = TOGA TANTQUE **Hauteur** ≤ 1000<br>**Hauteur** ≤ 1000<br>**Vz** ≥ 0 TANTQUE **Hauteur** ≤ 1000 | ASI<br>ALT | `UPW_volets-[valeur]`<br>`UPW_vitesse-[valeur]`<br>`UPW_hauteur-[valeur]`<br>`UPW_vz-[valeur]`<br>`UPW_ctrl-[valeur]` |
| ÉTAPE DE BASE<br>*(BASE)* | **Volets**=1<br>**Hauteur** ≥ 500 ET **Hauteur** ≤ 1000 *(hauteur min non impérative)*<br>**Vz** ≥ -3 ET **Vz** ≤ 0 | ASI<br>ALT<br>VSI<br>DG | `BAS_volets-[valeur]`<br>`BAS_hauteur-[valeur]`<br>`BAS_vz-[valeur]`<br>`BAS_ctrl-[valeur]` |
| APPROCHE FINALE<br>*(FINAL)* | **Volets** > 0<br>**Vitesse** ≥ 60 ET **Vitesse** ≤ 70<br>**Hauteur** ≤ 500 *(hauteur max non impérative)*<br>**Vz** ≥ -3 ET **Vz** ≤ 0 | ASI | `FIN_volets-[valeur]`<br>`FIN_vitesse-[valeur]`<br>`FIN_hauteur-[valeur]`<br>`FIN_vz-[valeur]`<br>`FIN_ctrl-[valeur]` |
| ATTERRISSAGE<br>*(LANDING)* | **Volets**=2 OU **Volets**=3<br>**Vitesse** ≥ 60 ET **Vitesse** ≤70<br>**Vz** ≥ -3 ET **Vz** ≤ 0 | Aucun contrôle visuel spécifique attendu | `LND_volets-[valeur]`<br>`LND_vitesse-[valeur]`<br>`LND_vz-[valeur]` |
| DECELERATION<br>*(DECELERATION)* | **Volets** > 0<br>**Vitesse** ≤ 60<br>**Gaz** = *IDLE* | Aucun contrôle visuel spécifique attendu | `DEC_volets-[valeur]`<br>`DEC_vitesse-[valeur]`<br>`DEC_gaz-[valeur]` |
| REMISE DE GAZ<br>*(GO-AROUND)* | Volets ≥ 0<br>SI **Hauteur** < 300 ALORS **Volets** > 0<br>**Vitesse** ≥ 60<br>**Gaz** = *TOGA* TANTQUE **Hauteur** ≤ 1000<br>**Hauteur** ≤ 1000<br>**Vz** ≥ 0 TANTQUE **Hauteur** ≤ 1000 | ASI<br>VSI | `GAR_volets-[valeur]`<br>`GAR_volets-[valeur]`<br>`GAR_volets-[valeur]`<br>`GAR_volets-[valeur]`<br>`GAR_volets-[valeur]` |

Le tableau 10.1 présente quelques exemples de variables de situation avec les contrôles correspondants selon différentes phases. Le symbole « *Vz* » représente la vitesse verticale de l'avion, *TOGA* désigne le fonctionnement du moteur à pleine puisance et *IDLE*, le fonctionnement du moteur au ralenti. Les valeurs rapportées par les variables de situation sont, au cours de la conduite de cette expérimentation, « correct » ou « incorrect ».

Ces variables de situation ont été créées avec l'aide d'un pilote d'avion de tourisme expérimenté puis, validés par un pilote instructeur.

Pour illustrer, prenons les variables de situation la phase d'accélération. Les contrôles du simulateur sur l'état de l'appareil vérifient que les volets sont en position « 1 », que la vitesse courante est inférieure ou égale à 55 nœuds et que le niveau des gaz est au maximum. Si ces paramètres sont validés, les variables de situation `ACC_volets`, `ACC_vitesse` et `ACC_gaz` sont enregistrées comme « correctes » ; sinon, elles sont reportées comme « incorrecte ». Si les visualisations enregistrées au cours de la phase rapportent que l'indicateur de vitesse (`ASI`) et l'indicateur de la puissance du moteur (`RPM`), ont été vérifiés, la valeur de la variable de situation `ACC_ctrl` est mise à « correcte » sinon, à « incorrecte ».

## 10.5. EVALUATIONS

### 10.5.1. Introduction

Nous présentons dans cette section les évaluations préliminaires conduites sur la généricité du modèle proposé pour la représentation de séquences perceptivo-gestuelles et du framework de traitement de ce type de séquences.

### 10.5.2. Collecte des données

Les données utilisées dans le cadre des évaluations présentées dans cette section ont été collectées à partir de 4 sessions de simulation réalisées par un pilote expérimenté. L'objectif étant de démontrer l'adaptabilité de nos propositions à des données différentes de celles liées au principal cas d'étude de la thèse, le recrutement de plusieurs sujets n'était pas nécessaire. Nous présentons dans les prochains paragraphes, la configuration de la simulation pour la production des données qui seront utilisées pour évaluer la généricité de nos propositions.

#### Configuration de la simulation

Les sessions de simulation ont été réalisées sur une représentation basse fidélité de la piste 09 de l'aéroport de Grenoble-Isère (LFLS). Cette configuration ne comporte pas de difficulté particulière et les conditions météorologiques simulées étaient favorables : vol de jour par beau temps sans vent pour toutes les sessions.

#### Exercices

Les sessions de simulation consistaient à réaliser dans cet ordre :

- *2 tours de piste de prise en main du simulateur, sans perturbateurs*
- *1 tour de piste avec une manœuvre de remise de gaz suivie d'un atterrissage normal*
- *1 tour de piste avec panne de volets au décollage et à l'atterrissage simulée par une panne électrique de l'appareil*

Au cours de ces sessions, les actions ne sont pas envoyées explicitement par le simulateur. Elles seront déduites *a posteriori* par l'opérateur de sémantisation de PeTRA à partir des changements des états de la simulation. Les traitements et l'évolution des traces de simulation de vol sont présentés dans la section suivante.

### 10.5.3. Traitement des traces de simulations de vol

#### Nettoyage et filtrage des traces

Le nettoyage et le filtrage des messages bruts sont réalisés directement au niveau du bus de données au cours des sessions de simulation. L'intérêt de ce choix est de faciliter la suite des traitements sur un ensemble de traces dont les prétraitements sont effectués directement dans la phase de production des données.

L'opérateur reçoit les données brutes sur l'état de l'appareil et sur les actions exécutées, et par le détecteur de phase développé spécifiquement pour cette étude. Il évalue les interactions du pilote en se basant sur ses contrôles visuels et certains paramètres de l'état de la simulation relativement à la phase de vol courante. Il enregistre ces informations de manière à constituer la base de traces qui sera exploitée pour des analyses plus avancées avec les opérateurs du framework PeTRA. Cette base de traces est constituée des informations séquentiellement ordonnées sur l'état de la simulation, les contrôles visuels et les variables de situation.
L'opérateur filtre les messages bruts de manière à retenir uniquement les paramètres qui seront utiles à l'évaluation des actions du pilote. La figure 10.7 illustre le format des traces prétraitées.

```
1432717686014; 1; 5; 0; 99; 1305; acceleration#E
1432717687045; TC#F
1432717687045; ASI#F
1432717688060; ACC_volets-correct; ACC_vitesse-incorrect; ACC_gaz-incorrect#V
1432717688060; ACC_ctrl-correct #V
```

Figure 10.7. Traces générées par l'analyseur des variables de situation sur PILOTE 2

Les séquences marquées par *#E*, *#F* et *#V* représentent, respectivement, les états de la simulation, les fixations (visualisation) et les variables de situation. Les traces sur l'état de la simulation rapportent, dans l'ordre mentionné, le timecode du message, la position des volets de l'avion, sa vitesse horizontale, sa vitesse verticale, la puissance de son moteur, son altitude et la phase de vol courante. Les fixations (visualisations) rapportent les zones d'intérêt visualisées. *TC (Turn Coordinator)* rapporte la visualisation de l'indicateur de virage et de symétrie de la trajectoire de l'avion et ASI *(Air Speed Indicator)*, l'indicateur de la vitesse de l'avion par rapport à l'air. Les variables de situation rapportent d'une part les évaluations sur le statut correct ou incorrect de la configuration de l'avion pour la phase courante ainsi que le correct ou incorrect des contrôles visuels du pilote attendus dans l'exécution des procédures liées aux différentes phases de vol. La création de ces variables de situation est décrite dans la section suivante.

#### Génération des séquences perceptivo-gestuelles enrichies

Pour générer les séquences perceptivo-gestuelles, les traces produites par l'analyseur de variables de situation sont dans un premier temps traitées avec l'opérateur de sémantisation du framework PeTRA. L'objectif est de traduire les états de la simulation et les actions exécutées en dénominations sémantiques. Les paramètres enregistrés sur l'état de la simulation rendent compte de la configuration de l'avion. Il s'agit de la configuration des volets de l'avion, de sa vitesse par rapport à l'air, de sa vitesse verticale, de son altitude, de la puissance fournie par le moteur (donnée par le paramètre de « gaz ») ainsi que la phase courante du vol. Les changements de ces paramètres sont liés aux actions exécutées par le pilote telles que par exemple la sortie des volets, une variation d'altitude ou encore une augmentation des gaz. 37 traductions sémantiques d'actions et d'états de la simulation ont été ainsi définies.

L'étape suivante a été de fusionner les séquences sémantisées avec les zones d'intérêt dont la visualisation est captée par l'oculomètre. La méthode choisie pour la fusion est « post-visualisation » (voir section « 6.3. Jonction entre Actions, Gestes et Perceptions »), c'est-à-dire, qu'on considère que chaque visualisation ou suite de visualisations est liée aux actions qui la suivent. En d'autres mots, le pilote effectue un contrôle visuel de la configuration de l'avion avant d'exécuter des actions.

Les séquences fusionnées ont ensuite été traitées avec l'annotateur du framework PeTRA qui réunit toutes les séquences perceptivo-gestuelles avec les variables de situation les correspondent. La figure 10.9 illustre chacune de ces étapes de traitements par un exemple de séquences.

***Séquence sémantisée***

```
1434099177360;(incremente_vitesse incremente_vz incremente_altitude);(volets_sortis
gaz_stable);take-off#E
```

***Séquences fusionnées***

```
(AH TC);AH;(decremente_vitesse incremente_altitude);(volets_sortis vitesse_decroissant
vz_stable gaz_stable altitude_croissant);(incremente_vz incremente_altitude);
(volets_sortis vitesse_stable vz_croissant gaz_stable altitude_croissant);take-off
```

***Séquences annotées***

```
AH;AH;RPM;ASI;RPM;(incremente_gaz);(volets_sortis vitesse_stable vz_stable
altitude_stable);(incremente_vitesse);(volets_sortis vz_stable gaz_stable
altitude_stable);TC;AH;(AH ALT);(incremente_vitesse);(volets_sortis vz_stable
gaz_stable altitude_stable);ASI;(incremente_vitesse);(volets_sortis vz_stable
gaz_stable altitude_stable);AH;(incremente_vitesse);(volets_sortis vz_stable
gaz_stable altitude_stable);(AH ALT);(incremente_vitesse);(volets_sortis vz_stable
gaz_stable altitude_stable);ASI;(incremente_vitesse);(volets_sortis vz_stable
gaz_stable altitude_stable);(TOF_volets-correct TOF_vitesse-incorrect TOF_gaz-
correct);(TOF_volets-correct TOF_vitesse-correct TOF_gaz-correct);take-off
```

Figure 10.9. Exemples de séquences perceptivo-gestuelles enrichies générées à partir des traces de simulation de vol.

### Extraction de patterns de connaissances à partir des séquences générées

L'algorithme d'extraction de règles orientées phase, PhARules, a été appliqué sur les séquences perceptivo-gestuelles générées à l'issue des traitements décrits dans les sections précédentes.

Avant de procéder à l'extraction des règles, les items des séquences ont été traités par l'opérateur d'encodage/décodage et encodés sous forme d'entiers pour favoriser la rapidité des extractions de règles par PhARules. Le sélecteur de règles perceptivo-gestuelles de PeTRA a été ensuite utilisé pour retenir les règles présentant les modalités ciblées. Il a été configuré de manière à retenir des règles contenant obligatoirement des modalités d'action, de perception, d'états de la simulation et d'évaluations expertes.

Une fois les règles extraites, l'opérateur de décodage du framework PeTRA a été utilisé pour traduire à nouveau les items des séquences dans leurs dénominations sémantiques. La figure 10.10 présente quelques exemples des règles extraites.

```
alignment; incrementer_vitesse, incrementer_vz, volets_sortis, AH =>
decrementer_altitude, decrementer_vitesse, gaz-incorrect #support:0.3
#confiance:1.0

acceleration; incrementer_vitesse, incrementer_gaz, vz_stable, AH, VSI =>
volets-correct, vitesse-correct, ctrl-correct #support:0.5 #confiance:0.71

final; AH, ASI, decrementer_vz, decrementer_vitesse, gaz_stable, AH =>
volets_sortis, VSI, volets-correct, vitesse-correct #support:0.5
#confiance:1.0
```

Figure 10.10. Exemples de règles perceptivo-gestuelles extraites à partir des séquences de simulation de vol.

A titre d'exemple, dans la figure 10.10, la première règle peut être interprétée comme suit :

> *Dans 30% des séquences d'interactions du pilote, au cours de la phase d'alignement, une incrémentation de la vitesse par rapport à l'air et une décrémentation de la vitesse verticale de l'avion, les volets étant sortis, accompagnés d'un contrôle visuel du cadran « Horizon Artificiel », sont suivis, dans 100% des cas, par une décrémentation de l'altitude de l'avion, un ralentissement de l'avion et une mauvaise configuration de la puissance du moteur.*

PhARules a été appliqué sur les jeux de données formés par la réunion des séquences de toutes les sessions et sur les séquences de chaque session séparément.

### 10.5.4. Discussion

L'étude préliminaire présentée dans cette section visait à évaluer la généricité du modèle de représentation des séquences perceptivo-gestuelles. En l'occurrence, elle évaluait la possibilité d'appliquer le modèle sur des séquences d'interactions multimodales relatives à un domaine autre que la chirurgie orthopédique percutanée, le cas d'étude de cette thèse. Elle visait aussi à estimer la capacité des opérateurs du framework PeTRA, à prendre en charge le traitement de ces séquences et la capacité de l'algorithme PhARules à extraire des règles perceptivo-gestuelles orientées phase à partir de la base de séquences générée par les opérateurs. Nous décrivons dans la suite les ajustements et adaptations qui ont été nécessaires à l'application de notre modèle et notre framework aux traitements de ces nouvelles données.

#### Evolution de la formalisation des séquences et de la méthodologie des traitements

Aucune évolution conceptuelle de la formalisation des séquences n'est à noter. La représentation des séquences obtenues in fine est en adéquation avec le modèle proposé pour la formalisation des séquences perceptivo-gestuelles et des séquences perceptivo-gestuelles enrichies.

