



HAL
open science

Analyse de l'activité de soignants médicaux et paramédicaux sur simulateur haute-fidélité lors de simulations d'urgence, en vue de la conception d'un environnement de soins ergonomique

Cécile Bernard

► **To cite this version:**

Cécile Bernard. Analyse de l'activité de soignants médicaux et paramédicaux sur simulateur haute-fidélité lors de simulations d'urgence, en vue de la conception d'un environnement de soins ergonomique. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Bretagne Sud, 2020. Français. NNT : 2020LORIL574 . tel-03326024

HAL Id: tel-03326024

<https://theses.hal.science/tel-03326024>

Submitted on 25 Aug 2021

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.

Thèse de doctorat en ERGONOMIE

L'UNIVERSITE BRETAGNE SUD

ÉCOLE DOCTORALE N° 603

Éducation, Langages, Interaction, Cognition, Clinique

Spécialité : « *Ergonomie* »

Par

Cécile I. BERNARD

« Analyse de l'activité de soignants médicaux et paramédicaux sur simulateur haute-fidélité lors de simulations d'urgence, en vue de la conception d'un environnement de soins ergonomique »

Thèse présentée et soutenue à Vannes, le Vendredi 27 Novembre 2020

Unité de recherche : Laboratoire de Psychologie : Cognition, Comportement, Communication

Thèse N° : 574

Rapporteurs avant soutenance :

Julien CEGARRA Professeur, Institut National Universitaire Champollion, Albi

Pierre FALZON Professeur Émérite, Cnam, Paris

Composition du Jury :

Président : Prénom Nom Fonction et établissement d'exercice

Examineurs : Violaine SEVREZ MCF, ISM, Marseille
 Frédéric VANDERHAEGEN Professeur, LAMIH, Valenciennes

Dir. de thèse : Thierry MORINEAU Professeur, UBS, Vannes

Co-dir. de thèse : John FLACH Professeur Émérite, WSU, Dayton, OHIO, USA

Invité :

Seamus THIERRY Médecin Anesthésiste Réanimateur, GHBS, Lorient

*Tout le monde est un génie.
Mais si vous jugez un poisson à sa capacité de grimper à un arbre,
il vivra toute sa vie en croyant qu'il est stupide.*

Einstein

Remerciements

Je ne peux partager ce travail sans remercier chaleureusement toutes les personnes qui, d'une façon ou d'une autre, ont contribué à faire de cette thèse, une aventure unique.

Mes premiers remerciements s'adressent tout naturellement à Thierry MORINEAU, mon directeur de thèse, sans qui ce travail n'aurait jamais été possible. Nous nous souviendrons tous les deux des conditions originales qui ont marqué notre rencontre lors des entretiens. Je n'étais pas consciente à l'époque, que ce moment serait le début d'une aventure intellectuelle et humaine aussi riche. Je vous remercie pour votre confiance, votre soutien, votre disponibilité, votre honnêteté et votre bienveillance durant ces trois années. Vous m'avez toujours poussée à aller au-delà des mes propres limites, je vous en remercie.

Bien que moins présent du fait de la distance géographique, je remercie John FLACH, mon co-directeur de thèse, pour avoir accepté de porter un regard avisé sur ce travail. Je me permets d'écrire les quelques mots qui lui sont destinés en anglais. John, I hope that I will be able to express all my gratitude to you. You welcomed me as a member of your family when I visited the Wright State University, I'll be forever grateful. You shared with me all your advice, your sharp expertise, your concerns, your professional network. You have opened my mind both professionally and personally. Thanks to you, and to Bits, I came back to France richer than I was when I left.

L'aboutissement de ce travail de thèse tient également à Seamus THIERRY, Médecin Anesthésiste Réanimateur au GHBS. Ton expertise médicale, ta passion et ton implication ont donné une dimension particulière à ce travail. Je te remercie d'avoir partagé avec moi tes rêves d'enfant. Tu m'as ouvert les portes d'un monde incroyable, celui de la médecine aérospatiale. J'espère que nous aurons encore l'occasion de travailler ensemble, quelque part entre Mars et la Lune.

Il me tient à cœur de remercier Pascal CHAPELAIN et Sylvie NIGNOL pour leur dynamisme et leur enthousiasme vis-à-vis des travaux menés au centre de simulation C3S. Je remercie toute l'équipe des urgences pédiatriques de m'avoir permis d'intégrer leur service le temps des expérimentations ainsi que l'ensemble du personnel soignant ayant participé à cette recherche.

Et parce qu'on oublie bien trop souvent à quel point leur travail est essentiel au succès de nos projets, je remercie Audrey DELAHAYE, secrétaire gestionnaire du laboratoire LP3C. Il est important pour moi de souligner à quel point ton aide a été précieuse. Au-delà de ta réactivité, ta patience et ton efficacité, je te remercie pour ton écoute, ta bienveillance et ta bonne humeur.

Mes pensées vont maintenant à tous ceux qui n'ont pas directement contribué au travail de thèse mais qui ont façonné mon environnement de sorte à ce que sa réalisation en soit plus douce.

À mes amis Bretons, à qui je dois la saveur particulière de cette aventure. Je vous remercie pour votre accueil, votre générosité, votre joie de vivre. Je me suis sentie chez moi à vos côtés. À mes amis Ch'ti, Parisiens, et Marseillais. Malgré des chemins de vie éloignés, vous avez toujours su me rappeler au quotidien la puissance de l'amitié. A ces liens indélébiles qui ne souffrent ni du temps qui passe, ni de la distance tellement ils sont singuliers. Merci de faire partie de ma vie.

À ma famille, non pas parce qu'on se doit de remercier ses proches dans un tel évènement mais parce qu'ils le méritent. Papa, Maman, merci d'avoir construit un monde rempli d'amour, de bienveillance et de m'avoir donné la liberté de l'explorer à ma façon. Bien que cela ait dû vous coûter quelques cheveux blancs, vous m'avez donné le courage et la force de poursuivre mes rêves quels qu'ils soient. Maman, merci d'être un si bel exemple de vie. À mes frère et sœur, quoi que je fasse je sais que vous serez toujours là pour moi. Luce, merci pour tout, ta présence, ton amour, ton soutien. J'ai de la chance d'être ta grande-sœur. Vous me poussez chaque jour à être une belle personne dont vous seriez fière. À Mamie-Nette, j'aurais aimé que ton rire continue d'inonder nos vies. Tu avais raison, « jé toudis eu l'diap d'un l'vinte ».

Résumé

Inscrit dans le cadre général de l'ingénierie des systèmes cognitifs, ce travail de thèse répond à des besoins spécifiques concernant le développement d'outils méthodologiques adaptés à l'analyse des systèmes faiblement couplés, comme c'est le cas d'une équipe médicale en situation d'urgence. À la suite d'un manque méthodologique identifié dans la littérature, la hCWA (2019) se présente comme une méthode adaptée à l'analyse de ce type de système. En envisageant l'activité comme des trajectoires dynamiques au sein d'un espace de liberté contraint, la hCWA souhaite contribuer à la conception d'environnements de travail adaptés aux contraintes fonctionnelles auxquelles sont soumis les opérateurs. Cependant, la hCWA est une méthode récente et des efforts sont nécessaires pour poursuivre son développement.

La poursuite de cet objectif méthodologique structure le travail de thèse en deux grandes étapes. La première étape concerne l'application de la hCWA à deux situations d'urgence médicale en contexte de simulation et démontre l'intérêt du modèle dynamique de sûreté (DSM) pour modéliser l'espace de travail et aborder des problématiques de terrain, tant organisationnelles que conceptuelles. En effet, en modélisant le domaine de travail et la dynamique sous-jacente aux contraintes, le modèle DSM rend compte de la migration naturelle du système, autrement dit la migration induite par les pressions issues des contraintes. En accord avec notre hypothèse principale, qui énonce l'existence d'un point d'équilibre au centre de DSM permettant un contrôle optimal des contraintes, des solutions innovantes sont étudiées dans le but de contrer ces migrations à risques et de maintenir le point opératif du système proche de ce point d'équilibre. Deux cas applicatifs permettent de concevoir, de développer puis de tester deux solutions innovantes : une assistance organisationnelle se présentant sous la forme d'un nouveau rôle médical destiné à gérer la coordination au sein des équipes médicales devant prendre en charge une urgence pédiatrique, puis une assistance numérique conçue sous la forme d'une check-list destinée à soutenir les soignants lors de la prise en charge d'un retard de réveil en anesthésie générale. La seconde étape de ce travail concerne le développement d'une nouvelle méthodologie nommée « SSS : State Space Sketch » (Esquisse d'un Espace des États) destinée à modéliser les comportements des opérateurs comme des trajectoires au sein de l'espace délimité par DSM. Cette dernière offre la possibilité de traduire l'activité des opérateurs sous la forme d'une matrice de transformation rendant compte des trajectoires au sein d'un espace d'état défini par les objectifs critiques de la tâche. Nous montrons ensuite comment SSS est applicable à l'analyse de situations d'urgence en simulation et comment les résultats issus de cette modélisation permettent d'évoluer vers des méthodes prédictives capables de détecter, puis de réguler des trajectoires à risques.

Mots clés : Analyse cognitive du travail, Modèle dynamique de sûreté, Urgence médicale, Systèmes dynamiques, Méthode d'analyse des risques, Auto-organisation, Adaptation, Aide cognitive.

Abstract

This thesis work is part of the general framework of the analysis of complex systems and addresses specific needs concerning the development of methodological tools adapted to the analysis of loosely coupled systems, such as a medical team in an emergency situation. Due to a methodological lack identified in the literature, hCWA (2019) is introduced as a method appropriate for the analysis of this type of system. By considering the activity as dynamic trajectories within a constrained space of freedom, the hCWA aims at contributing to the design of work environments adapted to the functional constraints of the system. However, the hCWA is a relatively recent method and further efforts are needed to pursue its development.

The research work is structured in two main stages in the pursuit of this methodological objective. The first step concerns the application of hCWA to two medical emergency situations in a simulation context and illustrates the value of the Dynamic Safety Model (DSM) for modelling the workspace and addresses both organizational and conceptual field issues. Indeed, by modeling the work space and the dynamics underlying the constraints, the DSM model captures the natural migration of the system, i.e. the migration induced by the pressures arising from the constraints. According to our main hypothesis about the existence of a point of equilibrium at the center of DSM allowing optimal control of constraints, we studied innovative solutions to counter these risky migrations and to maintain the operative point of the system close to this point of equilibrium. Two case studies are used to design, develop and test two innovative solutions: an organizational assistance designed in the form of a new medical role designed to manage coordination within medical teams that have to deal with a pediatric emergency, and a digital assistance designed in the form of a checklist to support caregivers in the management of delayed awakening in general anesthesia. The second stage of this work concerns the development of a new methodology called "SSS: The State Space Sketch" designed to model the behavior of operators as trajectories within the space delineated by DSM constraints. This methodology offers the possibility of describing operator activity in the form of a transformation matrix that reflects the trajectories within a state space defined by the critical objectives of the task. We then show how SSS can be applied to the analysis of emergency situations in simulation and how the results of this modeling can be used to develop predictive methods able to detect and regulate risky trajectories.

Keywords: Cognitive work analysis, Dynamic safety model, Medical emergency, Dynamic systems, Risk analysis method, Self-organization, Adaptation, Cognitive aid.

Table des matières

RÉSUMÉ	7
ABSTRACT	9
TABLE DES MATIÈRES	11
LISTE DES TABLEAUX	15
LISTE DES FIGURES	17
INTRODUCTION	19
I. LES OPÉRATEURS HUMAINS : CRÉATEURS DE SÉCURITÉ ?	21
II. OBJECTIFS ET PLAN DE THÈSE	24
SECTION 1 - CADRE THÉORIQUE	27
I. LA NOTION DE SYSTÈME	29
1. COMMENT CARACTÉRISER UN SYSTÈME : DÉFINITIONS ET CONCEPTS GÉNÉRAUX	29
2. LES PARTICULARITÉS DU SYSTÈME MÉDICAL EN SITUATION D'URGENCE	32
3. SYSTÈMES COMPLEXES ET SÉCURITÉ : DES BESOINS MÉTHODOLOGIQUES SPÉCIFIQUES	34
a) Accimap	36
b) STAMP (Systems-Theoretic Accident Modeling)	36
c) FRAM (The functional resonance accident model)	37
II. LA COGNITIVE WORK ANALYSIS (CWA)	41
1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE ET FONDEMENTS	41
a) La psychologie écologique	42
b) Le contrôle adaptatif	43
2. MÉTHODOLOGIE	45
a) WDA – Analyse du domaine de travail	46
b) ConTa – Analyse des tâches de contrôle	51
3. LIMITES ET SOLUTIONS ALTERNATIVES	55
a) Limites	55
b) Solutions alternatives	65
III. L'HEURISTIC COGNITIVE WORK ANALYSIS (HCWA)	66
1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE ET FONDEMENTS	66
a) Des notions nouvelles relevant de la psychologie écologique	67
b) Une approche basée sur le système avec le modèle dynamique de sûreté (DSM)	68
c) Le problème du contrôle des degrés de liberté (Bernstein 1967)	71
d) La simulation comme outil méthodologique	71
2. MÉTHODOLOGIE	73
3. PREMIÈRE APPLICATION AU DOMAINE MÉDICAL	76

SECTION 2 - PROBLÉMATIQUE **81**

SECTION 3 - CONCEPTION **85****I. OBJECTIFS DU CHAPITRE** **87****II. PREMIER CAS APPLICATIF** **88**

1. ÉTAPE 1 : IDENTIFIER LES CONTRAINTES DE L'ESPACE DE TRAVAIL 88
2. ÉTAPE 2 ET 3 : IDENTIFIER LES PRESSIONS POTENTIELLES QUI SE PRODUISENT LORS D'UNE URGENCE PÉDIATRIQUE AINSI QUE LES RISQUES ASSOCIÉS 88
3. ÉTAPE 4 : PROPOSER, IMAGINER DES SOLUTIONS VISANT À ÉVITER CES SITUATIONS RISQUÉES 90
4. ÉTAPE 5 : DÉFINIR PRÉCISÉMENT LE PROBLÈME À RÉSOUDRE 90
5. ÉTAPE 6 : REFORMULER LE PROBLÈME AU REGARD D'UNE ANALYSE APPROFONDIE DE LA LITTÉRATURE 91
6. ÉTAPE 7 : PROPOSER ET CONCEVOIR UNE SOLUTION INNOVANTE 94
 - a) Le coordinateur : un contrepoids dynamique au sein de DSM 95
 - b) Les fonctions et outils du coordinateur 97
7. ÉTAPES 8 : SUR LA BASE D'UNE DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE, TESTER, QUANTIFIER L'APPORT DE CETTE ASSISTANCE EN CONTEXTE DE SIMULATION 99
 - a) Méthode 99
 - b) Résultats 103
 - c) Discussion 105
 - d) Conclusion 108

III. SECOND CAS APPLICATIF **109**

1. ÉTAPE 1 : IDENTIFIER LES CONTRAINTES DE L'ESPACE DE TRAVAIL 109
2. ÉTAPE 2 ET 3 : IDENTIFIER LES PRESSIONS POTENTIELLES QUI SE PRODUISENT LORS D'UN RETARD DE RÉVEIL EN ANESTHÉSIE AINSI QUE LES RISQUES ASSOCIÉS 109
3. ÉTAPE 4 : PROPOSER, IMAGINER DES SOLUTIONS VISANT À ÉVITER CES SITUATIONS RISQUÉES 111
4. ÉTAPE 5 : DÉFINIR PRÉCISÉMENT LE PROBLÈME À RÉSOUDRE 112
6. ÉTAPE 6 : REFORMULER LE PROBLÈME AU REGARD D'UNE ANALYSE APPROFONDIE DE LA LITTÉRATURE 113
6. ÉTAPE 7 : PROPOSER ET CONCEVOIR UNE SOLUTION INNOVANTE 116
 - a) La check-list : un nouveau point d'équilibre au sein de DSM 117
 - b) Les étapes de conception de la check-list 119
7. ÉTAPES 8 : SUR LA BASE D'UNE DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE, TESTER, QUANTIFIER L'APPORT DE CETTE ASSISTANCE EN CONTEXTE DE SIMULATION 124
 - a) Méthode 124
 - b) Résultats 128
 - c) Discussion 130
 - d) Conclusion 133

SECTION 4 - MODÉLISATION **135****I. OBJECTIFS DU CHAPITRE** **137****II. LA CYBERNÉTIQUE** **138**

III. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE SSS	142
1. LE PROCESSUS DE MODÉLISATION	142
a) But de la modélisation	142
b) Les éléments du modèle	143
2. LES ÉTAPES MÉTHODOLOGIQUES	144
a) Phase méthodologique 1 : Création du modèle	147
b) Phase méthodologique 2 : Analyse des données	152
IV. PREMIÈRE APPLICATION À LA PRISE EN CHARGE D'UNE URGENCE PÉDIATRIQUE	155
a) Phase méthodologique 1 : Création du modèle	155
b) Phase méthodologique 2 : Analyse des données	161
c) Résultats	166
V. PERSPECTIVES	183
1. LES DONNÉES DISPONIBLES	183
2. LES CHAÎNES DE MARKOV	184
VI. CONCLUSION	188
<u>SECTION 5 - CONCLUSION GÉNÉRALE</u>	<u>191</u>
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>199</u>

Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation des cinq dimensions de la « Cognitive Work Analysis ».....	45
Tableau 2 : Application de la hiérarchie d'abstraction à un radiateur électrique.	50
Tableau 3 : Représentation de l'espace Abstraction-Décomposition formé par l'utilisation conjointe de la hiérarchie d'abstraction en ligne et la décomposition structurelle en colonne.	51
Tableau 4 : Présentation des fonctions de coordination	98
Tableau 5 : Présentation des résultats.....	103
Tableau 6 : Présentation des objectifs visés par la check-list, des exigences de l'activité que cette dernière doit respecter, des propositions techniques envisagées pour répondre aux besoins.....	118
Tableau 7 : Liste des variables classées selon le degré de criticité et l'étape du parcours patient	121
Tableau 8 : Répartition des scénarios et des conditions en fonction des équipes.....	126
Tableau 9 : Synthèse des résultats.	128
Tableau 10 : Tableau de vérité de la relation de dépendance fonctionnelle entre deux états E1 et E2 sur la base de l'implication logique inverse.....	149
Tableau 11 : Présentation des 11 états et de la liste de variable associée à chacun des états	155
Tableau 12 : Composition des 6 équipes impliquées dans la prise en charge du choc septique en simulation ainsi que le code associé à chaque soignant.	162
Tableau 13 : Retranscription et codage des comportements de la vidéo 1.	165
Tableau 14 : Répartition des proportions des transitions normales (vert), anormales (orange), impossibles (rouge) pour chaque équipe et pour chaque calque.	171
Tableau 15 : Proportion de transitions obligatoires (i.e. lien de dépendance fonctionnelle) et proportion de transitions interdites (i.e. sens inverse du lien de dépendance fonctionnelle) pour chaque équipe.	172

Liste des figures

Figure 1 : Caractérisation des environnements de travail en fonction du degré relatif des contraintes intentionnelles et causales.	30
Figure 2 : Positionnement du système médical le long du continuum défini en fonction du degré relatif des contraintes intentionnelles et causales.	32
Figure 3 : Classification des systèmes selon la nature de leur couplage et leur facilité de contrôle.	39
Figure 4 : La parabole de la fourmi d'Herbert Simon (1981).	47
Figure 5 : Structure classique de l'échelle de décision.....	54
Figure 6 : Relation entre AH - DL et le couplage dynamique perception - action.....	61
Figure 7 : Espace des possibilités défini par DSM.....	69
Figure 8 : Présentation des étapes méthodologiques propres à la hCWA.....	73
Figure 9 : Représentation de l'espace de travail décrit par hCWA.	74
Figure 10 : Représentation de l'espace de travail propre à la prise en charge de l'urgence médicale. .	78
Figure 11 : Espace de travail et dynamique des contraintes de l'urgence pédiatrique.	89
Figure 12 : Paysage d'attracteurs pour la phase de transition marche-course compte tenu de la vitesse de déplacement croissante du corps humain.	92
Figure 13 : Paysage d'attracteurs propre au rôle de leader.	94
Figure 14 : Présentation du rôle de coordinateur comme un contre poids dynamique.....	96
Figure 15 : Présentation du coordinateur en situation.	99
Figure 16 : Programme des journées de formations professionnelles.	100
Figure 17 : Répartition des comportements de coordination entre soignants en proportion des actions totales.	104
Figure 18 : Espace de travail et dynamique des contraintes lors d'un retard de réveil en anesthésie générale.	111
Figure 19 : Modélisation de l'impact souhaité de la check-list sur l'équilibre du système.....	117
Figure 20 : Étapes principales du parcours patient lors d'une prise en charge chirurgicale.....	120
Figure 21 : Arborescence des écrans constituant l'application.	123
Figure 22 : Présentation des écrans constituant l'application.	124
Figure 23 : Illustration d'une situation simulant un retard de réveil en salle de réveil.	125
Figure 24 : Niveaux d'incertitude des soignants dans leur diagnostic avec et sans check-list.	129
Figure 25 : Nombre de consultation par minute du dossier d'anesthésie et nombre de consultation par minute de la check-list pour chaque participant en fonction des conditions.	130
Figure 26 : Matrice de transformation d'un feu tricolore.	141
Figure 27 : Représentation du cycle propre au processus méthodologique.....	144
Figure 28 : Organigramme du processus de modélisation de la méthode SSS	146

Figure 29 : Exemple de caractérisation de la matrice fonctionnelle et identification des zones de risques potentielles.	151
Figure 30 : Modèle SSS de la prise en charge d'un choc septique en pédiatrie.	158
Figure 31 : Calque fonctionnel.	160
Figure 32 : Calque cognitif.	161
Figure 33 : Matrice d'analyse remplie sur la base du codage issu de l'observation des deux premières minutes de la vidéo 1.	164
Figure 34 : Probabilité moyenne de passage d'un état colonne à un état ligne pour les 6 équipes accompagnée de leur intervalle de confiance crochet (95%).	166
Figure 35 : Ensemble des trajectoires possibles pour chaque état ainsi que leurs probabilités respectives.	169
Figure 36 : Résultats au regard du calque cognitif (matrice de gauche) et du calque fonctionnel (matrice de droite).	170
Figure 37 : Présentation d'une situation où 4 soignants sont focalisés sur l'utilisation du matériel informatique réduisant ainsi l'attention portée au patient.	180
Figure 38 : Évolution de la position des soignants de l'équipe 1 au sein de l'espace d'état composé de 11 états lors des 5 premières minutes de prise en charge.	183
Figure 39 : Exemple d'une chaîne de Markov composée de 3 états aléatoires et sa matrice de transition.	184
Figure 40 : Exemple d'un diagramme de transition entre états et matrice de transition associée pour l'étude des flux d'individus entre deux grandes villes.	185

Introduction

« It may be part of human nature to err,
but it is also part of human nature to create solutions,
find better alternatives and meet the challenges ahead »

Kohn - *To err is human* (2000)

« Il est peut-être dans la nature humaine de se tromper,
mais il est aussi dans la nature humaine de créer des solutions,
de trouver de meilleures alternatives et de relever les défis qui se présentent »

Kohn – *L'erreur est humaine* (2000)

I. Les opérateurs humains : créateurs de sécurité ?

Évolution vers des modes de pensées complexes et dynamiques

Les années 50 sont marquées par une modification profonde de la nature du travail qui évolue d'une forte dépendance au faire vers une forte dépendance au penser. En effet, en multipliant les dispositifs capables d'accomplir partiellement ou entièrement une tâche auparavant exécutée par un humain (Parasuraman et al. 2000), l'automatisation du travail oblige les opérateurs à modifier, voire à abandonner certains aspects physiques et routiniers de l'activité au profit de tâches cognitives et complexes telles que la supervision, la prise de décision ou la résolution de problème. Plusieurs phénomènes sont alors caractéristiques de cette transition : (i) la nature du contrôle du domaine de travail change et devient un contrôle à distance possible via une interface, (ii) les opérateurs deviennent des superviseurs de systèmes automatiques et leur intervention n'est nécessaire qu'en cas de situations imprévues pour lesquelles les machines n'ont pas été conçues, (iii) l'utilisation des interfaces instaure une distance spatiale et/ou temporelle entre les opérateurs et leur domaine de travail. Face à cette complexité croissante, assurer la sécurité des systèmes sociotechniques est un véritable challenge pour les facteurs humains et les sciences de la sécurité. Toute la problématique étant d'optimiser le lien (i.e. le couplage) entre l'organisation du travail (i.e. les opérateurs et les machines) et le domaine de travail (i.e. ce sur quoi agit l'organisation) dans le but de faciliter le contrôle et assurer les exigences de sécurité et performance.

Lorsqu'on s'intéresse à la gestion de la sécurité dans les systèmes sociotechniques complexes, il est nécessaire d'aborder la question de l'erreur humaine. Woods et ses collègues (2010) distinguent deux approches de l'erreur humaine qui vont nous permettre d'identifier deux stratégies différentes en termes de gestion des risques. La première approche repose sur un raisonnement causal destiné à identifier puis supprimer a posteriori, la cause de l'accident. « L'erreur humaine » est ici considérée comme la cause de l'échec. Dans cette logique, et pour assurer les exigences de performance et de sécurité, la stratégie repose sur l'élimination des causes, autrement dit l'élimination des « opérateurs humains » alors jugés peu fiables. L'idée sous-jacente est qu'en réduisant la responsabilité des humains (i.e. leurs degrés de liberté), et en donnant plus de poids aux systèmes automatiques ou en renforçant les procédures rigides, les erreurs seront réduites. La sécurité est alors synonyme de réglementation, procédures standardisées, systèmes automatisés et réduction des degrés de liberté. La seconde approche considère les situations de travail comme des situations dynamiques. Les opérateurs ne doivent plus seulement respecter les règles prescrites mais doivent constamment s'adapter à des événements aléatoires et imprévus et être en mesure d'apporter des solutions adaptées. Comprendre comment les erreurs surviennent nécessite alors

d'identifier la dynamique sous-jacente à ces situations, les ressources disponibles (humaines et matérielles) et les actions possibles pour la contrôler (i.e. leurs degrés de liberté). La sécurité est ici synonyme de flexibilité et d'adaptation. En fournissant aux opérateurs des degrés de liberté leur permettant de s'adapter et de faire face à la complexité, autrement dit en concevant des espaces de travail qui favorisent l'expression des compétences, la sécurité en sera améliorée (Falzon 2013).