Par contre, la méthodologie des traitements devait être adaptée à certaines spécificités de la plateforme de simulation et des données.

La première évolution de la méthodologie de traitement imposée par le simulateur de vol, se situe au niveau de la caractérisation de l'état des objets de l'environnement de simulation. Dans notre cas d'étude principal, TELEOS, les changements des états de la simulation sont enregistrés seulement à l'exécution d'une action ou d'un geste. Dans le cas de PILOTE 2, les données sur l'état de la simulation sont envoyées en continu toutes les secondes. Il arrive souvent qu'aucun changement de l'état de la simulation ne soit observé sur une suite relativement longue de séquences. A l'issue de l'opération de sémantisation, on obtient un grand nombre de séquences

contiguës rapportant que l'état de la simulation est stable. Cela crée des redondances dont la fréquence inonde des changements d'état de la simulation à partir desquels des actions ont été déduites. Pour corriger ce problème, il a fallu mettre en place un traitement de filtrage au niveau de l'opérateur de sémantisation. Son rôle a été de retenir les informations sur l'état de la simulation avant et après des changements révélant l'exécution d'une action. Par exemple, si le sémantisateur détecte qu'il y eu une diminution d'altitude de l'avion, il va récupérer l'état de la simulation avant et après que ce changement se soit produit. L'objectif est de retenir l'état de la simulation pris en compte par le pilote avant l'exécution d'une action et l'état de la simulation après l'exécution de cette action.

La figure 10.11 illustre les opérateurs du framework PeTRA impliqués dans le traitement des traces de simulation de vol ainsi que leur enchainement. Contrairement aux traitements des données issues du simulateur TELEOS, l'opérateur de sémantisation a précédé l'opérateur de fusion. En effet, cet enchainement a été choisi pour pouvoir inférer les actions du pilote à partir des changements d'états de la simulation avant d'intégrer les données liées aux perceptions.

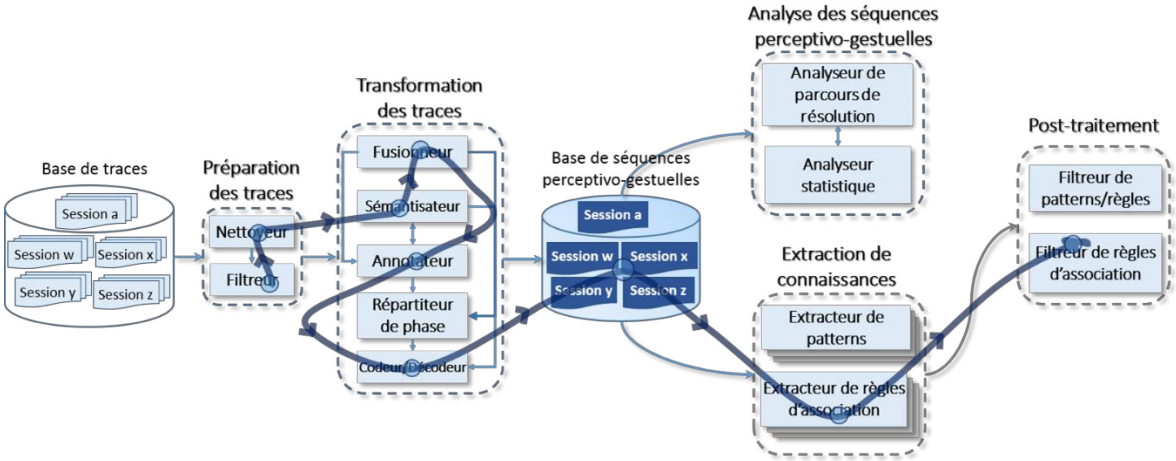



Figure 10.11. Les opérateurs de PeTRA impliqués dans le traitement des séquences de simulation de vol.

Dans notre cas d'étude principal, tous les opérateurs du framework sont exploités à un niveau ou un autre, sur les données de simulation de vertébroplastie. Certaines de ces opérations ne sont pas obligatoires pour d'autres domaines.

D'une manière générale, le nettoyage et le filtrage des données ne sont pas obligatoires pour la suite des traitements. Ils sont cependant fortement conseillés du point de vue qualité des données pour la simple et bonne raison que des données de qualité médiocre induiront des biais dans les traitements avancés et leurs résultats.

La fusion des traces multi-sources est par contre une tâche obligatoire au regard du modèle de représentation des séquences perceptivo-gestuelles. Cependant, la sémantisation des changements d'état des objets de l'environnement de simulation n'est pas obligatoire. En effet, il n'est pas nécessaire de faire intervenir l'opérateur de sémantisation si les actions et l'état de la simulation sont prétraités par le STI et envoyés sous forme sémantique aux opérateurs. Cette tâche n'est pas non plus nécessaire si l'état de la simulation est considéré superflu dans la caractérisation des interactions de l'apprenant. Ce serait par exemple le cas, si l'environnement de simulation était statique ou si les changements dans l'environnement de simulation n'étaient pas pertinents d'un point de vue didactique. Il en va de même de l'intégration des évaluations à partir de règles expertes dans les séquences fusionnées.

Les traitements de transformation des traces ne faisant pas intervenir le sémantisateur et l'annotateur, n'affectent pas le modèle conceptuel proposé. En effet, les résultats produits dans un tel cas de figure, constituent des séquences perceptivo-gestuelles (par opposition à des séquences perceptivo-gestuelles enrichies).

L'encodage des items des séquences reste cependant une tâche obligatoire. La motivation de cette contrainte est de favoriser l'efficience des algorithmes d'extraction de patterns à partir de ces données.

L'opérateur d'analyse du parcours de résolution a un intérêt limité pour des cas de résolution de problème où l'apprenant ne peut pas circuler librement entre différentes phases. Dans ce contexte, la résolution est linéaire. La seule détection à mettre en place est celle du passage d'une phase à la suivante. L'analyse des interactions à l'intérieur d'une phase spécifique est ainsi possible. Cependant, l'analyse d'interactions correctives lors d'un retour sur phase ne peut pas s'appliquer dans ce cas car, la possibilité de revenir sur une phase injustement validée ne peut pas être envisagée.

### Ajustements effectués au niveau du framework

Dans le cadre de cette étude, nous cherchions à produire des séquences respectant la proposition de représentation proposée pour des séquences perceptivo-gestuelles enrichies. Nous devions de ce fait disposer d'évaluations à partir de règles expertes relatives aux interactions multimodales mises en jeu au cours d'une session de simulation de vol. Le simulateur exploité ne disposant pas de cette fonctionnalité, nous avons défini les variables de situation nécessaires avec l'aide de deux pilotes expérimentés dont un pilote instructeur.

Aucune modification profonde des codes des opérateurs du framework n'a été nécessaire. Nous avons cependant implémenté une version « online » des opérateurs de nettoyage et de filtrage pour pouvoir les intégrer au bus de données de la plateforme de simulation. Cet ajustement a été un choix motivé par la praticité de réaliser ce traitement directement au cours de la production des traces.

Les principales modifications supplémentaires se rapportent aux données dépendantes du domaine. Il s'agit des modifications qui ont dû être apportées à la description sémantique des actions et des états de la simulation, aux codes numériques attribués à chaque item des séquences avant le processus d'extraction de règles et à la description des phases pour l'automatisation de leur détection par l'algorithme PhARules. Ce dernier point en l'occurrence, a été une simplification du processus d'identification des phases. En effet, la version « online » de l'opérateur intégrée dans le bus de données, imprime dans chaque séquence l'identification de la phase dans laquelle elle a été exécutée. Cette tâche est réalisée en temps réel au cours de chaque session de simulation. Pour ce faire, les informations fournies par l'agent de détection des phases vol du bus de données sont exploitées par notre opérateur.

D'une manière générale, les difficultés rencontrées au cours de cette étude se mesurent plus à la durée de certaines tâches qu'à leur complexité. Il s'agit par exemple de la tâche de modélisation des variables de situation et de leur programmation dans l'opérateur d'analyse de traces intégré dans le bus de données. Ces tâches ne font pas partie de nos propositions. Elles ne sont, de ce fait, pas prises en charge par notre framework. Cependant, elles sont nécessaires à l'élicitation des connaissances du domaine.

Au même titre, la définition sémantique des actions et des états de la simulation ; la détermination des codes numériques pour l'encodage et le décodage des items sont aussi des tâches fastidieuses

mais nécessaires à l'élicitation des connaissances. Ces tâches constituent un travail à réaliser en marge du framework mais néanmoins indispensables au guidage des traitements qu'il offre.

## 10.6. CONCLUSION

Nous avons décrit, dans ce chapitre, l'application de notre modèle de représentation des séquences perceptivo-gestuelles sur des traces d'interactions de simulation de pilotage d'avion. Ce domaine implique des interactions multimodales sous-tendant des connaissances perceptivo-gestuelles, empiriques et souvent tacites. Le modèle de représentation proposé a pour objectif de permettre l'analyse de ce type d'interactions en prenant en compte les différentes facettes qui les composent. Pour évaluer les conséquences de ces interactions dans un contexte d'apprentissage nous intégrons des évaluations visant à estimer la validité de ces interactions d'un point de vue expert. Pour ce faire, nous avons modélisé des variables de situation intégrées à la plateforme de simulation dans le but de produire les évaluations ciblées.

Nous avons aussi décrit l'application des opérateurs de notre framework exploités dans le but de générer des séquences respectant la représentation proposée. Là aussi, le but a été d'évaluer la capacité de ces opérateurs à prendre en charge des séquences perceptivo-gestuelles liées à un autre domaine que celui sur lequel ils ont été initialement testés. Les ajustements nécessaires sur les opérateurs ont été minimes. Le travail de modélisation lié aux spécifications dépendantes du domaine a été cependant fastidieux. Ce travail incluait la définition des dénominations sémantiques sur les changements d'états de la simulation, la définition des paramètres pour la détection automatique des phases de vol et la définition des variables de situation évaluant l'activité du pilote.

Nous avons enfin montré la capacité de notre proposition d'algorithme PhARules, à extraire des règles perceptivo-gestuelles orientées phase sur ces nouvelles données.

Ces traitements relèvent cependant du diagnostic comportemental de l'apprenant et ne modélise pas l'apprenant d'un point de vue épistémique. Ce point constitue l'une des principales perspectives du travail décrit dans ce chapitre et dans le cadre de cette thèse en général.

## SYNTHESE

- Méthodologie d'application des propositions formulées (modèle de représentation, opérateurs de traitement, algorithme d'extraction de patterns fréquents) sur des données issues d'un nouvel environnement de simulation
- Représentation de séquences d'interactions multimodales enregistrées à partir d'une plateforme de simulation de vol
- Diagnostic comportemental d'un pilote à partir des traces d'interactions multimodales enregistrées
- Preuve de concept de la généricité de ces propositions

# CONCLUSION

# CHAPITRE 11.
# CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

*Nous faisons ici un survol de la thèse, rappelant la problématique ainsi que les verrous scientifiques et techniques adressés dans le cadre de notre travail de recherche. Nous résumons ensuite les contributions de ce projet doctoral. Enfin, nous en rappelons les limites ainsi que les principales perspectives envisageables pour étendre les recherches conduites et pour améliorer les outils logiciels et algorithmiques proposés.*

Chapitre 11. ..... 190
Conclusions et Perspectives ..... 190
**11.1. Survol de la thèse ..... 191**
**11.2. Contributions ..... 191**
11.2.1. Un modèle de représentation des séquences perceptivo-gestuelles ..... 192
11.2.2. Le framework PeTRA ..... 192
11.2.3. L'algorithme PhARules ..... 193
11.2.4. Preuve de concept de la généricité des contributions de la thèse ..... 194
11.2.5. Publications ..... 195
**11.3. Limites et Perspectives ..... 195**
11.3.1. Extension des expérimentations ..... 196
11.3.2. Production de services tutoriels épistémiques ..... 196
11.3.3. Formalisation de la validation des données produites ..... 197
11.3.4. Amélioration des performances de l'algorithme PhARules ..... 198

## 11.1. SURVOL DE LA THESE

Ce projet doctoral adresse la problématique de la production de services tutoriels dans les Systèmes Tutoriels Intelligents (STI) dédiés aux domaines impliquant des connaissances multimodales, notamment perceptivo-gestuelles. Le travail s'intéresse tout spécialement à ce type de connaissances dans les domaines mal-définis. Nous présentons une analyse de l'état de l'art sur cette catégorie de domaines et de connaissances dans les chapitres 2 et 3 du manuscrit.

Les verrous scientifiques et techniques liés spécifiquement au type de connaissances que nous ciblons, sont relatifs à la difficulté de les capturer, de les modéliser et de les analyser dans les STI ou tout autre type d'Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. En effet, leur capture implique l'utilisation de plusieurs périphériques couvrant les différentes modalités des interactions. Cette diversité est à l'origine d'un ensemble de traces hétérogènes. Celles-ci sont difficiles à fusionner et le traitement des interactions en couvre difficilement toutes les facettes. La modélisation de ces interactions doit prendre en charge cette hétérogénéité. Elle se valide par la possibilité qu'elle offre à analyser les comportements et les connaissances qu'elles sous-tendent, sur la base des différentes modalités impliquées. Dans le domaine des STI, il s'agit de favoriser l'exploitation de ces interactions à des fins didactiques et pédagogiques. De ce point de vue, un autre type d'hétérogénéité est à prendre en compte : l'hétérogénéité interne des données spécifique aux cas de résolution de problème impliquant différentes phases.

Le cas d'étude de la thèse est le STI TELEOS. Ce dernier est un simulateur dédié à la chirurgie orthopédique percutanée, un domaine mal-défini impliquant des connaissances perceptivo-gestuelles. Nous décrivons en détail ce domaine et le STI dans les chapitres 4 et 5 du manuscrit.

La problématique de la modélisation et du traitement des interactions sous-tendant les connaissances perceptivo-gestuelles du domaine, a été explorée sous trois axes : (1) la formalisation des séquences d'interactions perceptivo-gestuelles ; (2) le développement d'outils capables de réifier le modèle conceptuel (3) le développement d'outils favorisant l'analyse de ces séquences d'un point de vue didactique.

Les propositions formulées sur la base de ces trois axes sont détaillées dans les chapitres 6, 7 et 8 du document. Nous en présentons un résumé dans la section suivante.

## 11.2. CONTRIBUTIONS

Les contributions suivantes ont été produites dans le cadre de cette thèse :

(1) une contribution théorique sous la forme d'un modèle de représentation de séquences d'interactions sous-tendant des connaissances perceptivo-gestuelles
(2) une contribution informatique sous la forme d'un framework de traitement de séquences multimodales en général, perceptivo-gestuelles en particulier ;
(3) et un algorithme d'extraction de patterns fréquents, spécifiquement de règles séquentielles, reflétant la nature perceptivo-gestuelle des connaissances et prenant en compte l'hétérogénéité interne des séquences qui les sous-tendent.