Alors que la première approche considère l'opérateur humain comme la cause de la défaillance, la seconde l'envisage comme un créateur de sécurité. Comme l'écrit Rasmussen (1986) : « La variabilité humaine est importante pour l'adaptation et l'apprentissage, et la capacité à s'adapter aux particularités des systèmes et à optimiser l'interaction est la raison même de la présence des agents dans un système. Pour optimiser le rendement, pour développer des compétences harmonieuses et efficaces, il est important d'avoir l'occasion de faire l'expérience d'essais et d'erreurs... ». Ainsi l'erreur est nécessaire au développement des compétences humaines et à l'amélioration des capacités adaptatives des opérateurs. Une stratégie de sécurité pertinente consisterait donc à concevoir des environnements de travail qui tolèrent l'erreur, autrement dit des environnements au sein desquels les opérateurs peuvent progresser, apprendre via l'exploration des degrés de libertés et où les potentielles erreurs n'entraîneraient pas nécessairement des conséquences catastrophiques (Flach et al. 2008, Falzon 2008). Cette dernière vision marque une transition dans la façon de percevoir le risque et l'erreur et nécessite de nouvelles méthodes d'analyses capables de capturer la dynamique du système, les contraintes, les pressions, les moyens en termes de ressources et l'ensemble des possibilités d'actions disponibles pour assurer le contrôle.

Des besoins méthodologiques spécifiques

Face à ces nouveaux besoins méthodologiques, les méthodes séquentielles¹, épidémiologiques² ou basées sur l'identification des causes sont devenues insuffisantes et l'approche systémique³ a été envisagée comme une solution adaptée (Hollnagel 2008 ; Underwood & Waterson 2013 ; Salmon et al. 2011). Au sein de l'approche systémique, la sécurité est considérée comme une propriété émergente qui résulte des interactions non linéaires entre les composants multiples du système sociotechnique (Leveson 2004). Le système est analysé comme un tout et tient compte des différents éléments organisationnels, techniques et humains impliqués. Lors d'une analyse d'ordre systémique, les objectifs sont multiples : comprendre les relations entre les différents composants du système, identifier les forces

¹ Les méthodes séquentielles décrivent les accidents comme le résultat d'une séquence d'événements qui se produisent dans un ordre précis (Hollnagel 2002).

² Les modèles épidémiologiques décrivent un accident en analogie à une maladie. C'est le résultat d'une combinaison de facteurs, certains visibles et d'autres latents, qui coexistent dans l'espace et le temps (Hollnagel 2002).

³ Les méthodes systémiques décrivent les accidents comme des phénomènes normaux qui émergent de la nature dynamique des interactions (Hollnagel 2002).

et vulnérabilités du système étudié, puis mettre en œuvre des actions d'améliorations appropriées en matière de sécurité (Leveson 2004).

L'Ingénierie cognitive des systèmes, plus communément appelé « *Cognitive Systems Engineering* », propose un cadre théorique et méthodologique pour répondre à ces objectifs. Sur la base des travaux menés par Jens Rasmussen et ses collègues au laboratoire Risø au Danemark (Rasmussen 1986 ; Rasmussen et al. 1994), la Cognitive Work Analysis (CWA) s'est développée pour répondre aux nouvelles exigences du travail engendrées par l'automatisation de l'activité. Cette méthode d'analyse du travail propose un ensemble de concepts destinés à analyser et modéliser les contraintes propres aux domaines de travail complexes, dynamiques, pour lesquels la capacité à comprendre et agir de façon adaptative face aux situations imprévues est essentielle (Roth & Bisantz 2013, p240). L'objectif est de fournir des recommandations pour la conception d'innovations techniques (interfaces, aide décisionnelles...) et/ou organisationnelles (structure des équipes, allocation des fonctions...) qui favorisent les comportements adaptatifs et flexibles. Cependant, et malgré une contribution scientifique importante, la CWA présente certaines limites poussant les experts à repenser ses fondements et développer de nouvelles méthodes alternatives (Lind 1994 ; Lind 2003 ; Naikar et al. 2005 ; Naikar et al. 2006 ; Miller & Sanderson 2000 ; Ashoori & Burns 2011 ; Morineau & Flach 2019). Parmi ces méthodes, Morineau & Flach (2019) ont récemment proposé une méthode nommée la hCWA pour « Heuristic Cognitive Work Analysis ». Cette dernière a la particularité d'utiliser le modèle dynamique de sûreté développé par Rasmussen (1990, 1997) dans le but d'appréhender la sécurité et la performance comme un problème d'équilibre entre la gestion des degrés de liberté et le contrôle des contraintes. Ces contraintes pouvant être propres au domaine et/ou à l'organisation du travail. À l'inverse de la CWA, la hCWA se définit comme une méthode adaptée à l'analyse des systèmes faiblement couplés, autrement dit les systèmes au sein desquels l'auto-organisation et les capacités adaptatives sont indispensables pour faire face aux exigences situationnelles changeantes et aux nombreux degrés de liberté disponibles.

Cependant, l'utilisation du modèle de gestion des risques DSM (Dynamic Safety Model) nécessite le développement de nouveaux outils de modélisation. En effet, et comme le montrent les nombreuses applications de ce modèle (Vicente & Christoffersen 2006 ; Cassano-Piche et al. 2009 ; Cook & Rasmussen 2005), DSM est principalement utilisé comme un modèle conceptuel, une métaphore permettant de rendre compte des risques au sein des systèmes sociotechniques complexes. En considérant les comportements comme des trajectoires au sein d'un espace de sécurité contraint, DSM modélise le phénomène de migration et illustre comment la dynamique sous-jacente des contraintes peut pousser un système à franchir ses propres limites de performance. Malgré un pouvoir conceptuel considérable, il est important de noter qu'il y a, à ce jour, peu de travaux qui visent à caractériser précisément l'emplacement du point de fonctionnement du système et sa trajectoire au sein de cet espace de liberté (Cook & Rasmussen 2005).

II. Objectifs et plan de thèse

Ce travail de thèse se situe donc dans la continuité des travaux menés par Morineau & Flach (2019) et tente d'apporter des solutions méthodologiques alternatives qui s'inscrivent dans le cadre général de la hCWA. L'objectif est double. Dans un premier temps, le travail a pour but de poursuivre le développement de la hCWA et de tester comment la première phase de description des contraintes auxquelles doit faire face les opérateurs, réalisée sur la base de DSM, permet la conception d'assistances adaptées à différents contextes propres à l'urgence médicale. Ce premier axe mettra en évidence la pertinence de la première étape de hCWA pour concevoir des solutions ergonomiques variées pouvant toucher l'ergonomie organisationnelle et l'ergonomie des interfaces. Dans un second temps, le travail sera orienté vers le développement de nouveaux outils méthodologiques destinés à modéliser les comportements des opérateurs au sein de l'espace délimité par DSM. Le but final étant de contribuer au développement d'un environnement de soin ergonomique, autrement dit adapté aux contraintes réelles de l'activité des soignants en situation d'urgence et au maintien des exigences de sécurité et performance.

La première section sera consacrée au cadre théorique. Dans un premier temps, le concept de système sera abordé. Nous montrerons notamment quels sont les éléments généraux permettant de caractériser un système. Des notions telles que les contraintes et le couplage seront définies. Sur la base de ces caractéristiques, nous présenterons ensuite les particularités du système médical. Ce système sera décrit à l'échelle de la prise en charge d'une urgence vitale à savoir un système constitué d'une organisation du travail (i.e. l'équipe médicale et les équipements) agissant sur un domaine (i.e. le patient) dans le but de maintenir un état de santé stable. Pour finir nous aborderons la question des méthodes d'analyses de sécurité des systèmes. Compte tenu des spécificités du système étudié et des particularités des méthodes présentées, nous mettrons en évidence un manque méthodologique propre à l'étude des systèmes que nous qualifierons de « faiblement couplés et non traçables ». Ceci constituera l'une des bases de ce travail nous poussant à réfléchir au développement de nouvelles solutions méthodologiques adaptées à l'étude de ces systèmes et plus particulièrement à l'étude du système médical en situation d'urgence. Parmi les méthodes d'analyse existantes, notre attention se portera ensuite sur la CWA « Cognitive Work Analysis » (Rasmussen, Vicente). Nous exposerons ses fondements théoriques ainsi que son cadre méthodologique. Les deux premières étapes de l'analyse, à savoir l'analyse du domaine de travail et l'analyse de la tâche feront l'objet d'une présentation et d'une critique plus approfondie. L'objectif sera alors de mettre en évidence les limites de la CWA face à l'analyse des systèmes faiblement couplés. Une discussion autour des limites et des solutions alternatives nous amènera à présenter la hCWA ou « Heuristic Cognitive Work Analysis » comme une méthode permettant d'étendre la CWA à l'analyse des systèmes faiblement couplés. En remplaçant la Hiérarchie d'Abstraction par une modélisation de l'espace de travail sur la base du modèle dynamique de sûreté (DSM) proposé par Rasmussen (1997),

la hCWA permet d'intégrer les aspects dynamiques du travail, et ainsi aider à la compréhension des comportements adaptatifs et flexibles caractéristiques des systèmes faiblement couplés.

La seconde section énoncera la problématique et identifiera précisément les objectifs de ce travail, qui sont avant tout méthodologiques et orientés vers (1) l'application de la première étape de la hCWA à des fins de conception et (2) l'approfondissement et le développement de la méthode hCWA via la présentation de nouveaux outils méthodologiques. La suite du travail sera organisée au regard de ces deux objectifs.