Nous avons, en outre, fourni une preuve de concept de la généricité de ces contributions. Celles-ci sont résumées ci-dessous.

### 11.2.1. Un modèle de représentation des séquences perceptivo-gestuelles

Le modèle de représentation proposé vise à placer les perceptions de l'apprenant en cohérence avec ses actions et ses gestes. Les perceptions peuvent être de différents types et utilisées à des fins diverses. Selon le cas de figure, certaines perceptions peuvent systématiquement précéder les actions et gestes. Inversement d'autres types de perceptions peuvent systématiquement intervenir après les actions et les gestes. La prise en compte de la nature des perceptions mises en jeu par l'apprenant permet d'assurer la cohérence des différentes modalités d'interactions d'un point de vue temporel. Les séquences sont représentées sous forme d'itemsets temporellement ordonnés. Un item est un élément d'interaction de l'une ou l'autre modalité (action, perception ou geste). Un itemset regroupe des items dont les occurrences sont simultanées, indifféremment des modalités auxquelles ces items appartiennent. Les itemsets ne contiennent aucun doublon pour la raison évidente que deux occurrences d'une même interaction ne peuvent en aucun cas être simultanées. Cette représentation génère des séquences dites perceptivo-gestuelles.

Dans les STI basés sur la simulation, l'environnement de simulation dans son ensemble forme le contexte d'apprentissage. Sur la base de cette idée, il est important de considérer non seulement les interactions de l'apprenant, mais aussi les réactions du système en réponse à ces interactions. Il s'agit plus précisément des états de la simulation et des évaluations produites par le module de diagnostic des connaissances du STI. L'intégration de ces items génère ce que nous proposons d'appeler des séquences perceptivo-gestuelles enrichies.

Nous avons étudié la cohérence du modèle sur la base de l'hypothèse suivante :

> ***H1 :*** *L'intégration des interactions multimodales de l'apprenant dans des séquences perceptivo-gestuelles améliore la précision de l'analyse de ses activités dans un contexte d'apprentissage.*

Spécifiquement, l'expérimentation conduite visait à évaluer la possibilité d'analyser les performances de l'apprenant sur la base des différentes modalités de ses interactions regroupées dans les séquences perceptivo-gestuelles représentées selon le modèle proposé. Nous avons ainsi montré que cette représentation permettait d'évaluer les performances de l'apprenant relativement à son comportement lié aux perceptions visuelles. Cette expérimentation est présentée dans la section *« 9.2. Evaluation du Modèle de Représentation des Séquences Perceptivo-Gestuelles »*.

### 11.2.2. Le framework PeTRA

L'une des principales difficultés liées à l'exploitation des interactions multimodales dans les environnements d'apprentissage, est relative à l'absence d'outils génériques automatisant leurs traitements et les analyses de l'apprentissage qu'elles sous-tendent de manière cohérente relativement à l'hétérogénéité de ces interactions.

Nous avons proposé un framework dans cette optique. Il s'agit du framework PeTRA (Perceptual-Gestural treatment TRAces framework) regroupant un ensemble d'outils à fonction unique que nous appelons des opérateurs. Ces opérateurs ont pour but de favoriser le traitement des traces multi-sources et hétérogènes d'interactions multimodales enregistrées dans un environnement d'apprentissage simulé. Les opérateurs sont utilisables sous la forme d'un processus intégrant différentes phases de traitement. Ces dernières commencent avec la préparation des traces puis leur transformation visant à générer les séquences perceptivo-gestuelles exploitables, à partir de là, à des fins d'analyse de l'apprentissage et d'extraction de patterns fréquents. Le framework

intègre en plus une phase de post-traitement liée à la phase d'extraction de patterns fréquents. Le rôle des opérateurs de cette phase de traitement est de cibler les patterns fréquents reflétant les caractéristiques perceptivo-gestuelles recherchées. La mise en place de cette phase de traitement a été motivée par l'idée de laisser la possibilité d'extraire des patterns génériques avec les opérateurs du framework tout en permettant de cibler spécifiquement les patterns perceptivo-gestuels au besoin.

L'agencement des opérateurs est modulable. Ils ont en outre été conçus dans le souci de garantir leur réutilisabilité indépendamment des domaines. Nous visons notamment à rendre possible leur exploitation sur des plateformes de mutualisation d'outils de traitement de données éducationnelles telle que la plateforme UnderTracks.

Cette contribution informatique a été évaluée sur la base de l'hypothèse suivante :

> ***H2 :*** *L'implémentation du modèle de représentation avec les outils informatiques proposés permet de structurer le traitement et l'analyse de l'activité de l'apprenant en adéquation avec la nature perceptivo-gestuelle de ses connaissances.*

L'évaluation de cette hypothèse a été conduite conjointement à celle de l'hypothèse H1 (Cf. section *« 9.2. Evaluation du Modèle de Représentation des Séquences Perceptivo-Gestuelles »*). Une expérimentation exploratoire en a étendu l'évaluation. Elle est décrite dans la section 9.3 du manuscrit *(« Exploration d'une Extension du Modèle par la Détection Automatique du Parcours de Résolution de l'Apprenant »)*. Elle a révélé la capacité ainsi que les limites du framework pour la modélisation automatique non supervisée de l'activité d'apprentissage à partir des séquences d'interactions perceptivo-gestuelles.

### 11.2.3. L'algorithme PhARules

Nous avons proposé de prendre en compte deux types d'hétérogénéité des données enregistrées dans les environnements d'apprentissage simulés. D'une part, nous considérons l'hétérogénéité des traces d'activité inhérente à la diversité des périphériques du STI qui les produisent. Nous adressons cette problématique avec le modèle proposé pour la représentation des traces multi-sources hétérogènes en séquences perceptivo-gestuelles.

D'autre part, nous considérons l'hétérogénéité interne des traces d'activité. Il s'agit de l'hétérogénéité induite par la diversité des interactions dans les cas de résolution de problèmes impliquant différentes phases. Dans ces cas de figure, certaines interactions sont sous-représentées ou tout simplement inexistantes selon les phases de résolution considérées. Nous adressons cette hétérogénéité interne des traces avec la conception de notre proposition d'algorithme, PhARules.

PhARules est un algorithme d'extraction de règles séquentielles conçu pour prendre en compte l'importance des interactions relativement à la phase de résolution dans laquelle elles ont été réalisées. Cet algorithme vise à favoriser l'enrichissement du module modèle de connaissances d'un STI par l'acquisition automatique des connaissances du domaine et la modélisation des connaissances de l'apprenant en cohérence avec leurs caractéristiques perceptivo-gestuelles.

L'hypothèse formulée à ce stade est la suivante :

> ***H3 :*** *La prise en compte de l'hétérogénéité interne des traces par les algorithmes au d'extraction de patterns fréquents, permet de mieux cerner l'activité de l'apprenant dans un contexte d'apprentissage.*

Les expérimentations conduites sur cette hypothèse ont démontré la capacité de notre algorithme à extraire des règles perceptivo-gestuelles issues de toutes les phases de résolution des exercices de simulation de vertébroplastie. Les résultats produits se sont révélés pertinents et intéressants à plusieurs niveaux, du point de vue des experts du domaine. Cette étude est décrite dans la section 9.4 du manuscrit *(« Evaluation de l'Extraction de Règles Orientées Phases de Résolution »)*.

### 11.2.4. Preuve de concept de la généricité des contributions de la thèse

Les contributions résumées dans les sections précédentes ont été mises en place tout au long de leur conception avec un souci de généricité. L'objectif est de les rendre exploitables sur tout ensemble de traces d'activité relatives à des interactions sous-tendant des connaissances multimodales en générale, perceptivo-gestuelles en particulier. Les solutions proposées doivent pouvoir être adaptées à des traces d'activité différentes de celles du domaine et du STI composant le cas d'étude de cette thèse.

Dans cette optique, nous avons émis l'hypothèse suivante :

> ***H4*** *: Les contributions de cette recherche sont applicables à des domaines et environnements d'apprentissage autres que le cas d'étude autour duquel elles ont été développées.*

L'évaluation de cette hypothèse a été réalisée dans le cadre d'une expérimentation conduite sur des données issues d'une plateforme de simulation dédiée au domaine de l'aviation.

Cette étude a fourni une preuve de concept de la généricité du modèle de représentation, du framework PeTRA et de l'algorithme PhARules. Cependant, l'étude s'est limitée à l'évaluation de la capacité à représenter les traces multi-sources et hétérogènes du simulateur en séquences perceptivo-gestuelles enrichies. Elle a aussi évalué la capacité de notre proposition d'algorithme à extraire des règles séquentielles à partir des séquences ainsi produites. La pertinence de ces résultats d'un point de vue didactique ou pédagogique n'a pas été évaluée.

### 11.2.5. Publications

Certaines des propositions décrites dans ce manuscrit ainsi que les expérimentations y afférentes, figurent dans les articles suivants :


[1] Toussaint, B.-M., Luengo, V. and Jambon, F. and Tonetti, J.: **From Heterogeneous Multisource Traces to Perceptual-Gestural Sequences: the PeTra Treatment Approach**. In: Conati, C., Heffernan, N., Mitrovic, A., Verdejo, M. F. (eds), *Proceedings of the 17th International Conference on Artificial Intelligence in Education (AIED 2015)*, Madrid, Spain. LNCS, vol. 9112, pp. 480-491. Springer, Heidelberg (2015)
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-19773-9_48

[2] Toussaint, B.-M., Luengo, V.: **Mining surgery phase-related sequential rules from vertebroplasty simulations traces**. In: Holmes, J.H., Bellazzi, R., Sacchi, L., Peek, N. (eds.) *Proceedings of the 15th International Conference on Artificial Intelligence in Medicine (AIME 2015)*, Pavia, Italy. LNCS, vol. 9105, pp. 32–41. Springer, Heidelberg (2015)
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-19551-3_5

[3] Toussaint, B.M., Luengo, V. et Jambon, F.: **Proposition d'un framework de traitement de traces pour l'analyse de connaissances perceptivo-gestuelles - Le cas de la chirurgie orthopédique percutanée**. *Actes de la 7e édition de la Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH 2015)*, Agadir, Maroc, juin 2015
http://jiji.cat/fr/eiah2015/_static/pdf/00010222.pdf

[4] Toussaint, B.M., Luengo, V., and Tonetti, J.: **Towards Using Similarity Measure for Automatic Detection of Significant Behaviors from Continuous Data**. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Educational Data Mining (EDM 2014)*, July 2014. London, UK. pp. 427-428
http://www.educationaldatamining.org/conferences/index.php/EDM/2014/paper/view/1419/1385

[5] Bouhineau, D., Luengo, V., Mandran, N, Ortega, M., Toussaint, B.M., Wajeman, C.: **Open Platform to Model and Capture Experimental Data in Technology Enhanced Learning Systems**. Workshop Data Analysis and Interpretation for Learning Environments, 2013, Autrans, France
https://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-00948795


## 11.3. Limites et Perspectives

Les limites et perspectives de la recherche conduite dans le cadre de cette thèse concernent (1) l'extension des expérimentations conduites ; (2) la finalité de l'exploitation des résultats produits ; (3) la formalisation des critères de validation de ces résultats et des opérateurs qui les produisent ; et (4) l'amélioration des outils.

### 11.3.1. Extension des expérimentations

La perspective ici est de parvenir à contourner les difficultés inhérentes à notre cas d'étude, de manière à disposer de plus de données et de plus de sujets, pour un passage à l'échelle des évaluations des propositions formulées.

#### Tester les propositions formulées sur un plus grand nombre de données

La principale difficulté rencontrée au cours des travaux de cette thèse a été celle des collectes de données pour notre cas d'étude. D'une part, il existe relativement peu de profils de médecins et d'internes spécialisés dans la chirurgie orthopédique percutanée. D'autre part, la disponibilité des sujets ciblés est limitée alors qu'un exercice de simulation de vertébroplastie dure en approximativement une heure. En résumé, nous disposions de peu de sujets et de peu de possibilité de varier les sessions de simulation avec ces sujets. De ce fait, nous disposions d'un volume de données relativement limité pour conduire nos expérimentations. Une perspective serait de trouver le moyen de mobiliser plus de sujets pendant plus de temps sur le simulateur, de manière à générer de plus gros volumes de données à partir desquelles il sera possible d'étendre les expérimentations sur les outils de traitements proposés et sur notre algorithme.

Une perspective connexe est de changer de cas d'étude principal pour un domaine où le recrutement des sujets et les campagnes de collecte de données soient moins ardus. C'est le cas par exemple pour le domaine de l'aviation.

#### Soumettre l'évaluation des résultats de PhARules à un plus grand panel d'experts

Une autre facette de la difficulté posée par la situation mentionnée dans la section précédente, est le nombre d'experts disponibles pour l'évaluation des règles extraites par notre proposition d'algorithme. Il faut envisager de réduire le temps nécessaire à l'évaluation des règles (90 minutes en moyenne) et favoriser le recrutement d'un plus grand panel d'experts en chirurgie orthopédique percutanée pour la réalisation de cette phase importante de validation des résultats de notre algorithme.

### 11.3.2. Production de services tutoriels épistémiques

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ont vocation à être exploités dans un objectif d'amélioration des services tutoriels épistémiques des STI. Pour ce faire, il convient d'envisager l'intégration des règles perceptivo-gestuelles dans les modules des STI. L'objectif est de produire *in fine* des diagnostics et des rétroactions ciblant, au-delà du comportement modélisé par ces règles, les connaissances qu'elles sous-tendent.

#### Evaluer les gains apportés au diagnostic épistémique des connaissances de l'apprenant

Les solutions proposées, adressant la problématique de la représentation et l'analyse des interactions perceptivo-gestuelles de l'apprenant, se focalisent sur le diagnostic comportemental de celui-ci. Le diagnostic épistémique à partir des nouveaux résultats obtenus sur la modélisation des connaissances perceptivo-gestuelles, n'a pas été exploré.

La perspective en ce sens consiste à mettre en place une évaluation des résultats produits par les outils de traitement proposés du point de vue du diagnostic épistémique des connaissances de l'apprenant. Le diagnostic épistémique produit par un STI exploite le diagnostic comportemental de l'activité de l'apprenant. Il convient d'évaluer les gains réels, notamment en précision, apportés au diagnostic épistémique par le diagnostic comportemental produit par nos outils en exploitant les caractéristiques multimodales des interactions de l'apprenant. Pour ce faire, Les résultats

produits doivent être assimilés aux fonctionnalités du système. L'objectif est de produire ainsi un cycle d'enrichissement progressif des modules du STI en exploitant les traces d'activité générées par l'utilisation du STI.

Cette perspective est aisément envisageable sur la plateforme TELEOS car celle-ci dispose d'une interface d'administration qui facilite notamment l'intégration de nouveaux éléments de connaissances dans le module expert du STI.