La troisième section se focalisera sur le versant « conception » de ce travail. Nous montrerons comment le cadre conceptuel de hCWA peut être utilisé pour réfléchir aux aspects dynamiques propres au domaine de l'urgence médicale et comment cette réflexion permet d'aboutir à des propositions d'innovations. Un premier cas applicatif abordera la question de la coordination au sein des équipes médicales lors de la prise en charge d'une urgence pédiatrique et proposera une assistance organisationnelle. Un second cas applicatif abordera la question de la prise en charge du retard de réveil après une anesthésie générale et proposera une assistance numérique. Ces deux assistances seront respectivement conçues et expérimentalement testées en situation de simulation.

La quatrième section tentera de répondre au problème lié à la modélisation des trajectoires au sein de l'espace de travail délimité par DSM. Les principes fondamentaux de la cybernétique (Ashby 1957) seront présentés et utilisés comme base à cet effort de modélisation. L'objectif étant de décrire les comportements des opérateurs observés dans un contexte de simulation, comme des trajectoires au sein d'un espace de travail délimité par les contraintes écologiques. Après avoir présenté ces éléments, nous les appliquerons à l'analyse de vidéos mettant en scène des équipes médicales impliquées dans la gestion de scénarios d'urgence, lors de sessions de formations professionnelles.

La cinquième et dernière section apportera une synthèse et une conclusion générale à ce travail de thèse.

Section 1

Cadre théorique

« Much of everyday knowledge resides in the world, not in the head »

Norman (1988)

« La plupart des connaissances quotidiennes résident dans le monde, pas dans la tête »

Norman (1988)

I. La notion de système

1. Comment caractériser un système : définitions et concepts généraux

Un système se définit comme un ensemble d'éléments interreliés qui partagent des buts communs (Vicente 1999a). Chaque système se caractérise par ses frontières, ses buts, et son degré d'interaction avec l'environnement. Comme l'expliquent Flach & Voorhost (2016, p213), un système est dit ouvert lorsqu'il est couplé à son environnement de telle sorte que les événements de l'environnement peuvent avoir un impact sur le système. Ainsi, un système ouvert est sensible aux perturbations et les sources de variabilité (i.e. l'ensemble des évènements/perturbations pouvant impacter les comportements du système) ne peuvent pas toujours être spécifiées. À l'inverse, un système est dit fermé lorsqu'il est complètement isolé de son environnement. Un système fermé reste alors relativement stable et les sources de variabilité peuvent être énumérées. Un système peut être un acteur (e.g. un opérateur humain ou un système automatique) ; un objet sur lequel on agit (e.g. un domaine de travail) ; ou une combinaison des deux. Dans ce dernier cas, on parle de système sociotechnique. Ces derniers se définissent comme des systèmes composés d'éléments techniques, psychologiques et sociaux qui sont : l'opérateur, la machine, le domaine de travail. Le domaine de travail étant un environnement sur lequel l'opérateur agit indépendamment des opérateurs et machines (Vicente 1999b).

Les interactions nombreuses entre ces trois entités rendent les systèmes complexes. Typiquement, sont considérés de nos jours comme systèmes complexes les centrales électriques, les centres de contrôle aériens, les centres d'intervention en cas d'urgence, ou encore les unités de soins intensifs (Vicente & Rasmussen 1990).

Les systèmes sociotechniques se différencient selon la nature de leurs contraintes. En effet, tout système sociotechnique mets en interaction des humains, des machines et un domaine de travail. Comprendre ces systèmes nécessite de prendre en considération les contraintes qu'impose le domaine sur les comportements des opérateurs. Selon la nature des contraintes, les comportements du système sociotechnique diffèrent. Les contraintes peuvent être de nature causale ou intentionnelle, caractérisant ainsi deux types de systèmes (Rasmussen et al. 1994 ; Naikar et al. 2005) :

- Un système est causal lorsqu'il est gouverné par les lois de la Nature telles que la physique, la chimie ou la thermodynamique. Ainsi, une centrale nucléaire, un barrage hydraulique sont des systèmes causaux régis par des lois physiques. Les comportements des systèmes causaux peuvent alors être prédits, anticipés, sur la base des lois de la Nature. À noter qu'un système causal se contrôle.
- Un système est intentionnel lorsqu'il est gouverné par des intentions humaines. Ces systèmes sont caractérisés par des pratiques sociales, organisationnelles et des conventions plutôt que par

des lois physiques (Roth & Bisantz 2013, p241). Les systèmes intentionnels possèdent de nombreux degrés de liberté et des caractéristiques adaptatives importantes telle que l'auto-organisation. L'organisation interne d'un système intentionnel change couramment de sorte à répondre aux exigences situationnelles, aux buts et aux exigences de performance. Bien qu'il existe des lois sociales, il est difficile de prédire leurs comportements (Rasmussen 1985). À titre d'exemple, les industries, les universités sont des systèmes intentionnels. À noter qu'un système intentionnel se gère (« se manage ») plus qu'il ne se contrôle.

Malgré des définitions spécifiques, la distinction dans les faits entre un système « causal » et un système « intentionnel » reste une démarche délicate. En effet, différents types de contraintes peuvent coexister dans le même environnement et un même objet ou un même domaine peut à la fois être causal et intentionnel selon le niveau de granularité avec lequel le système est étudié. Certains auteurs utilisent l'exemple de l'objet « maison » pour illustrer ce phénomène (Roth & Bisantz 2013, p311 ; Naikar et al. 2005). En effet, et comme l'indiquent les auteurs, si l'on perçoit la maison comme un système technique permettant de fournir un abri, alors le système « maison » sera jugé causal. À l'inverse, si l'on perçoit la maison comme un système social qui est supposé assurer le bien-être de ses habitants, alors le système « maison » sera jugé intentionnel. Ainsi, il existe un continuum « systèmes causaux - systèmes intentionnels » le long duquel chaque système oscille en fonction des objectifs de l'analyse et du niveau de granularité sélectionné par le chercheur ou l'analyste pour étudier le système. Rasmussen, Petjersen et Goodstein (1994) proposent en ce sens une représentation sous la forme d'un axe continu permettant d'identifier les environnements en fonction du degré relatif de leurs contraintes intentionnelles et causales. La figure 1 illustre ce continuum dans le cadre de leurs travaux concernant les centrales électriques.

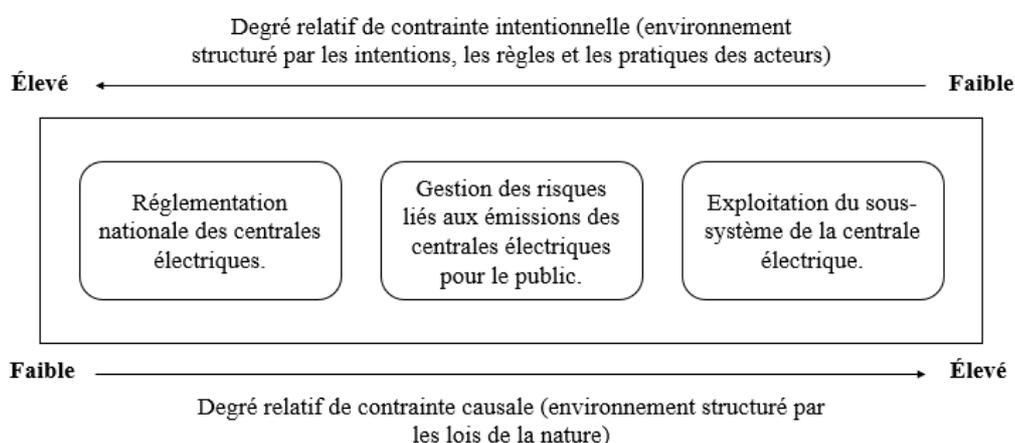


Figure 1 : Caractérisation des environnements de travail en fonction du degré relatif des contraintes intentionnelles et causales.

- Extrait et traduit de Hajdukiewicz et al. 1999 -

Au-delà de leur position sur ce continuum, les systèmes sociotechniques se différencient également en fonction de la nature du couplage qui unie l'organisation et le domaine de travail. Les opérateurs et les machines constituent l'organisation du travail, et cette organisation intervient sur le domaine de travail pour assurer son contrôle. Dans la définition donnée par Hollnagel (2008), le couplage c'est lorsque les composants du système sont connectés les uns aux autres dans un sens fonctionnel. Selon le niveau de dépendance entre ces composants, le couplage peut être serré/fort ou lâche/faible. Glassman (1973) classe le degré de couplage entre deux systèmes en fonction des variables que ces deux systèmes partagent. Lorsque deux systèmes ont peu de variables en commun ou partagent des variables faibles, ils sont indépendants l'un de l'autre. On parle de systèmes faiblement couplés. À l'inverse, lorsque deux systèmes partagent de nombreuses variables, ils sont dépendants l'un de l'autre, on parle de systèmes fortement couplés. Chaque type de système possède des caractéristiques propres :

- Au sein des systèmes fortement couplés, le contrôle repose essentiellement sur des normes, des procédures standardisées, ou des systèmes automatiques capables d'exécuter les plans d'actions prédéterminés. Les relations entre les variables sont essentiellement basées sur la conditionnalité (Ashby 1962). Le niveau de standardisation est élevé, les retards de traitement ne sont pas possibles et les séquences d'activités sont invariables (Hollnagel 2008 ; Flach 2012). Les degrés de liberté sont faibles et l'autonomie laissée aux opérateurs est réduite dans le but de minimiser l'incertitude et éviter les risques (Grote 2016). Du fait de la présence de dépendances fortes entre les différentes parties du système, le risque et les erreurs se propagent rapidement au sein des systèmes fortement couplés (Cook & Rasmussen 2005 ; Hollnagel 2008 ; Underwood & Waterson 2013).
- Au sein des systèmes faiblement couplés, les relations entre les variables sont plus probabilistes que déterministes. En effet, le domaine de travail évolue de façon dynamique et incertaine et les actions des machines et des opérateurs ne peuvent être déterminées en amont. Les délais de traitement sont possibles et les séquences d'activités peuvent varier (Flach 2012). Le contrôle repose alors sur la flexibilité et la capacité de l'organisation à faire face à l'incertitude. Les degrés de libertés sont nombreux et l'autonomie laissée aux opérateurs est grande pour favoriser l'auto-organisation et l'adaptation (Grote 2016). Ce type de couplage lâche permet une auto-organisation entre les opérateurs pour une adaptation en temps réel à des situations anormales (Grote 2015).