#### Proposer des services tutoriels multimodaux

Une autre finalité de l'exploitation des séquences perceptivo-gestuelles générées est de modéliser des services tutoriels en adéquation avec la multi-modalité des connaissances mises en jeu. Il s'agit notamment des rétroactions pouvant être envoyées à l'apprenant au cours d'une session de simulation. Ces rétroactions peuvent prendre les formes classiques de messages d'avertissement, d'aides à la demande ou de suggestions pédagogiques, mais en intégrant les dimensions perceptuelles et gestuelles de l'activité d'apprentissage. Un travail de recherche a été initié en ce sens [Maguet, 2012]. Ce travail exploratoire visait à définir une méthodologie de mise en place de rétroactions épistémiques en adéquation avec les connaissances perceptivo-gestuelles. Plus précisément, l'objectif a été d'intégrer dans le STI des rétroactions visuelles ciblant le guidage de l'apprenant dans sa trajectoire d'insertion du trocart.

### 11.3.3. Formalisation de la validation des données produites

La perspective ici est d'envisager une méthodologie formalisée facilitant la vérification de la qualité et de la validité des données tout au long du processus de traitement par les opérateurs de notre framework.

#### Formaliser les critères de validation des opérateurs et des données

Les propositions formulées intègrent beaucoup de traitements automatisés des données. La qualité des données fournies aux opérateurs de traitement de notre framework et des données produites par ces opérateurs, a été contrôlée manuellement et de manière empirique tout au long des expérimentations. Cette tâche est fastidieuse et ne peut pas garantir de manière formelle la qualité espérée des données. En outre, dans la mesure où l'objectif est de permettre l'extension du framework par d'autres opérateurs au besoin, des critères formels devraient permettre de les valider au même titre que les données.

La définition de critères formels de validation vise à faciliter et garantir la qualité des données et de leurs traitements. Au niveau des données, l'objectif est de pouvoir certifier de leur qualité autant à l'entrée qu'à la sortie des opérateurs. Au niveau des opérateurs, la validation envisagée se conçoit autant au niveau informatique qu'au niveau de la qualité des traitements. Du point de vue informatique, il s'agit d'avoir des outils qui respectent notamment des critères de temps d'exécution et de généricité en termes de prise en charge des données indépendamment du domaine. Du point de vue des traitements, la validation d'un opérateur se mesure à la qualité des résultats produits estimée grâce aux critères de validation des données à la sortie des opérateurs. A ce niveau, les critères doivent permettre de faire la distinction entre un traitement inadapté aux objectifs de recherche et un traitement de mauvaise qualité. Mandran *et al.* (2015 b) proposent une méthodologie pour la définition de tels critères. La perspective envisagée vise à appliquer et tester ces propositions avec les données traitées par les opérateurs du framework PeTRA.

### Formaliser les critères de sélection des règles perceptivo-gestuelles

L'une des limites classiques des outils algorithmiques de fouille de patterns fréquents est le très grand nombre de résultats produits. Parmi ces patterns, beaucoup sont potentiellement non pertinents, incomplets, tautologiques ou tout simplement dépourvus de sens du point de vue du domaine. En d'autres mots, leur intérêt objectif en termes de support et de confiance ne garantit pas leur intérêt en ce qui a trait à leur pertinence pour le domaine du point de vue des experts humains de celui-ci. La sélection des meilleurs patterns extraits par ces algorithmes en général et celui que nous proposons en particulier, est donc un défi non négligeable.

Pour adresser ce défi, nous proposons de définir et de formaliser des critères de sélection se basant sur une combinaison de caractéristiques. La combinaison envisagée intègre les caractéristiques communes entre les règles perceptivo-gestuelles ayant reçu les scores de pertinence les plus élevés des experts humains. Elle intègre aussi les caractéristiques communes des règles ayant les scores les plus faibles. La perspective est d'analyser ces caractéristiques et identifier les paramètres motivant la sélection ou le rejet d'une règle. Ces critères sont *a priori* dépendants du domaine mais la formalisation du processus d'identification de ces critères pourrait en assurer la reproductibilité indépendamment du domaine.

## 11.3.4. Amélioration des performances de l'algorithme PhARules

L'identification des phases de résolution des séquences d'interactions effectuée par l'algorithme PhARules au cours de l'extraction des règles séquentielles, est une fonction lourde en termes de temps d'exécution et de consommation de ressources informatiques. L'application de l'algorithme sur de gros volumes de données ou sur données intégrant des séquences composées de nombreux items, risque d'en limiter l'efficacité. L'objectif est d'optimiser les performances computationnelles de cette fonction dans le but de garantir le passage à l'échelle et son exploitation sur des données plus volumineuses et potentiellement plus complexes.

# RÉFÉRENCES

[Adda *et al*. 2012] Adda, M., Wu, L., White, S., Feng, Y.: Pattern Detection With Rare Item-Set Mining. In: International Journal on Soft Computing, Artificial Intelligence and Applications (IJSCAI), Vol. 1(1), August 2012

[Agrawal & Sikrant, 1994] Agrawal, R., Srikant R.: Fast Algorithms for Mining Association Rules in Large Databases. In: Proc. of the 20th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB '94), Jorge B. Bocca, Matthias Jarke, and Carlo Zaniolo (Eds.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, pp. 487-499.

[Aguirre *et al*. 2014] Aguirre, A., Lozano-Rodero, A., Matey, L.M., Villamane, M.; Ferrero, B.: A Novel Approach to Diagnosing Motor Skills. In IEEE Transactions on Learning Technologies, Vol. 7(4), pp.304-318, Oct.-Dec. 2014

[Aleven *et al*. 2009] Aleven, V., McLaren, B. M., Sewall, J., Koedinger, K. R.: A New Paradigm for Intelligent Tutoring Systems: Example-Tracing Tutors. In: International Journal of Artificial Intelligence in Education 19(2). IOS Press (2009). pp. 105-154

[Aleven, 2010] Aleven, V.: Rule-Based Cognitive Modeling for Intelligent Tutoring Systems. In Nkambou, R., Bourdeau, J., Mizoguchi, R. (eds): Advances in Intelligent Tutoring Systems. Studies in Computational Intelligence, Vol. 308 (Chap. 3), 2010, pp. 33-62

[Amershi & Conati, 2007] Amershi, S., Conati, C.: Unsupervised and supervised machine learning in user modeling for intelligent learning environments. Actes de l'International Conference on Intelligent User Interfaces, pp. 72–81.

[Anderson, 1983] Anderson, J. R.: The Architecture of Cognition. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press (1983)

[Anderson, 1993] Anderson, J. R 1993. Rules of the mind. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.

[Anderson *et al*. 1995] Anderson, J. R., Corbett, A. T., Koedinger, K. R. and Pelletier, R.: Cognitive Tutors: Lessons Learned. Journal of the Learning Sciences 4(2), pp. 167-207.

[Arroyo *et al*. 2004] Arroyo, I., Beal, C., Murray, T., Walles, R., Woolf, B. P.: Web-based Intelligent Multimedia Tutoring for High Stakes Achievement Tests. Computer Science Department. Faculty Publication Series. Paper 111.

[Arroyo *et al*. 2009] Arroyo, I., Cooper, D. G., Burleson, W., Woolf, B. P., Muldner, K., and Christopherson, R. Emotion sensors go to school. AIED, July 6-10, Brighton, UK, IOS Press, (2009), pp. 17–24.

[Baghaei *et al*. 2006] Baghaei, N., Mitrovic, A., Irwin, W.: Problem-Solving Support in a Constraint-based Tutor for UML Class Diagrams. Technology Instruction, Cognition and Learning 2006 (TICL 2006), Vol. 4(2), pp. 113-137.

[Baker & Yacef, 2009] Baker, R., Yacef, K.: The state of educational data mining in 2009: A review and future visions. Journal of educational data mining Vol. 1(1): pp. 3–17 (2009)

[Balacheff, 1995] Balacheff, N. : Conception, connaissance et concept. In Grenier, D. (ed) : Didactique et technologies cognitives en mathématiques, séminaires 1994-1995, pp. 219-244

[Balacheff, 1998] Balacheff N., Formalisation des connaissances et modélisation des environnements informatiques d'apprentissage humain. *In : Actes des Assises fondatrices du GDR I3*, Lyon, juin 1998.

[Balacheff & Margolinas, 2005] Balacheff, N., Margolinas, C.: cK¢ : Modèle des connaissances pour le calcul de situation didactiques. In: Mercier A. & Margolinas C. (eds.) Balises pour la didactique des mathématiques. Grenoble: Éditions La Pensée Sauvage (2005). pp. 1-32.

[Balacheff 2013] Balacheff, N. cK¢, a model to reason on learners' conceptions. Mara V. Martinez, Alison Castro Superfine. PME-NA 2013 - Psychology of Mathematics Education, North American Chapter, Nov 2013, Chicago, IL, United States. pp. 2-15

[Beck, 2007] Beck, J.E.: Difficulties in inferring student knowledge from observations (and why you should care). In: Educational Data Mining: Supplementary Proceedings of the 13th International Conference of Artificial Intelligence in Education. pp. 21–30.

[Benyon & Murray, 1993] Benyon, D. & Murray, D.: Adaptive systems: from intelligent tutoring to autonomous agents, Knowledge-Based Systems, Vol. 6(4), December 1993, pp. 197-219

[Bisseret, 1995] Bisseret A., Représentation et décision experte – Psychologie cognitive de la décision chez les aiguilleurs du ciel, Toulouse, Octarès, 1995.

[Blessing 1997] Blessing, S. B.: A programming by demonstration authoring tool for model-tracing tutors. In: International Journal of Artificial Intelligence in Education, Vol. 8, pp. 233-261

[Booker *et al.*, 1989] Booker, L. B., Goldberg, D. E., and Holland, J. H. (1989). Classifier systems and genetic algorithms. Artificial Intelligence, Vol. 40(1-3): pp. 235-282.

[Bouhineau *et al.* 2013] Bouhineau, D., Luengo, V., Mandran, N, Ortega, M., Toussaint, B.M., Wajeman, C.: Open Platform to Model and Capture Experimental Data in Technology Enhanced Learning Systems. Workshop Data Analysis and Interpretation for Learning Environments, 2013, Autrans, France

[Brousseau, 1998] Brousseau, G., Théorie des situations didactiques, Grenoble, La Pensée Sauvage éditions, 1998

[Brusilovskiy, 1994] Brusilovskiy, P.: The Construction and Application of Student Models in Intelligent Tutoring Systems. International Journal of Computer and Systems Sciences, Vol. 32(1), 1994, pp. 70-89

[Brusilovsky & Peylo, 2003] Brusilovsky, P. and Peylo, C. (2003) Adaptive and intelligent Web-based educational systems. In P. Brusilovsky and C. Peylo (eds.), *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. Vol. 13 (2-4), Special Issue on Adaptive and Intelligent Web-based Educational Systems, pp. 159-172.

[Burton & Brown, 1986] Burton, R. R., and Brown, J. S.: Toward a natural-language capability for computer-assisted instruction. In Readings in natural language processing, Barbara J. Grosz, Karen Sparck-Jones, and Bonnie Lynn Webber (Eds.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1986. San Francisco, CA, USA. pp. 605-625.

[Calmels *et al.* 2007] Calmels, V., Vallée, J.-N., Rose, M., Chiras, J.: Osteoblastic and mixed spinal metastases: evaluation of the analgesic efficacy of percutaneous vertebroplasty. In: AJNR Am J Neuroradiol. mars 2007; Vol. 28(3), pp. 570-574

[Ceaux *et al*. 2009] Ceaux, E., Vadcard, L., Dubois, M., Luengo, V.: Designing a learning environment in percutaneous surgery: models of knowledge, gesture and learning situations, Paper presented at the EARLI Symposium "Simulation-Based Learning: Analysing and Fostering Complex Skills in the Context of Medical Education", Amsterdam, August 2009.

[Cen *et al*. 2006] Cen, H., Koedinger, K., and Junker, B. 2006. Learning factors analysis - a general method for cognitive model evaluation and improvement. In Proc. of the 8th International Conference on Intelligent Tutoring Systems. pp. 164-175

[Chipman & al. 2000] Chipman, S. F., Schraagen, J. M., & Shalin, V. L.: Introduction to cognitive task analysis. In J. M Schraagen, S. F. Chipman & V. J. Shute (Eds.): Cognitive Task Analysis. pp. 3-23. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates (2000)

[Clancey, 1984] Clancey, W.: Use of MYCIN's rules for tutoring. I Buchanan, B., Shortliffe, E. H. (Eds): Coll. “Rule-Based Expert Systems. Reading”. pp. 464-489. Addison-Wesley (1984).

[Clermont *et al*. 2008] Clermont, G., Bissonnette, S., Richard, M. : Passez du paradigme d’enseignement au paradigme d’apprentissage. Les effets néfastes d’un slogan. Les Actes de la recherché. Vol. 7 (13). 2008. pp. 239-271.

[Collins *et al*. 1996] Collins, J., Greer, J., and Huang, S.: Adaptive Assessment Using Granularity Hierarchies and Bayesian Nets. In Frasson C., Gauthier G., and Lesgold A. (Eds.) Proc. of the 3rd International Conference on Intelligent Tutoring Systems, Springer-Verlag, 1996, pp. 569-577

[Conati *et al*. 1997] Conati, C., Gertner, A., Van Lehn, K., and Druzdel, M.: On-Line Student Modeling for Coached Problem Solving Using Bayesian Networks. In Kay J. (Ed.), Proc. of the 7th International Conference on User Modeling. Springer-Verlag, 1997. pp. 231-242

[Conati *et al*. 2002] Conati, C., Gertner, A.S., and VanLehn, K.: Using Bayesian Networks to Manage Uncertainty in Student Modeling. In: User Modeling and User-Adapted Interaction 12, pp. 371-417. (2002)

[Conati & Merten, 2007] Conati, C., Merten, C.: Eye-tracking for user modeling in exploratory learning environments: An empirical evaluation. In: Know.-Based Syst. Vol. 20(6) (August 2007), pp. 557-574.

[Corbett & Anderson, 1992] Corbett, A. T., Anderson, J. R.: LISP intelligent Tutoring System: Research in Skill Acquisition. In J. H. Larkin & R. W. Chabay (Eds.), Computer-Assisted Instruction and Intelligent Tutoring Systems: Shared Goals and Complementary Approaches. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers (1992). pp. 73-109

[Cottier *et al*. 2008] Cottier, P., Choquet, C., Tchounikine, P. : Repenser l’ingénierie des EIAH pour des enseignants concepteurs. In : Usages, usagers et compétences informationnelles au XXIème siècle (ed.) Jérôme Dinet. Pages 159 à 193, Lavoisier 2008.

[D’Mello & Graesser, 2007] D’Mello, S. and Graesser, A. Mind and body: Dialogue and posture for affect detection in learning environments. FAIA 158, (2007), 161.

[Dánger *et al*. 2004] Dánger, R., Ruiz-Shulcloper, J., & Berlanga, R.: Objectminer: a new approach for mining complex objects. In: Proc. of the 6th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2004), Oporto, Portugal, pp. 42–47.