Ainsi, sur la base de ces concepts généraux, il est possible de caractériser un système en fonction de sa sensibilité aux perturbations externes, de la nature plus ou moins causale ou intentionnelle de ses contraintes, ou encore de la nature serré ou lâche du couplage unissant ses différents composants. Tentons maintenant de caractériser le système de l'urgence médicale qui sera le système étudié tout au long de ce travail. L'objectif étant de proposer une caractérisation précise du système étudié afin de sélectionner des méthodes d'analyse appropriées et capables de saisir toutes les particularités de ce système.

2. Les particularités du système médical en situation d'urgence

Concernant l'identification de la nature des contraintes, le système médical peut occuper différentes positions sur le continuum « causal – intentionnel » défini préalablement (Figure 2). En effet, si l'on réduit le système médical à des actions appliquées sur un patient qui se définit comme un système biologique autonome composé d'un ensemble de sous-systèmes, eux-mêmes constitués d'organes et de composants ayant des fonctions communes, alors le système médical est principalement causal. Les lois de fonctionnement du corps humain (e.g. biophysique, biochimie, biomécanique, physiologie...) sont connues et permettent de comprendre les mécanismes impliqués dans le maintien de l'homéostasie⁴. Les conséquences d'une défaillance physiologique ou encore la réponse du corps face à un potentiel traitement peuvent alors être estimées. Plus largement, si l'on considère le système médical comme un ensemble de structure de santé dont le contrôle nécessite une gestion précise des réglementations, des lois, des ressources humaines et matérielles, alors le système médical est essentiellement intentionnel. En effet, les intentions des acteurs, les politiques locales imposent des contraintes dans la gestion du système médical et impactent les décisions des gestionnaires. Situé entre ces deux extrémités du continuum, le système médical peut être perçu à l'échelle du soin, comme des actions qu'une équipe médicale réalise sur un patient pour maintenir son état stable, compte tenu du tableau clinique qu'il présente. Dans ce cas, le système médical est à la fois causal et intentionnel. En effet, le patient lui-même reste principalement régi par des lois causales (i.e. lois de fonctionnement du corps humain), tandis que le contrôle de la situation de soin est gouverné majoritairement par les intentions des soignants et des choix en termes d'organisation des soins autour du patient.

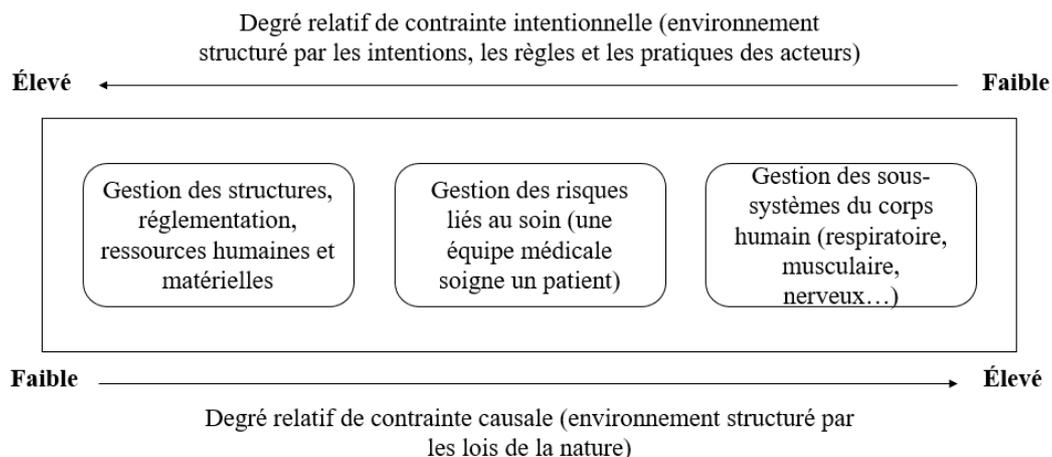


Figure 2 : Positionnement du système médical le long du continuum défini en fonction du degré relatif des contraintes intentionnelles et causales.

⁴ L'homéostasie est un processus d'auto-régulation via lequel le corps humain est capable de maintenir ses grandes fonctions physiologiques dans un état stable.

Dans ce travail, nous considérons le système médical comme situé au centre du continuum. En termes d'analyse, la coexistence des contraintes causales et intentionnelles confère au système médical une complexité toute particulière. En effet, le terme « complexe » reflète ici une double complexité provenant des propriétés de la dynamique de la situation et des propriétés de l'organisation (Flach et al. 2013). Dans le cas d'une situation médicale, cette double complexité fait référence à l'incertitude concernant l'évolution dynamique des signes vitaux du patient et à la présence d'opérateurs nombreux, ainsi qu'à la présence d'équipements médicaux variés et parfois eux-mêmes complexes.

Du côté de l'organisation, l'urgence médicale fait intervenir des équipes nombreuses, composées d'experts issus de disciplines et cultures multiples, tous accomplissant des tâches diverses et simultanées destinées à soigner le patient (Schull et al. 2001 ; Xiao et al. 1996). Même si certaines structures mettent en place des modes de fonctionnement standardisés, tels que les équipes de réaction rapide (RRT), les équipes d'urgence médicale (MET) ou les systèmes d'appel d'urgence (DeVita et al. 2004 ; Brilli et al. 2007 ; Brady et al. 2015) pour aider à la mise en place d'une organisation rapide et efficace, l'urgence est toujours unique et l'équipe médicale doit, de façon continue, coordonner et contrôler sa propre organisation dans le but de fournir au patient des soins adaptés (Carne et al. 2012). De plus, l'organisation se doit de sélectionner et manipuler, parmi les équipements médicaux présents, ceux adaptés à la mise en place des soins. Les réponses possibles en termes d'organisation sont alors nombreuses.

Du côté du patient, l'incertitude liée à la pathologie couplée aux caractéristiques individuelles du patient font que les situations médicales impliquent des espaces-problèmes larges. Par exemple, on décompte plus de 10.000 diagnostics possibles (Croskerry 2009), chacun pouvant s'exprimer différemment selon le sexe, l'âge, les antécédents du patient. De plus, le patient est un système biologique, vivant et autonome ayant sa propre dynamique et capable de s'auto-organiser pour assurer son propre contrôle. Dans ses travaux sur la cybernétique (1957), Ross Ashby assimile le patient à une « boîte noire » en référence à la théorie de la « Black Box » qu'il expose dans son ouvrage. Cette théorie souligne notamment que la résolution de problème sur un système dont les mécanismes ne sont pas entièrement connus nécessite de manipuler les entrées et observer les sorties dans le but d'inférer les mécanismes qui se produisent au sein de cette boîte noire. C'est le cas du médecin devant fournir un diagnostic rapide lors de la prise en charge d'un patient dont l'état se détériore. En effet, et à l'inverse d'un moteur que l'on peut ouvrir pour émettre un diagnostic, le fonctionnement interne du patient n'est jamais vraiment connu et doit être inféré en fonction des réponses obtenues à la suite des traitements. Miller (2004) donne l'exemple de l'asthme et écrit « *si un patient se voit attribuer un diagnostic d'asthme, alors les signes et les symptômes de l'asthme devraient être présents et devraient être soulagés par des traitements liés à l'asthme. Si les symptômes du patient ne sont pas ceux associés à l'asthme et/ou ne sont pas soulagés comme prévu, alors un autre diagnostic doit être envisagé* ». Sur la base d'hypothèses le médecin tente de comprendre les mécanismes impliqués dans la pathologie pour affiner son

diagnostic. Les soignants doivent avant tout comprendre et coupler leur activité avec la dynamique interne du patient avant de pouvoir la contrôler via la mise en place d'une organisation adaptée aux besoins.

L'adaptation continue des actions et des ressources en lien avec l'évolution dynamique du patient implique un couplage entre le domaine de travail (i.e. le patient) et l'organisation (i.e. l'équipe médicale et les équipements). Du fait des éléments présentés précédemment, notamment l'imprévisibilité des événements cliniques, la variabilité individuelle des patients concernant l'expression et l'évolution des symptômes, les caractéristiques individuelles des soignants et le caractère probabiliste et inférentiel des diagnostics, les composantes « *organisation* » et « *patient* » d'un système médical sont deux systèmes faiblement couplés et relativement indépendants, notamment lors d'une l'urgence médicale où le problème évolue en fonction des patients, et en fonction des ressources humaines et matérielles disponibles. Le contrôle d'une telle situation dépend de la capacité de l'équipe à gérer les nombreux degrés de liberté et à trouver un équilibre entre ressources et besoins. Dans ces situations, l'activité permettant le contrôle de l'organisation sur le domaine de travail ne s'effectue pas sur la base uniquement de règles prédéfinies (e.g. les « bonnes pratiques »), mais émerge de l'interaction entre l'organisation, le patient et l'état des ressources.

Ainsi, dans une démarche d'optimisation du couplage « organisation-domaine » et dans le but d'assurer les exigences de sécurité et performances, l'étude du système médical nécessite une méthode adaptée capable de saisir toute sa complexité. Cette dernière doit permettre l'analyse des systèmes complexes faiblement couplés au sein desquels dynamique, risque, incertitude sont des caractéristiques fortes et dont le contrôle repose essentiellement sur la flexibilité, l'autoadaptation et la gestion des nombreux degrés de liberté.

3. Systèmes complexes et sécurité : des besoins méthodologiques spécifiques

Face aux nouveaux challenges imposés par les caractéristiques des nouveaux systèmes sociotechniques, l'atteinte des objectifs de sécurité et performance repose sur la capacité des analystes à identifier les événements qui pourraient conduire à des accidents et à comprendre pourquoi les accidents se produisent. Dans le passé, d'importants accidents tels que *Three Miles Island* (1979), *Challenger* (1986), ou *Columbia* (2003), ont contribué à faire évoluer les méthodes d'analyse des accidents dans le but d'adapter les outils aux particularités changeantes des systèmes étudiés. Cependant, et malgré des progrès considérables, des événements indésirables et accidents continuent de se produire (e.g. *737Max* (2019)) remettant en question la pertinence des méthodes pour traiter de la complexité des systèmes actuels (Salmon et al. 2017). Comme l'écrivent Salmon et ses collaborateurs (2017), « *il est dangereux de supposer que nos méthodes restent adaptées simplement parce que nous continuons à les utiliser* ». Ainsi, et face aux nombres importants de méthodes disponibles, choisir la technique d'analyse la plus

appropriée reste un exercice critique et délicat (Underwood & Waterson 2013) qui va conditionner la puissance de l'analyse et la qualité des résultats issus de cette dernière.

Historiquement, la complexité croissante des systèmes s'est accompagnée d'une évolution des méthodes depuis les méthodes séquentielles aux méthodes systémiques, en passant par les méthodes épidémiologiques (Underwood & Waterson 2013 ; Salmon et al. 2011). Chaque méthode se caractérise en fonction des hypothèses qu'elle sous-tend et de la manière dont elle considère la sécurité et les accidents. Lorsque l'on considère l'accident comme une réponse directe à une erreur ou à une défaillance technique et que les relations entre « cause » et « événements indésirables » sont déterministes, alors les méthodes séquentielles sont utilisées pour modéliser la séquence ordonnée des événements et la cause ayant provoqué la défaillance. En effet, la modélisation séquentielle se focalise sur une succession d'événements linéaires dont le dernier événement est l'accident. En considérant la sécurité comme l'absence de défaillance, la stratégie principale repose ici sur l'identification puis la suppression de la cause afin d'éviter que l'accident ne se produise à nouveau. À titre d'exemple, la méthode de l'arbre des causes (Watson 1961) ou la méthode des dominos (Heinrich 1931) sont des méthodes séquentielles. Cependant, les méthodes séquentielles ont atteint leurs limites dès lors que les facteurs organisationnels et humains ont été identifiés comme jouant un rôle prépondérant dans certains accidents. En réponse à ce constat, les méthodes épidémiologiques ont alors été proposées. À l'image du modèle de Reason (Swiss Cheese Model), les modèles épidémiologiques envisagent l'accident comme une combinaison de conditions actives ou latentes qui se propagent au sein du système et qui peuvent s'exprimer de façon aléatoire. À l'inverse des défaillances actives, dont les effets sont immédiatement observables, les défaillances latentes peuvent rester « cachées » avant de s'exprimer inopinément (Shappell & Wiegmann 2000). L'expression aléatoire et inattendue des conditions latentes génère, à un moment donné, un contexte propice aux erreurs pouvant affecter la performance des opérateurs. Cependant, la plupart des méthodes épidémiologiques restent basées sur des principes séquentiels de causes à effets poussant les chercheurs à repenser les techniques d'analyse et à évoluer vers des outils systémiques destinés à capturer toute la complexité des systèmes sociotechniques (Underwood & Waterson 2013). Ces méthodes systémiques s'inspirent de la théorie des systèmes et tentent de fournir une analyse globale prenant en compte tous les éléments organisationnels, techniques et humains en interaction ayant pu contribuer à l'événement indésirable. Ce dernier n'est plus considéré comme le résultat d'une erreur identifiable sur la base d'une relation de cause à effet ou comme l'expression d'une défaillance latente, mais comme quelque chose qui émerge des interactions non linéaires entre tous les composants du système et plus particulièrement les éléments humains, technologiques et organisationnels (Leveson 2004 ; Underwood & Waterson 2013). Comme l'écrit Ottino (2003, p293) « *les systèmes complexes ne peuvent être compris en étudiant les parties de façon isolées. L'essence même du système réside dans l'interaction entre les parties et le comportement global qui émerge de ces interactions. Le système doit être analysé dans son ensemble, comme un tout* ». Ainsi, la stratégie de gestion du risque dans le cadre

des méthodes systémiques, repose sur l'identification de la structure du système, de ses comportements et des relations qui unissent les différents composants. Accimap (Rasmussen 1997), STAMP (Leveson 2004, 2011) et FRAM (Hollnagel 2004) sont des exemples de méthodes systémiques qui visent à comprendre, via une approche holistique, les processus qui conduisent aux accidents (Leveson 2004, Underwood & Waterson 2013). Nous présenterons ici les spécificités de ces méthodes et tenterons de montrer en quoi elles restent insuffisantes pour l'analyse du système médical en situation d'urgence.

a) Accimap

Sur la base de la théorie des systèmes, Accimap (Rasmussen 1997 ; Svedung & Rasmussen 2002) considère les accidents comme dépendants du contexte organisationnel. En utilisant une modélisation hiérarchique verticale, Accimap tente de mettre en évidence comment les événements, les défaillances et les décisions se propagent dans le système entier et conduisent aux accidents (Branford 2011). Cet outil graphique décompose le système sociotechnique en 6 niveaux organisationnels : la politique du gouvernement, les régulateurs, la politique de l'entreprise, la gestion du personnel et des équipements, et l'activité ou le travail en lui-même. Les échecs à chaque niveau sont identifiés et reliés aux niveaux inférieurs ou supérieurs pour tenter de comprendre les relations de causes à effets unissant les différents niveaux du modèle. Ici, la sécurité n'est pas uniquement dépendante des travailleurs en première ligne, mais aussi des décisions, des actions de chaque acteur impliqué dans le système comme le gouvernement ou les organismes de réglementation (Cassano-Piche 2009). Cette méthode a largement été appliquée dans une logique de compréhension des accidents dans de nombreux domaines (Salmon et al. 2011 ; Cassano-Piche 2009 ; Vicente & Christoffersen 2006 ; Svedung & Rasmussen 2002) mais certaines limites sont indéniables. Les auteurs citent notamment l'absence de taxonomie pour l'identification des échecs rendant la modélisation dépendante de la subjectivité des analystes, le fait qu'Accimap reste une méthode rétrospective utilisable qu'une fois l'accident passé, ou encore la non prise en compte de la dimension cognitive impliquée dans les décisions (Salmon et al. 2010, p 117 ; Salmon et al. 2011).

b) STAMP (Systems-Theoretic Accident Modeling)