[Dede, 1986] Dede, C. 1986. A review and synthesis of recent research in intelligent computer-assisted instruction.International man-machine studies, 24, 329-353.

[Dubois et al, 2010] Dubois, D., Nkambou, R., Quintal, J.-F., Savard, F.: Decision-Making in Cognitive Tutoring Systems. In: (eds) Nkambou, R., Bourdeau, J., Mizoguchi, R.: Advances in Intelligent Tutoring Systems. Studies in Computational Intelligence. Vol. 308, Ch. 8, pp. 145-179 (2010)

[Evens *et al*. 2011] Evens, M.W. *et al*. : CIRCSIM-Tutor: An Intelligent Tutoring System Using Natural Language Dialogue. In Proc. of the 12th Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference, MAICS 2001, Oxford, OH, pp. 16-23.

[Forbes-Riley *et al*. 2012] Forbes-Riley, K., Litman, D., Friedberg, H., Drummond, J.: Intrinsic and Extrinsic Evaluation of an Automatic User Disengagement. Detector for an Uncertainty-Adaptive Spoken Dialogue System. In: Proceedings of the Conference of the North American Association for Computational Linguistics (NAACL): Human Language Technologies, pp 91–102, Montreal, Canada, June 3-8, 2012.

[Fournier-Viger *et al*. 2008] Fournier-Viger, P., Nkambou, R & Mephu Nguifo, E.: A Knowledge Discovery Framework for Learning Task Models from User Interactions in Intelligent Tutoring Systems. Proceedings of the 7th Mexican International Conference on Artificial Intelligence (MICAI 2008). LNAI 5317, Springer (2008), pp. 765-778

[Fournier-Vigier, 2010] Fournier-Vigier, P.: Un modèle hybride pour le support à l'apprentissage dans les domaines procéduraux et mal définis. Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal, 2010, 229 pages.

[Fournier-Viger *et al*. 2010] Fournier-Viger, P., Nkambou, R., Mephu Nguifo, E.: Learning procedural knowledge from user solutions to ill-defined tasks in a simulated robotic manipulator. In Romero *et al*. (Eds.). Handbook of Educational Data Mining, CRC Press (2010), pp. 451-465.

[Fournier-Viger *et al*. 2011] Fournier-Viger, P., Nkambou, R., Mayers, A., Mephu Nguifo, E., Faghihi, U.: An Hybrid Expert Model to Support Tutoring Services in Robotic Arm Manipulations. In Proc. of the 10th Mexican International Conference on Artificial Intelligence. Lecture Notes on Artificial Intelligence. Vol. 7094, Springer, (2011). pp. 478–489.

[Fournier-Vigier *et al*. 2012] Fournier-Viger, P., Faghihi, U., Nkambou, R., Mephu Nguifo, E.: CMRules: Mining sequential rules common to several sequences. In: Journal Know.-Based Syst. Vol. 25(1), 2012, pp. 63–76

[Frasson & Chalfoun, 2010] Frasson, C. & Chalfoun, P.: Managing Learner's Affective States in Intelligent Tutoring Systems. In Nkambou, R., Bourdeau, J., Mizoguchi, R. (eds): Advances in Intelligent Tutoring Systems. Studies in Computational Intelligence, Vol. 308 (Chap. 17), 2010, pp. 339-358

[Graesser *et al*. 1999] Graesser, A.C., Wiemer-Hastings, K., Wiemer-Hastings, P., Kreuz, R., & the Tutoring Research Group: Auto Tutor: A simulation of a human tutor. In Journal of Cognitive Systems Research, Vol. 1. pp. 35–51.

[Graesser *et al*. 2008] Graesser, A. C., Rus, V., D'Mello, S. K., & Jackson, G. T.: AutoTutor: Learning through natural language dialogue that adapts to the cognitive and affective states of the learner. In D. H. Robinson & G. Schraw (Eds.): Recent innovations in educational technology that facilitate student learning. Information Age Publishing (2008). pp. 95-125.

[Guéraud *et al*. 1999] Guéraud, V., Pernin, J.-P., Cagnat, J.-M., Cortés, G.: Environnements d'apprentissage basés sur la simulation: outils-auteur et expérimentations. Dans Revue Sciences et Techniques Educatives, Hermès, numéro spécial "Simulation et formation professionnelle dans l'industrie", Vol. 6 (1), 1999, pp. 95-141

[Guzmán & Conejo] Guzmán, E., & Conejo, R. (2004). A Model for Student Knowledge Diagnosis Through Adaptive Testing. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3220, pp. 12-21.

[Haglin & Manning, 2007] Haglin, D. J., Manning, A. M.: On minimal infrequent itemset mining. In: Proc. of the 2007 International Conference on Data Mining (DMIN 2007), Las Vegas, Nevada, USA: CSREA Press, 200, pp. 141–147

[Hariri *et al*. 2012] Hariri, N., Mobasher, B., Burke, R.: Context-aware music recommendation based on latent topic sequential patterns. In: Proc. of the 6th ACM conference on Recommender systems (RecSys '12). ACM, New York, NY, USA, pp. 131-138.

[Hu & Chen, 2006] Hu, Y.H., Chen, Y.L.: Mining association rules with multiple minimum supports: a new mining algorithm and a support tuning mechanism, In: Decision Support Systems, Vol. 42(1), October 2006, pp. 1-24

[Jambon & Luengo, 2012] Jambon, F., Luengo, V. : Analyse oculométrique « on-line » avec zones d'intérêt dynamiques : application aux environnements d'apprentissage sur simulateur. In Actes de la Conférence Ergo'IHM sur les Nouvelles Interactions, Créativité et Usages, Biarritz France (2012)

[Javis *et al*. 2005] Jarvis, M., Nuzzo-Jones, G., Heffernan, N. T.: Applying machine learning techniques to rule generation in intelligent tutoring systems». In: Proc. of the 8th International Conference on Intelligent Tutoring Systems, Springer. pp. 541-553

[Jonnaert, 1996] Jonnaert, P :. Apprentissages mathématiques en situation : une perspective constructiviste. Revue des sciences de l'éducation, Vol. 22(2), pp. 237-238

[Jonassen & al. 1999] Jonassen, D. H., Tessmer, M., Hannum, W. H. Task analysis methods for instructional design. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates (1999).

[Jones & Sarter, 2008] Jones, L. A., Sarter, N. B.: Tactile displays: guidance for their design and application. Hum Factors: J Hum Factors Ergonom Soc. 2008. Vol. 50(1): pp. 90–111.

[Kahn *et al*. 2006] Kahn, L., Zygman, M., Rymer, W., Reinkensmeyer, D.: Robot-assisted reaching exercise promotes arm movement recovery in chronic hemiparetic stroke: a randomized controlled pilot study. J NeuroEngineering Rehabil 3(12), 2006

[Klawonn & Höppner, 2006] Klawonn, F., Höppner, F.: Equi-sized, Homogeneous Partitioning. In Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4252, 2006, pp. 70-77

[Koedinger *et al*. 1997] Koedinger, K. R. & Anderson, J. R., Hadley, W. H., Mark, M. A.: Intelligent Tutoring Goes To School in the Big City. In: International Journal of Artificial Intelligence in Education 1997, Vol. 8, pp. 30-43 (1997)

[Koedinger *et al*. 2003] Koedinger, K. R., Aleven, V., Heffernan, N. T.: Toward a Rapid Development Environment for Cognitive Tutors. In Hoppe, U., Verdejo, F., &

Kay, J. (Eds.), Proc. of the 11th International Conference on Artificial Intelligence in Education (AI-ED 2003). Amsterdam: IOS Press. pp. 455-457

[Koedinger *et al*. 2004] Koedinger, K.R., Aleven, V., Heffernan, N., McLaren, B.M., & Hockenberry, M. (2004). Opening the door to non-programmers: authoring intelligent tutor behavior by demonstration. In: Proc. of the 7th International Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS-2004). pp. 162-174

[Kum *et al*. 2006] Kum, H.G., hang, J.H., Wang, C.W.: Sequential Pattern Mining in Multi-Databases via Multiple Alignment. In: Data Mining and Knowledge Discovery, Vol. 12(2-3), May 2006, pp. 151-180

[Lach, 2013] Lach, P.: Intelligent Tutoring Systems Measuring Student's Effort During Assessment. In: Zaïane, O.R. and Zilles, S. (eds.): Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7884. Springer, Berlin Heidelberg (2013) 346-351

[Lallé & Luengo, 2011] Lalle S., Luengo V., Intégration de données haptiques brutes dans des systèmes experts de diagnostic des connaissances, Conférence Internationale Francophone sur l'Extraction et la Gestion des Connaissances, 2011.

[Larrieu *et al*. 2005] Larrieu, S., Vadcard, L., Luengo, V.: Didactical approach for the design of a learning environment for airline pilots. In: Proc. of the European Research Workshop on Understanding and Rethinking the Technology mediated workplace, 2005, Liège, Belgium

[Larrieu, S. 2008] Larrieu, S.: Utilisation des simulations pleine échelle : vécu et problématique. In: CR du 4e Séminaire sur les Jeux en Entreprise et Formation Professionnelle, Grenoble, France.

[Le & Menzel, 2008] Le, N.-T., Menzel, W.: Using Constraint-Based Modelling to Describe the Solution Space of Ill-Defined Problems for Logic Programming, In Leung, H., Li, F., Lau, R., Li, Q. (Eds): Advances in Web Based Learning – ICWL 2007. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 4823. Springer Berlin Heidelberg (2008), pp. 367-379

[Lee *et al*. 1998] Lee, W., Stolfo, S.J., Mok, K.W.: Mining audit data to build intrusion detection models, In: Proc. of the 4th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '98), New York, NY, USA, 1998, pp. 66-72

[Lee *et al*. 2005] Lee, Y.C., Hong, T.P., Lin, W.Y.: Mining association rules with multiple minimum supports using maximum constraints, In International Journal of Approximate Reasoning, Vol. 40(1–2), July 2005, pp. 44-54

[Lehmann & Murray, 2005]Lehmann, S., Murray, M. M. (2005). The role of multisensory memories in unisensory object discrimination. Cognitive Brain Research, 24, pp. 326–334.

[Li *et al*. 2001] Li, W., Han, J., Pei, J.: CMAR: Accurate and efficient classification based on multiple class-association rules. The 1st IEEE International Conference on Data Mining, San Jose, California, USA, pp. 369-376. (2001)

[Liu *et al*. 1998] Liu, B., Hsu, W., Ma, Y.: Integrating classification and association rule mining. The 4th International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, New York, USA, pp. 80-86. (1998)

[Liu *et al*. 1999] Liu, B., Hsu, W., Ma, Y.: Mining Association Rules with Multiple Minimum Supports. In: Proc. of Intl. Conf. Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'99), pp. 337–341, 1999.

[Lo *et al*. 2009] Lo, D., Khoo, S.C., Wong, L.: Non-Redundant Sequential Rules-Theory and Algorithm. In: Information Systems Vol. 34(4-5), 2009, pp. 438–453

[Luengo *et al*. 2004] Luengo V., Mufti-Alchawafa D., Vadcard L.. The knowledge like the object of interaction in an orthopaedic surgery-learning environment, ITS 2004, 7th International Conference on Intelligent Tutoring Systems, 30 août - 3 septembre 2004, Maceio, Brésil.

[Luengo *et al*. 2006] Luengo V., Vadcard L., Dubois M., Mufti-Alchawafa D., TELEOS : de l'analyse de l'activité professionnelle à la formalisation des connaissances pour un environnement d'apprentissage. Actes de la conférence « Ingénierie de Connaissances », IC 2006, Nantes, Juin 2006.

[Luengo *et al*. 2011 (a)] Luengo, V., Larcher, A., Tonetti, J.: Design and implementation of a visual and haptic simulator in a platform for a TEL system in percutaneous orthopedic surgery. In Medicine Meets Virtual Reality 18. (eds.): Westwood J.D., Vestwood, S.W. (2011) 324–328

[Luengo *et al*. 2011 (b)] Luengo, V., Vadcard, L., Tonetti, J., Dubois, M.: Diagnostic des connaissances et rétroaction épistémique adaptative en chirurgie. Revue d'Intelligence Artificielle, Lavoisier (Hermes Science Publications), 2011, Vol 25(4), pp.499-524.

[Lynch *et al*. 2006] Lynch, C., Ashley, K., Aleven, V., Pinkwart, N.: Defining Ill-Defined Domains: A literature survey. In: Proc. Intelligent Tutoring Systems for Ill-Defined Domains Workshop, ITS 2006, pp. 1–10, Jhongli, Taiwan

[Madan Kumar *et al*. 2012] Madan Kumar, K.M.V., Srinivas, P.V.S., Raghavendra Rao, C.: Sequential Pattern Mining With Multiple Minimum Supports by MS-SPADE. In: International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), Vol. 9, Issue 5, No 1, September 2012, pp. 285-292

[Maguet, 2012] Maguet, E.: Modèle de feedback pour l'apprentissage des connaissances perceptivo-gestuelles en chirurgie orthopédique. Mémoire de stage de Master 2 Recherche à l'École Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB). Laboratoire d'Informatique de Grenoble.

[Mandran *et al*. 2015 (a)] Mandran, N., Ortega, M., Luengo, V, Bouhineau, D.: DOP8: merging both data and analysis operators life cycles for technology enhanced learning. In: Proc. of the Fifth International Conference on Learning Analytics And Knowledge (LAK '15). ACM, New York, NY, USA, pp. 213-217. DOI=10.1145/2723576.2723580

[Mandran *et al*. 2015 (b)] Mandran, N., Luengo, V., Gillois, P.: DOP8_Qpp : Data quality criteria to manage pre-processing of data. (to be published)

[Marcus & McDermott, 1989] Marcus, S., McDermott, J.: SALT: A Knowledge Acquisition Language for Propose-and-Revise Systems, 1989

[Marchal-Crespo & Reinkensmeyer, 2008] Marchal-Crespo, L., Reinkensmeyer, D.J.: Haptic guidance can enhance motor learning of a steering task, In: J Mot Behav. Nov 2008; Vol. 40(6), pp. 545-556.

[Marchal-Crespo *et al*. 2010] Marchal-Crespo, L., McHughen, S., Cramer SC, Reinkensmeyer DJ: The effect of haptic guidance, aging, and initial skill level on motor learning of a steering task. In: Exp Brain Res. 2010 Mar; Vol. 201(2): pp. 209-220. doi: 10.1007/s00221-009-2026-8. Epub 2009 Oct 10.

[Marshall, 2002] Marshall, S.P.: The Index of Cognitive Activity: measuring cognitive workload. In Proc of the 2002 IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants, (2002), pp. 75-79

[Martin, 2001] Martin, B. I.: Intelligent tutoring systems: the practical implementation of constraint-based modelling. Thèse de doctorat en informatique. University of Canterbury. 228 pages. 2001

[Mathews *et al*. 2012] Mathews, M., Mitrovic, A., Lin, B., Holland, J., Churcher, N.: Do Your Eyes Give It Away? Using Eye Tracking Data to Understand Students' Attitudes towards Open Student Model Representations. In: Cerri, S.A., Clancey, W.J., Papadourakis, G., Panourgia, K. (eds.): Intelligent Tutoring Systems. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7315. Springer, Berlin Heidelberg (2012) pp. 422-427

[Matsuda et al 2007] Matsuda, N., Cohen, W. W., Sewall, J., Lacerda, G., Koedinger, K. R.: Predicting students' performance with simstudent: Learning cognitive skills from observation. In: Proc. of the 13th International Conference on Artificial Intelligence in Education. IOS Press. pp. 467-478 (2007)

[Mayo *et al*. 2000] Mayo, M., Mitrovic, A., and McKenzie J.: CAPIT: An Intelligent Tutoring System for Capitalisation and Punctuation. In Kinshuk, Jesshope C. and Okamoto T. (Eds.) Advanced Learning Technology: Design and Development Issues, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society (ISBN 0-7695-0653-4), 2000. pp. 151-154.

[Mayo & Mitrovic, 2000] Mayo, M. and Mitrovic, A.: Using a Probabilistic Student Model to Control Problem Difficulty. In Gauthier G., Frasson C., and VanLehn K. (Eds.), Proc. of 5th International Conference on Intelligent Tutoring Systems, Springer-Verlag, 2000. pp. 524-533

[Mayo & Mitrovic, 2001] Mayo, M., & Mitrovic A. Optimising ITS Behaviour with Bayesian Networks and Decision Theory. International Journal of Artificial Intelligence in Education, 2001, Vol. 12. pp. 124–153.

[McLaren *et al*., 2004] McLaren, B. M., Koedinger, K. R., Schneider, M., Harrer, A., Bollen, L.: Bootstrapping novice data: Semi-automated tutor authoring using student log files. In: Proc. of the Workshop on Analyzing Student-Tutor Interaction Logs to Improve Educational Outcomes, held at the International Conference on ITS 2004

[van Merriënboer, 1997] van Merriënboer, J. J. G.: Training complex cognitive skills: A four-component instructional design model for technical training. Englewood Cliffs, NJ: Educational Technology Publications (1997).

[Minh Chieu *et al*. 2010] Minh Chieu, V., Luengo, V., Vadcard, L.: Student Modeling in Orthopedic Surgery Training: Exploiting Symbiosis between Temporal Bayesian Networks and Fine-grained Didactical Analysis. In International Journal of Artificial Intelligence in Education, 2010, Vol. 20(3). 33 pages

[Mislevy & Gitomer, 1995] Mislevy, R.J. & Gitomer, D.H.: The role of probability-based inference in an intelligent tutoring system. In User Modeling and User-Adapted Interaction. 1995, Vol. 5(3-4). pp 253-282

[Mithalal, 2010] Joris Mithalal. Déconstruction instrumentale et déconstruction dimensionnelle dans le contexte de la géométrie dynamique tridimensionnelle. Thèse de doctorat en mathématique. 427 pages. Université de Grenoble, 2010.

[Mitrovic, 1998] Mitrovic, A.: Experiences in Implementing Constraint-Based Modeling in SQL-Tutor. In: Goettl, B. P., Halff, H. M., Redfield, C. L. and Shute, V. J. (Eds.), Proc. of the 4th International Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS 1998), San Antonio, Texas, Springer, pp. 414-423.

[Mitrovic, *et al*. 2001] Mitrovic, A., Mayo, M., Suraweera, P. and Martin, B. 2001. Constraint-based tutors: a success story. In Proc. of the 14th Industrial & Engineering

Application of Artificial Intelligence & Expert Systems, Budapest, Hungary, June 4-7, 931-940.

[Mitrovic, *et al*. 2003] Mitrovic, A., Koedinger, K. R., Martin, B.: A Comparative Analysis of Cognitive Tutoring and Constraint-Based Modeling. In Brusilovsky, P., Corbett, A., de Rosis, F. (eds): User Modeling 2003. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 2702, Springer Berlin Heidelberg (2003) pp. 313-322

[Mitrovic, 2010] Mitrovic, A.: Modeling Domains and Students with Constraint-Based Modeling. In Nkambou, R., Bourdeau, J., Mizoguchi, R. (eds): Advances in Intelligent Tutoring Systems. Studies in Computational Intelligence, Vol. 308 (Chap. 4), 2010, pp. 63-80

[Moritz, 2008] Moritz, S.: Generating and Evaluating Object-Oriented Designs in an Intelligent Tutoring System. Thèse de doctorat en informatique, Lehigh University, 193 pages

[Moritz & Blank, 2008] Moritz, S., Blank, G.: Generating and Evaluating Object-Oriented Design for Instructors and Novice Students. In.: Proc. ITS for Ill-Defined Domains Workshop, ITS 2008, Montreal, Canada (2008)

[Morisette, 2002] Morisette, R. : Accompagner la construction des savoirs. Montréal : Éditions Chenelière McGraw-Hill. (2002)

[Mufti-Alchawafa *et al*. 2006] Mufti-Alchawafa, D., Luengo, V., Vadcard, L.: Didactic Decision-Making Process in a Surgery Learning Environment. Dans *Actes des 3ème Journées Francophones sur les Réseaux Bayésiens JFRB'06*. Valenciennes, France, (2006)

[Mufti-Alchawafa & Luengo, 2009] Mufti-Alchawafa D., Luengo V., Design Implementation and computer validation of didactical decision model in a learning environment for ortopaedic, In: Intelligent Support for Exploratory Environments. 14th International Conference on Artificial Intelligence in Education, Brighton 2009.

[Muggleton & de Raedt, 1994] Muggleton, S. and de Raedt, L.: Inductive logic programming: Theory and methods. Journal of Logic Programming, 1994, Vol. 19, pp. 629–679.

[Muldner *et al*. 2009] Muldner, K., Atkinson, R., and Burleson, W.: Investigating the utility of eye-tracking information on affect and reasoning for user modeling. UMAP, (2009), 138–149.

[Mulgund *et al*. 1995] Mulgund, S.S., Asdigha, M., Zacharias, G. L., Ma, C., Krishnakumar, K., Dohme, J.A., Al, R.: Intelligent Tutoring System for Simulator-Based Helicopter Flight Training. Flight Simulation Technologies Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics Baltimore MD U.S.A. (1995)

[Nathan et al 2001] Nathan, M., Koedinger, K., Alibali, M.: Expert blind spot: When content knowledge eclipses pedagogical content knowledge. Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association, Seattle.

[Newell and Simon, 1995] Newell, A. and Simon, H. A.: Gps, a program that simulates human thought. In Luger, G. F. (Ed): Computation and Intelligence, Collected Readings. Ch. 16, pp. 415–428. AAAI, and MIT Press.

[Nguyen *et al*. 2013] Nguyen, T.T.L. , Vo, B., Hong, T.P., Thanh, H.C.: CAR-Miner: An efficient algorithm for mining class-association rules. In: Expert Systems with Applications, Vol. 40(6), May 2013, pp. 2305-2311.

[Nwana, 1990] Nwana, H. S.: Intelligent tutoring systems: An overview. Artificial Intelligence Review, Vol. 4, pp. 251-277. (1990)

[O'Malley *et al*. 2006] O'Malley, M., Gupta, A., Gen, M., Li, Y.: Shared control in haptic systems for performance enhancement and training. J Dyn Syst Meas Control. 2006. Vol. 128: pp. 75–85

[Ogan *et al*. 2006] Ogan, A., Wylie, R., Walker, E.: The challenges in adapting traditional techniques for modeling student behavior in ill-defined domains. In: Proc. Intelligent Tutoring Systems for Ill-Defined Domains Workshop (2006)

[Ohlsson, 1994] Ohlsson, S.: Constraint-Based Student Modeling. In Student Modeling: The Key to Individualized Knowledge-Based Instruction. Greer, J. and McCalla, G. (Eds.), New York, Springer-Verlag, pp. 167-189.

[Ohlsson, 1996] Ohlsson, S.: Learning from Performance Errors. Psychological Review. Vol. 3(2), pp. 241-262.

[Ormerod, 2006] Ormerod, T. C.: Planning and ill-defined problems. Chapter in R. Morris and G. Ward (Eds.): The Cognitive Psychology of Planning. London: Psychology Press (2006).

[Paquette *et al*. 2012] Paquette, L., Lebeau, J. F., Beaulieu, G., Mayers, A.: Automating Next-Step Hints Generation Using ASTUS. In Cerri, S. A., Clancey, W. J., Papadourakis, G., Panourgia, K. (eds): Intelligent Tutoring Systems. Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, Vol. 7315, 2012, pp. 201-211

[Pastré, 2002] Pastré, P.: L'analyse du travail en didactique professionnelle, In : Revue Française de Pédagogie, n°138, 2002, pp. 9-17.

[Pei et al, 2004] Pei, J., Han, J., Mortazavi-Asl, B., Wang, J., Pinto, H., Chen, Q., Dayal, U.; Hsu, M.C.: Mining sequential patterns by pattern-growth: the PrefixSpan approach. In: IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 16(11), pp. 1424-1440, Nov. 2004. doi: 10.1109/TKDE.2004.77

[Pekrun *et al*. 2002] Pekrun, R., Goetz, T., Titz, W., and Perry, R.P. Academic emotions in students' self-regulated learning and achievement: A program of qualitative and quantitative research. Educational psychologist. Vol. 37(2). (2002). pp. 91–105.

[Pesty *et al*. 2003] Pesty, S., Webber, C., Balacheff, N.: Baghera: une architecture multi-agents pour l'apprentissage humain. Dans P. Aniorte, S. Gouarderes (eds): Cognitique: vers une informatique plus cognitive et sociale. Cepadeus Edition, Toulouse, 2003.

[Pinto *et al*. 2001] Pinto, H., Han, J., Pei, J., Wang, K., Chen, Q., Dayal, U.: Multidimensional sequential pattern mining. In Proc. of the 10th International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM 2001), pp. 81-88

Prendinger, H. and Ishizuka, M. The empathic companion: A character-based interface that addresses users' affective states. APAI 19, 3-4 (2005), 267–285.

[Porter *et al.*, 1990] Porter, B. W., Bareiss, R., and Hlote, R. C. (1990). Concept learning and heuristic classification in weak-theory domains. Artificial Intelligence, Vol. 45(3):229-263.

[Rabatel *et al*. 2012] Rabatel, J., Bringay, S., Poncelet, P.: Mining Sequential Patterns: A Context-Aware Approach. Studies in Computational Intelligence. In Advances in Knowledge Discovery and Management (eds): Guillet, Fabrice and Pinaud, Bruno and Venturini, Gilles and Zighed, Djamel Abdelkader, Vol. 471, Springer Berlin Heidelberg, (2013), 23-41

[Remolina *et al*. 2004] Remolina, E., Ramachandran, S., Fu, D., Stottler, R., Howse, W. R.: Intelligent Simulation-Based Tutor for Flight Training. In: Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference (2004). pp. 1-13

[Reye, 1998] Reye, J.: Two-Phase Updating of Student Models Based on Dynamic Belief Networks. In Goettle B., Halff H., Redfield C., and Shute V. (Eds.) Proc. of the 4th International Conference on Intelligent Tutoring Systems, Springer-Verlag, 1998. pp. 274-283

[Riccuci *et al*. 2007] Riccuci, S., Carbonaro, A., Casadei, G.: Knowledge acquisition in intelligent tutoring system: A data mining approach ». In: Proc. of the 6th Mexican Conference on Artificial Intelligence, pp. 1195-1205 (2007)

[Rich & Knight, 1991] Rich, E., Knight, K.: Artificial Intelligence. McGraw Hill, 1991. Ch. 20.4 : Knowledge Acquisition.

[Rios *et al*. 2000] Ríos, H.V., Solís, A.L., Aguirre, E., Guerrero, L., Peña, J., Santamaría, A.: Facial Expression Recognition and Modeling for Virtual Intelligent Tutoring Systems. In: Cairó, O., Sucar, L.E., Cantu, F.J. (Eds.): Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1793. Springer, Berlin Heidelberg (2000), pp. 115-126

[Rivers & Koedinger, 2014] Rivers, K. and Koedinger, K.R.: Automating Hint Generation with Solution Space Path Construction. In *Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Tutoring Systems* (pp. 329-339).

[Rodríguez-González *et al*. 2008] Rodríguez-González, A. Y., Martínez-Trinidad, J. F., Carrasco-Ochoa, J. A., & Ruiz-Shulcloper, J. (2008). Mining frequent similar patterns on mixed data. In J. Ruiz-Shulcloper & W. Kropatsch (Eds.), Progress in Pattern Recognition. Image Analysis and Applications, LNCS, Vol. 5197, 2008, pp. 136–144. Berlin, Germany: Springer-Verlag.

[Rodríguez-González *et al*. 2013] Rodríguez-González, A.Y., Martínez-Trinidad, J.F., Carrasco-Ochoa, J.A., José Ruiz-Shulcloper, J.: Mining frequent patterns and association rules using similarities. In: Expert Systems with Applications, Vol. 40, 2013, pp. 6823–6836

[Romero & Ventura, 2007] Romero, C., Ventura, S.: Educational data mining: A survey from 1995 to 2005. Expert Systems with Applications, VOl. 33(1): pp. 135–146 (2007)

[Romero & Ventura, 2010] Romero, C., Ventura, S.: Educational data mining: a review of the state of the art. In: Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and reviews, IEEE transactions on Vol. 40(6): pp. 601–618 (2010)

[Schneider, 2011] Schneider, W. (2011). Memory development in childhood. In U. Goswami (Ed.), The Wiley-Blackwell handbook of childhood cognitive development (2nd ed.), pp. 357 – 367. London: Wiley.

[Seitz *et al*. 2006] Seitz, A. R., Kim, R., Shams, L. (2006). Sound facilitates visual learning. Curr. Biol. 16, 1422–1427.

[Self, 1987] Self, J.: User modelling in open learning systems. In:, Tutoring and Monitoring Facilities for European Open Learning. J. Whiting and D. Bell (Eds.). 1987, Elsevier: Amsterdam.

[Shams & Seitz, 2008] Shams L, Seitz AR. (2008) Benefits of multisensory learning. Trends Cogn Sci. Nov; 12(11):411-417.

[Sigrist *et al*. 2012] Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., Wolf, P.: Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review. In Psychon Bull Rev (2013) Vol. 20. 7 November 2012. pp. 21–53]

[Simon, 1973] Simon, H.: The structure of ill-structured problems. Artificial Intelligence, 1973, Vol. 4: pp. 181-201.

[Sison & Shimura, 1998] Sison, R. & Shimura, M.: Student Modeling and Machine Learning. In International Journal of Artificial Intelligence in Education. 1998. Vol. 9, pp. 128-158

[Skinner, 1999] Skinner D., Introduction to Decision Analysis, Gainesville, Probabilistic Publishing (1999)

[Smilek *et al.* 2010] Smilek, D., Carriere, J.S., and Cheyne, J.A. Out of Mind, Out of Sight Eye Blinking as Indicator and Embodiment of Mind Wandering. Psych. Sci. 21, 6 (2010), 786–789.

[Solís *et al.* 1999] Solís, A. L., Ríos, H. Guerrero, L., Peña, J., Castro, J.: Gesture Analysis and Synthesis for Intelligent Tutoring Systems. In III Conference on Virtual and Intelligent Environments Workshop, University of Houston-Downtown, Houston (TX), USA (1999)

[Songram *et al.*] Songram, P., Boonjing, V., Intakosum, S.: Closed Multidimensional Sequential Pattern Mining. In: Proc. of the Third International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG 2006). Las Vegas (NV), IEEE, pp. 512 - 517. DOI: 10.1109/ITNG.2006.41

[Steichen *et al.* 2013] Steichen, B., Carenini, G., Conati, C.: User-adaptive information visualization: using eye gaze data to infer visualization tasks and user cognitive abilities. In: Proceedings of the 2013 Int. Conf. on Intelligent User Interfaces. ACM, New York NY USA (2013) 317-328.

[Stern *et al.* 1999] Stern, M., Beck, J., and Woolf, B.: Naïve Bayes Classifiers for User Modeling. In Proceedings of the 7th International Conference on User Modeling, 1999, Banff, Canada

[Suraweera & Mitrovic, 2001] Suraweera, P. and Mitrovic, A.: Designing an Intelligent Tutoring System for Database Modelling. In Smith, M. J. and Salvendy, G. (Eds.), Proc. of the 9th Int. Conf Human-Computer Interaction International (HCII 2001), New Orleans, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 745-949.

[Suraweera *et al.* 2005] Suraweera, P., Mitrovic, A., Martin, B.: A knowledge acquisition system for constraint-based intelligent tutoring systems. In: Proceedings of the 12th International Conference on Artificial Intelligence in Education, pp. 638-645. IOS Press (2005)

[Szathmary *et al.* 2007] Szathmary, L., Napoli, A., Valtchev, P.: Towards Rare Itemset Mining. In: Proc. of the 19th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI '07), Oct 2007, Patras, Greece, pp. 305-312

[Tan *et al.*, 2006] Tan, P.N., Steinbach, M., Kumar, V.: Introduction to Data Mining. 2006, (ed): Pearson, Cloth, 769 pp. ISBN-10: 0321321367, ISBN-13: 9780321321367

[Tardif, 1993] Tardif, J. : L'évaluation dans le paradigme constructiviste. In René Hivon (ed) : L'évaluation des apprentissages. Réflexions, nouvelles tendances et formation. Université de Sherbrooke.

[Tardif, 1998] Tardif, J. : Intégrer les nouvelles technologies de l'information. Quel cadre pédagogique? Collection Pratiques & enjeux pédagogiques. Paris: ESF Éditeur

[Teodorescu *et al*. 2013] Teodorescu, K., Bouchigny, S., Korman, M.: Training haptic stiffness discrimination: time course of learning with or without visual information and knowledge of results. In Hum Factors. Vol. 55(4). 2013 Aug, pp 830-840

[Thonangi & Pudi, 2005] Thonangi, R., Pudi, V.: ACME: An associative classifier based on maximum entropy principle. The 16th International Conference Algorithmic Learning Theory, LNAI 3734, Singapore, pp. 122-134. (2005)

[Tonetti, 2003] Tonetti, J.: Réalisation d'outils de réalité augmentée – apprentissage, simulation et guidage de gestes en chirurgie du bassin, Thèse de l'Université Joseph Fourier, 2003.

[Tonetti *et al*. 2009] Tonetti J., Vadcard L., Girard P., Dubois M., Merloz P., Troccaz J., Assessment of a percutaneous iliosacral screw insertion simulator. In: Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research 95, pp. 471-477, 2009.

[Tonetti *et al*. 2010] Tonetti J., Larcher A., Luengo V., Ceaux E., Vadcard L., Dubois M., A simulator for learning percutaneous orthopaedic surgery. *Computer Assisted Orthopaedic Surgery*, CAOS 2010.

[Toussaint *et al*. 2014] Toussaint, B.M., Luengo, V., and Tonetti, J.: Towards Using Similarity Measure for Automatic Detection of Significant Behaviors from Continuous Data. In: Proceedings of the 7th International Conference on Educational Data Mining (EDM 2014), July 2014. London, UK. pp. 427-428

[Vadcard, 2003] Vadcard L., A pedagogical strategy for VOEU (Virtual Orthopedics European University), *Final Deliverable (35.07) of the VOEU European Project (IST-1999-13079), accepted by the European Commission, http://vou-caos.vitamib.com/*, 2003.

[Vadcard & Luengo, 2005] Vadcard, L., Luengo, V.: Réduire l'écart entre formations théorique et pratique en chirurgie : conception d'un EIAH. 2005. <hal-00005655>

[Vadcard *et al*. 2009] Vadcard, L., Dubois, M., Tonetti, J., Luengo, V.: Transmission de l'expérience en chirurgie percutanée : analyse cognitive et conception d'outils de formation. 1er colloque international de l'association Recherches et Pratiques en Didactique Professionnelle DidaPro, 2, 3 et 4 décembre 2009, Dijon – France

[Vergnaud, 1990] Vergnaud, G. : La théorie des champs conceptuels. Recherches en Didactique des Mathématiques, 10(2.3):133–170.

[Vo & Le, 2008] Vo, B., Le, B.: A novel classification algorithm based on association rule mining. The 2008 Pacific Rim Knowledge Acquisition Workshop (Held with PRICAI'08), LNAI 5465, Hanoi, Vietnam, pp. 61-75. (2008)

[Voss & Post, 1988] Voss, J. F., Post, T. A.: On the Solving of Ill-Structured Problems, ch. 9. Lawrence Erlbaum Associates: Hillsdale New Jersey (1988)

[Wang *et al*. 2006] Wang, H., Chignell, M., and Ishizuka, M. Empathic tutoring software agents using real-time eye tracking. ETRA, (2006), 73–78.

[Webb, 1995] Webb, G.I.: OPUS: An Efficient Admissible Algorithm For Unordered Search. Journal of Artificial Intelligence Research 3. Menlo Park, CA: AAAI Press, 1995, pp. 431-465

[Weevers *et al*. 2003] Weevers, I., Kuipers, J., Brugman, A.O., Zwiers, J., van Dijk, E.M.A.G., Nijholt, A.: The Virtual Driving Instructor, Creating Awareness in a Multi-Agent System. In: Xiang, Y., Chaib-Draa, B. (eds.): Proceedings of the 16th Canadian society for computational studies of intelligence conference on Advances in artificial intelligence. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2003) 596-602.

[Weiß, 2008] Weiß, C. H.: Statistical mining of interesting association rules. In Statistics and Computing, Vol. 18(2), June 2008, pp. 185-194

[Wenger, 1987] Wenger, E. : Artificial Intelligence and Tutoring Systems: Computational and Cognitive Approaches to the Communication of Knowledge. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, Los Altos, USA, 1987

[Wilkins, 1991] Wilkins, D. C.: A Framework for Integration of Machine Learning and Knowledge Acquisition Techniques. In Proc. of the 6th Banff Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems Workshop, Banff, Alberta, Canada, 1991

[de Winter *et al*. 2008] de Winter, J.C.F., de Groot, S., Dankelman, J., Wieringa, P.A., van Paassen, M.M., Mulder, M.: Advancing simulation-based driver training: lessons learned and future perspectives. In Proceedings of the 10th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services. ACM, New York NY USA (2008) 459-464.

[Xiong *et al*. 2006] Xiong, H., Pandey, G., Steinbach, M., Kumar, V.: Enhancing data analysis with noise removal, In IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 18(3), pp.304-319, March 2006

[Zhou *et al*. 2012] Zhou, M., Tse, S., Derevianko, A., Jones, D.B., Schwaitzberg, S.D., Cao, C.G.: Effect of haptic feedback in laparoscopic surgery skill acquisition. In Surg Endosc. Vol. 26(4). 2012 Apr. pp. 1128-1134. doi: 10.1007/s00464-011-2011-8

[Zimmerman, 2000] Zimmerman, B.J. Self-efficacy: An essential motive to learn. Contemporary educational psychology 25, 1 (2000), 82–91.

# ANNEXES

# ANNEXE A. GLOSSAIRE

Liste et définition de certains concepts utilisés tout au long du manuscrit.

**Action (ponctuelle) :** le terme action désigne une manipulation précise de l'interface d'un Système Tutoriel Intelligent. Dans notre cas d'étude, une action dite ponctuelle fait référence à une action ne faisant pas intervenir d'habileté motrice spécifique. Par exemple, la prise d'une radio (par une clique sur l'interface) est une action ponctuelle.

**Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain (EIAH) :** Un EIAH désigne de manière générale un système informatique dont l'objectif est de guider l'apprentissage dans un domaine.

**Fixation :** le terme « fixation » fait référence à une visualisation au sens large, ne ciblant pas spécifiquement une zone ou un point d'intérêt.

**Geste :** un geste est une action particulière faisant appel à des habiletés motrices. Il peut éventuellement inclure la manipulation d'un outil. Dans notre cas d'étude, les gestes considérés font références à la manipulation du trocart (outil chirurgical)

**Interaction :** se réfère d'une manière générale à l'activité de l'apprenant avec le Système Tutoriel Intelligent. Le terme inclut les actions ponctuelles, les gestes et les visualisations. Le terme fait aussi référence, dans notre proposition de formalisation des séquences (Cf. Chapitre 6), aux « actions » du système en réponse à l'activité de l'apprenant.

**Item :** Un item est une unité d'information contenue dans une séquence. Dans le cadre de cette thèse, il fait référence, à une interaction et peut être une action ponctuelle, une perception ou un geste.

**Itemset :** Un itemset est un ensemble d'items. Dans notre travail, un itemset regroupe des unités d'interaction (items) simultanées.

**Perception :** Ce terme fait référence à la prise d'information, par le biais d'un sens, de manière non fortuite, guidée par une connaissance précise de l'environnement. Par exemple, nous parlons de perception visuelle en faisant référence aux visualisations des radiographies par le chirurgien pour vérifier ses actions et gestes.

**Point d'intérêt :** point précis de l'interface ou d'une zone d'intérêt de l'interface du Système Tutoriel Intelligent dont la visualisation est enregistrée par un oculomètre. Sa visualisation est considérée pertinente pour l'analyse des interactions de l'apprenant.

**Séquence :** fait référence à une suite d'itemsets temporellement ordonnés.

**Service tutoriel :** fonctionnalité dédié au guidage de l'apprentissage dans un EIAH

**Système Tutoriel Intelligent (STI) :** EIAH intégrant des paradigmes de l'intelligence artificielle dans le but d'offrir des services tutoriels adaptés au profil de l'apprenant.

**Transaction :** fait référence à un ensemble d'itemsets dont la temporalité n'est pas prise en compte.

**Visualisation :** comportement lié aux prises d'informations visuelles sur des points précis de l'environnement : les zones d'intérêts et les points d'intérêt.

**Zone d'intérêt :** une zone d'intérêt ou *Area Of Interest* (AOI) en anglais, est une section de l'interface du Système Tutoriel Intelligent dont la visualisation est enregistrée par un oculomètre. Leur visualisation est considérée pertinente pour l'analyse des interactions de l'apprenant.

# ANNEXE B. ACRONYMES

La signification d'acronymes utilisés dans le document.

**AOI** : **A**rea **O**f **I**nterest

**CBM** : **C**onstraint-**B**ased **M**odeling

**cK¢** : **C**onception, **K**nowing, **C**oncept

**EIAH** : **E**nvironnement **I**nformatique pour l'**A**pprentissage Humain

**PeTRA** : **PE**rceptual-Gestural Treatment **TRA**ces Framework

**PhARules** : **PH**ase-**A**ware **Rules** extractor

**POI** : **P**oint **O**f **I**nterest

**STI** : **S**ystème **T**utoriels **I**ntelligents

**TELEOS** : **T**echnology-**E**nhanced **L**earning **E**nvironment for **O**rthopedic **S**urgery

# ANNEXE C. QUESTIONNAIRE D'EVALUATION DES REGLES EXTRAITES PAR PHARULES

Questionnaire d'évaluation de patterns de connaissances perceptivo-gestuelles en vertébroplastie

| PROFIL | |
|---|---|
| Nom complet (facultatif) : | |
| Spécialité<br>☐ *Chirurgien orthopédiste* enseignant<br>☐ *Chirurgien orthopédiste* non enseignant<br>☐ *Chirurgien* autre spécialité *(Spécialité : _____)*<br>☐ *Interne (Spécialité : _____)*<br>☐ *Externe*<br>☐ *Autre* | |
| Avez-vous déjà pratiqué une vertébroplastie ? | ☐ *Oui* ☐ *Non* |
| Si oui, combien en avez-vous effectué ? | ☐ *-20* ☐ *+20* |
| Connaissez-vous le simulateur TELEOS ? | ☐ *Oui* ☐ *Non* |
| Avez-vous déjà utilisé le simulateur TELEOS ? | ☐ *Oui* ☐ *Non* |

## Introduction

TELEOS est un simulateur de chirurgie orthopédique percutanée qui permet à des internes de s'entrainer à la réalisation de certains gestes chirurgicaux notamment les réglages du fluoroscope, le traçage des repères cutanés et la manipulation du trocart. La performance des internes au cours d'une simulation est évaluée par la machine sur la base de leurs actions enregistrées sous forme de traces d'activité. Les perceptions visuelles utilisées pour vérifier ou valider les actions exécutées sont aussi enregistrées.

Les traces enregistrées permettent de modéliser aussi les connaissances du domaine. Pour ce faire, des algorithmes extraient des scénarios d'actions fréquemment répétées ainsi que les perceptions visuelles associées à l'exécution de ces actions. Cependant, la fréquence n'est pas une mesure suffisante pour marquer l'intérêt d'un scénario.

## Objectif de l'étude

Cette étude est réalisée pour évaluer des scénarios fréquents extraits à partir des traces de 9 simulations de vertébroplastie dont 5 sur la 11$^{e}$ vertèbre thoracique et 4 sur la 12$^{e}$ vertèbre thoracique. Chaque scénario comporte des actions, les perceptions visuelles associées à l'exécution de ces actions et dans certains cas, la position des outils utilisés (fluoroscope, trocart) pour l'exécution de ces actions. On rapporte également les conséquences observées à chaque fois qu'un scénario se produit.

En résumé, il s'agit d'évaluer l'intérêt des scénarios avec les conséquences qu'ils produisent. Cette évaluation vise à estimer leur intérêt sur la base de leur réutilisabilité, leur originalité et leur intérêt pédagogique du point de vue des experts du domaine. Nous voulons par la même occasion évaluer l'intérêt de la présence des visualisations et de l'état des outils dans ces scénarios. En d'autres mots, nous voulons aussi évaluer si, selon l'expert, l'énoncé des visualisations et de l'état des outils dans un scénario à un impact sur l'intérêt estimé de ce scénario.

La réutilisabilité se définit par la possibilité d'exploiter le scénario dans un objectif quelconque. Dans le cadre de cette étude, l'objectif considéré est la possibilité d'exploiter le scénario dans un but pédagogique. L'originalité exprime l'apport du scénario soit parce qu'il est totalement inédit soit parce qu'il apporte de la précision ou de la pertinence à un scénario courant pour l'expert. L'intérêt pédagogique estime l'utilité et la pertinence du contenu du scénario dans un contexte d'apprentissage.

Les résultats de l'étude permettront de déterminer les scénarios à modéliser et intégrer au simulateur pour en améliorer les fonctionnalités didactiques.

Instructions

Tel qu'illustré dans l'exemple ci-dessous, les scénarios sont présentés dans ce questionnaire sous la forme d'une brève fiche d'exécution. Il est demandé à l'expert d'évaluer chaque scénario sur une échelle de 1 à 5. *1=Très faible* ; *2=Faible* ; *3=Neutre* ; *4=Fort* ; *5=Très fort*. Les paramètres d'évaluation sont les suivants :

- *l'intérêt pédagogique*
- *La réutilisabilité*
- *l'originalité*
- *la pertinence des visualisations*
- *la pertinence de l'état des outils (le cas échéant)*

Il est donné à l'expert la possibilité d'ajouter si souhaité, des notes supplémentaires sur ses évaluations.

Exemple de scénario à évaluer :

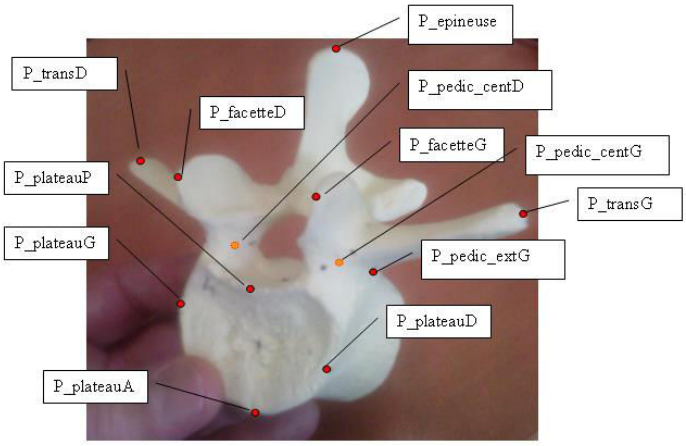
*Phase d'insertion.* L'interne déplace le trocart vers la gauche puis enfonce le trocart vers le haut. Le trocart a une inclinaison crâniale. Sur la radio de face, l'interne visualise le positionnement de la limite caudale du pédicule droit, de la limite caudale du pédicule gauche et du centre du pédicule gauche.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* L'interne visualise le positionnement du trocart sur le patient. Sur la radio de face : l'inclinaison du trocart dans l'axe sagittal en direction du corps vertébral est **incorrect***[9] ; le point de contact osseux entre le processus transverse et la facette de l'arc interneural est **incorrect****[10]**.**

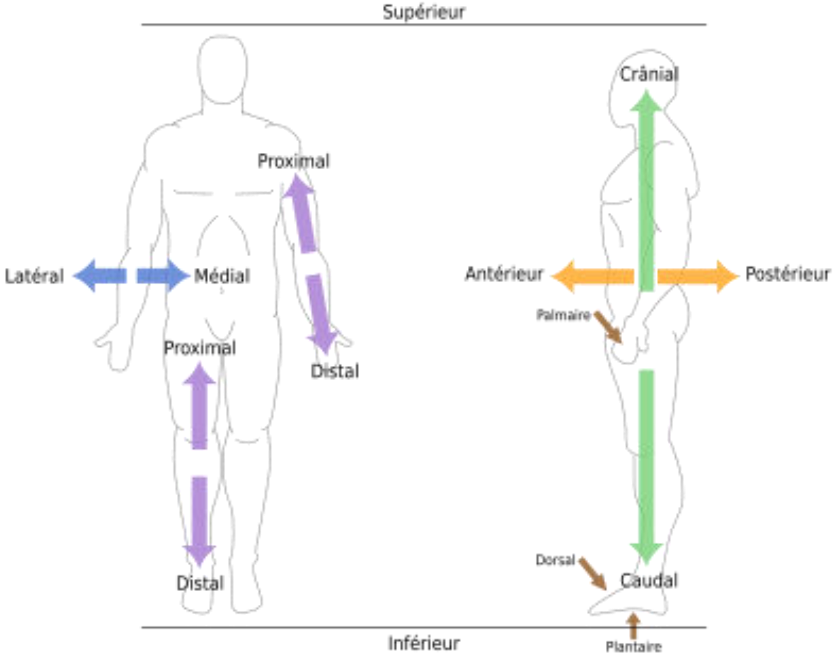
| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | X | |
| **Originalité** | | | X | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | X |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | X | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | **X** | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

[9] Incorrect* : désigne une position incorrecte avec un rapprochement vers la position correcte
[10] Incorrect** : désigne une position incorrecte avec un éloignement de la position correcte

| Points | Description |
|---|---|
| P_transD | Processus transverse droit (limite externe) |
| P_transG | Processus transverse gauche (limite externe) |
| P_facetteD | Articulation facettaire supérieure droite |
| P_facetteG | Articulation facettaire supérieure gauche |
| P_pedic_caudalD | Pédicule droit (caudal) |
| P_pedic_caudalG | Pédicule gauche (caudal) |
| P_pedic_centD | Pédicule droit (centre) |
| P_pedic_centG | Pédicule gauche (centre) |
| P_pedic_extD | Pédicule droit (limite externe) |
| P_pedic_extG | Pédicule gauche (limite externe) |
| P_plateauG | Plateau inférieur (limite gauche) |
| P_plateauD | Plateau inférieur (limite droite) |
| P_plateauA | Plateau inférieur (limite antérieure) |
| P_plateauP | Plateau inférieur (limite postérieure) |
| P_epineuse | Epineuse (centre) |
| P_coteD | Côte droite |
| P_coteG | Côte gauche |




Points d'intérêt d'une vertèbre




**Qualificatifs d'orientation dans le système de référence en anatomie**

1.

*Phase de réglages.* L'interne visualise les réglages du fluoroscope pour les radios de face. Ensuite, il prend une radio de face et visualise sur la radio le positionnement de la limite caudale du pédicule droit puis regarde un point non défini de l'environnement de simulation.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* le centrage de la vertèbre visée est correct.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

2.

*Phase de réglages.* Le fluoroscope est positionné pour des radios de face avec une inclinaison à droite. L'interne visualise le positionnement du trocart sur le patient puis il prend une radio de face.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* le point de contact osseux sur le processus transverse est incorrect**.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

3.

*Phase de réglages.* L'interne effectue une translation caudale du fluoroscope puis prend une radio de face. Ensuite, il visualise le positionnement du trocart sur le patient.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule est correct.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

4.

*Phase de réglages*. L'interne prend une radio de face puis visualise la radio.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* l'interne visualise, sur la radio de face, les réglages du fluoroscope puis la limite caudale du pédicule droit et la limite antérieure du plateau inférieur ; le centrage de la vertèbre sur la radio de face est correct.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

5.

*Phase de repérages cutanés.* Le fluoroscope est positionné pour des radios de face avec une inclinaison crâniale. L'interne prend une radio avec la réglette puis visualise la radio.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le trait cutané transversal est correct[11], le trait cutané gauche est correct[12].

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

6.

*Phase de repérages cutanés.* L'interne visualise le patient puis les réglages du fluoroscope pour les radios de profil. Ensuite, il prend une radio avec la réglette puis visualise sur la radio le positionnement de l'épineuse de la vertèbre visée.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le trait cutané droit est correct[13], le trait cutané gauche est incorrect, le trait cutané transversal est incorrect.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

[11] Le trait cutané transversal est correct s'il passe à l'aplomb des deux pédicules de la vertèbre soit à l'aplomb de l'axe transversal de la vertèbre.
[12] Le trait cutané gauche est correct s'il passe à l'aplomb du pédicule gauche de la vertèbre soit à l'aplomb de l'axe pédiculaire longitudinal gauche de la vertèbre.
[13] Le trait cutané droit est correct s'il passe à l'aplomb du pédicule droit de la vertèbre, soit à l'aplomb de l'axe pédiculaire longitudinal droit.

7.

*Phase de repérages cutanés.* Le fluoroscope est positionné pour des radios de face avec une inclinaison latérale gauche. L'interne prend une radio avec la réglette. Ensuite, il visualise le patient puis la radio de face. Ensuite, il visualise les réglages du fluoroscope pour les radios de profil.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le trait cutané droit est correct, le trait cutané transversal est incorrect.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

8.

*Phase d'insertion.* L'interne déplace le trocart vers la droite puis prend une radio de face. Il visualise la radio de face puis les réglages du fluoroscope pour les radios de face.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule est incorrect*.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

9.

*Phase d'insertion.* L'interne enfonce le trocart vers le bas. Ensuite, il visualise la dernière radio de face prise puis les réglages du fluoroscope et fixe un point non défini de l'environnement de simulation.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le point de contact osseux entre le processus transverse et la facette de l'arc interneural est incorrect, le point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule est correct, le point d'entrée pédiculaire du trocart est correct mais le point de sortie pédiculaire dans le plan transverse est incorrect[14].

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

10.

*Phase d'insertion.* L'interne déplace le trocart vers le haut. Il vérifie le positionnement de la limite caudale du pédicule droit et de la limite antérieure du plateau inférieur de la vertèbre visée.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le point de contact osseux sur le processus transverse est incorrect*, le point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule est incorrect*.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

[14] L'extrémité du trocart est au centre du pédicule sur la face mais ne se situe pas en sortie pédiculaire dans le plan transverse.

11.

*Phase d'insertion.* L'interne prend une radio de face. Ensuite, il visualise sur la radio le positionnement de la limite antérieure du plateau inférieur de la vertèbre visée. Le trocart a une inclinaison latérale droite.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le point d'entrée cutané sur l'axe longitudinal à l'aplomb de l'épineuse est incorrect ; le point de contact osseux sur la ligne transverse à la limite externe du pédicule est incorrect; le point de contact osseux sur le processus transverse est incorrect*.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

12.

*Phase d'insertion.* L'interne déplace le trocart vers la droite puis prend une radio de face. Sur la radio de face, il visualise le positionnement de la limite antérieure du plateau inférieur de la vertèbre visée.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le point de contact osseux sur la ligne transverse à la limite externe du pédicule est incorrect; le point de contact osseux sur le processus transverse est incorrect ; le point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule est correct.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

13.

*Phase d'insertion.* L'interne enfonce le trocart vers le haut puis prend une radio de face. Il visualise le positionnement du centre du pédicule gauche, de l'extrémité caudale du pédicule droit et de l'extrémité caudale du pédicule gauche de la vertèbre visée.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* le point d'entrée cutané sur l'axe longitudinal à l'aplomb de l'épineuse est incorrect* ; le point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule est correct.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

14.

*Phase d'insertion*. L'interne enfonce le trocart. Ensuite, il prend une radio de face puis visualise le positionnement du trocart sur la radio. Le trocart n'est pas encore inséré dans la vertèbre.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, l'inclinaison du trocart à l'entrée cutanée est correcte, le point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule est incorrect, le point final de l'insertion sur la ligne transverse dans l'axe longitudinal au niveau de l'épineuse est incorrect, le point d'entrée pédiculaire du trocart est correct mais le point de sortie pédiculaire dans le plan transverse est incorrect[15], le point d'entrée cutané sur l'axe longitudinal à l'aplomb de l'épineuse est incorrect*.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

[15] L'extrémité du trocart est au centre du pédicule sur la face mais ne se situe pas en sortie pédiculaire dans le plan transverse.

15.

*Phase d'insertion.* L'interne enfonce le trocart vers le bas. Ensuite, il visualise la dernière radio de face prise puis les réglages du fluoroscope puis un point non défini de l'environnement de simulation.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le point de contact osseux entre le processus transverse et la facette de l'arc interneural est incorrect, le point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule est incorrect, le point de sortie pédiculaire dans le plan transverse est incorrect[16].

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

16.

*Phase d'insertion.* L'interne enfonce le trocart. Le trocart a une inclinaison latérale droite. L'interne visualise sur la radio de face le positionnement de la limite caudale des pédicules de la vertèbre visée.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le point de contact osseux sur le processus transverse est incorrect.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

[16] L'extrémité du trocart est au centre du pédicule sur la face mais ne se situe pas en sortie pédiculaire dans le plan transverse.

17.

*Phase d'insertion.* L'interne visualise sur la radio de face le positionnement du centre du pédicule gauche, de la limite caudale du pédicule droit, de la limite gauche du plateau inférieur et de l'articulation facettaire supérieure gauche de la vertèbre visée. Ensuite, il enfonce le trocart.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le point de contact osseux entre le processus transverse et la facette de l'arc interneural est incorrect ; le point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule est incorrect.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

18.

*Phase d'insertion.* L'interne déplace le trocart vers le haut. Sur la radio de face, il visualise le positionnement de la limite caudale des pédicules et de la limite gauche du plateau inférieur de la vertèbre visée.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le point de contact osseux sur la ligne transverse à la limite externe du pédicule est incorrect ; le point de contact osseux sur le processus transverse est incorrect.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

19.

*Phase d'insertion.* L'interne enfonce le trocart vers le haut puis prend une radio de face. Ensuite, Il visualise sur la radio le positionnement de la limite gauche du plateau inférieur de la vertèbre visée.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* sur la radio de face, le point d'entrée cutané sur l'axe longitudinal à l'aplomb de l'épineuse est incorrect* ; le point de contact osseux sur la ligne transverse à la limite externe du pédicule est incorrect ; le point de contact osseux sur le processus transverse est incorrect ; le point de sortie pédiculaire sur la ligne transverse au centre du pédicule est incorrect.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |

20.

*Phase d'insertion.* L'interne tire le trocart puis prend une radio de face. Ensuite, il visualise le positionnement du trocart sur le patient puis visualise la radio de face.

*A chaque occurrence de cette suite d'actions, on constate par la suite que:* l'interne visualise les réglages du fluoroscope ; sur la radio de face : le point d'entrée cutané sur l'axe longitudinal à l'aplomb de l'épineuse est incorrect** ; le point de contact osseux sur le processus transverse et la facette de l'arc interneural est incorrect** ; le point de contact osseux sur le processus transverse est incorrect**.

| | **1** *Très faible* | **2** *Faible* | **3** *Neutre* | **4** *Fort* | **5** *Très fort* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Réutilisabilité** | | | | | |
| **Originalité** | | | | | |
| **Pertinence des visualisations** | | | | | |
| **Pertinence de l'état des outils** | | | | | |
| **Intérêt pédagogique** | | | | | |
| ***Notes (facultatif)*** | | | | | |