Dans la même logique, la méthode STAMP (Leveson 2004) considère que l'identification de la cause d'une défaillance n'est pas une démarche suffisante pour assurer la sécurité. STAMP s'attaque au problème de contrôle dynamique et propose une vision holistique en intégrant à l'analyse, les facteurs techniques, humains et organisationnels. Le système est considéré comme un ensemble de composants reliés entre eux et maintenus dans un état d'équilibre dynamique par des boucles de rétroaction d'information et de contrôle. Les niveaux supérieurs contrôlent les niveaux inférieurs et ces derniers renvoient des informations (i.e. feedback) aux niveaux supérieurs. STAMP repose principalement sur les notions de contraintes, de structure hiérarchique de contrôle, et de boucle de contrôle. La sécurité est définie comme une tâche de contrôle continue dont le but est d'imposer des contraintes aux comportements du système. Les contraintes permettent de limiter les comportements du système à des

comportements sûrs. Les auteurs suggèrent que les accidents surviennent du fait d'un manque de contrôle des contraintes de sécurité. En effet, lorsqu'un composant défaille, une perturbation externe ou encore des interactions non appropriées entre composants ne sont pas identifiés et contrôlés, le non-respect de la contrainte de sécurité peut conduire à un accident (Stanton et al. 2005). Ainsi, l'analyse STAMP vise à modéliser la structure de contrôle existante et identifier pourquoi le contrôle n'a pas fonctionné ou pourquoi les contraintes n'ont pas été respectées afin de comprendre comment l'accident aurait dû être contrôlé et aurait pu être évité (Salmon et al. 2012). À chacune de ses applications (Salmon et al. 2012, 2016 ; Hardy & Guarnieri 2011 ; Leveson 2003 ; Kazaras et al. 2012 ; Ouyang 2010), la méthode STAMP nécessite d'identifier la structure de contrôle propre au système étudié, les contraintes nécessaires pour garantir la sécurité, les boucles de contrôle entre les différents niveaux, ainsi que le contexte dans lequel les décisions sont prises. Ces étapes méthodologiques sont lourdes à mettre en œuvre et nécessitent des connaissances en théorie des systèmes et théorie du contrôle faisant de STAMP une méthode plus adaptée à l'identification des défaillances techniques que l'identification des défaillances organisationnelles (Salmon et al. 2012). De plus, lorsque les informations sont indisponibles ou lors de l'analyse d'accidents de faibles ampleurs, STAMP est difficilement applicable car sa mise en œuvre nécessite des données précises et nombreuses (Salmon et al. 2011).

c) FRAM (The functional resonance accident model)

FRAM se définit comme une méthode d'analyse des accidents basée sur la variabilité de la performance normale. En effet, au sein des systèmes sociotechniques complexes, le caractère dynamique et changeant des situations nécessite des ajustements continus. Les accidents peuvent alors provenir de la variabilité dans le champ des actions normales et de la résonance imprévue entre le système et le bruit de l'environnement (Hollnagel et al. 2011 ; Ibrahim-Shire et al. 2018). Sur la base de l'identification des fonctions principales du système, FRAM cherche à détecter les modes de résonances imprévus, autrement dit les dépendances possibles entre les différentes fonctions et ainsi identifier l'impact de ces dépendances sur la performance du système (Anvarifar et al. 2017). À titre d'exemple, l'application de FRAM au contexte aérien nous indique que les fonctions du système de pilotage sont : examen des données météorologiques et aéroportuaires, briefing sur le décollage, autorisation(s) du pilote automatique, check-list de contrôle en zone d'attente, déplacement jusque zone de décollage, check-list de contrôle avant le décollage, positionnement sur la piste, décollage (Hollnagel et al. 2011). Ces fonctions se décomposent en 6 caractéristiques qui sont : entrée, sortie, contrôle, ressources, préconditions, temps. Chacune de ces 6 caractéristiques peut être reliée à une caractéristique d'une autre fonction pour représenter les interactions de telle sorte que la sortie de la fonction 1 constitue l'entrée de la fonction 2, ou encore la sortie de la fonction 3 sert de précondition à la fonction 4. Cependant, Ibrahim-Shire et al. (2018) soulignent que cette méthode ne fournit pas d'aide pour l'identification des modes de résonances, que l'analyse de la variabilité du système est fortement dépendante de l'expertise et du jugement des experts, et que FRAM ne prend pas en considération la notion de migration vers les

situations à risques mais fournit un aperçu statique des relations de contrôle qui unissent les différentes fonctions du système.

Ainsi, ces méthodes présentent toutes les trois des différences méthodologiques et possèdent des avantages et des limites qui rendent difficile leur classification en termes de pertinence. En effet, aucune méthode n'est a priori supérieure à l'autre mais leur validité s'évalue au regard des objectifs et exigences de l'analyse. Malgré le fait que notre travail possède des objectifs communs à ces méthodes, à savoir comprendre les interactions dynamiques entre les différents éléments organisationnels, techniques et humains du système, saisir la complexité des processus qui conduisent aux situations risquées, développer des systèmes plus sûrs et performants, ces méthodes semblent peu adaptées à l'analyse du système médical en situation d'urgence. Au sein du système médical, analysé à l'échelle de la prise en charge d'une urgence vitale, le contrôle repose principalement sur la flexibilité, l'autoadaptation et la capacité des opérateurs à contrôler les nombreux degrés de libertés disponibles. Pour un même objectif, l'ensemble des solutions possibles en termes d'organisation est tel qu'il est difficilement discernable. Il en est de même pour les liens unissant les différents éléments du système. Ces derniers ne sont pas parfaitement identifiables et changent en fonction des soignants, de leur nombre, de leurs caractéristiques personnelles, des outils disponibles, des spécificités de la pathologie et du patient. De ce fait, la question du choix de la méthode la plus appropriée pour analyser le système de travail propre à l'urgence médicale reste ouverte. Une méthode inadaptée ne permettrait pas de capturer pleinement la complexité du système et fournirait une compréhension incomplète voire erronée de ce dernier.

Ces besoins méthodologiques et la nécessité de développer des méthodes d'analyses adaptées aux particularités du système médical afin de contribuer à la conception de systèmes qui assurent la sécurité des patients sont confirmés au sein de la littérature. Sur la base des travaux de Perrow (1984), Hollnagel (2008) propose de caractériser les méthodes d'analyse au regard de deux dimensions : la nature du couplage et la facilité de contrôle ou ce qu'il nomme la traçabilité du système. Ces deux dimensions identifient quatre classes de système : faiblement couplé et traçable ; fortement couplé et traçable ; faiblement couplé et non traçable ; fortement couplé et non traçable. La figure 3 nous montre comment certains systèmes se répartissent et se classent le long de ces deux dimensions. Notons qu'un système est traçable lorsque ses principes de fonctionnement sont connus, facilement descriptibles et que le système ne change pas pendant qu'il est décrit. À l'inverse un système est non traçable si les principes de fonctionnement ne sont que partiellement connus. Ces systèmes changent constamment et sont difficilement descriptibles. Via l'identification de ces quatre cadrans, les auteurs montrent qu'une méthode utilisée pour comprendre les risques dans un système du quadrant inférieur gauche, ne sera pas adaptée à l'analyse des risques dans un système du quadrant supérieur droit. Les méthodes séquentielles seraient particulièrement adaptées aux systèmes faiblement couplés et traçables, les méthodes épidémiologiques aux systèmes fortement couplés et traçables, et les méthodes systémiques aux systèmes fortement couplés et non traçables (Underwood & Waterson 2013).

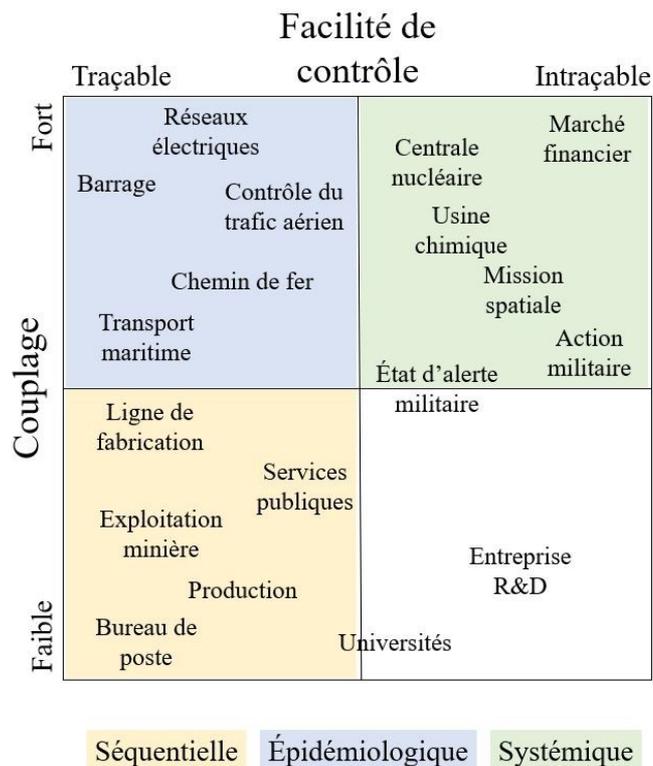


Figure 3 : Classification des systèmes selon la nature de leur couplage et leur facilité de contrôle.

Chaque cadrant définit un type de système : faiblement couplé et traçable (bas gauche) ; fortement couplé et traçable (haut gauche) ; faiblement couplé et non traçable (bas droite) ; fortement couplé et non traçable (haut droite). À chaque cadrant correspond un type de méthode séquentielle, épidémiologique ou systémique. Aucune méthode n'est applicable aux systèmes faiblement couplés et non traçables.

- Traduit de Hollnagel 2008 et Underwood & Waterson 2013 -

En proposant cette classification destinée à guider les analystes dans la phase critique de sélection des méthodes, la littérature souligne le manque méthodologique concernant l'analyse des systèmes faiblement couplés et non traçables, catégorie au sein de laquelle nous situons les systèmes médicaux dans ce travail. L'un des premiers objectifs sera donc de fournir des solutions méthodologiques pour répondre à ce manque.

Depuis cette classification, une nouvelle méthode s'est intéressée à l'analyse des systèmes faiblement couplés et intraçables : la méthode hCWA (Morineau & Flach 2019). Les premiers travaux appliqués à l'analyse de situations d'urgence médicales permettent d'envisager la hCWA comme un cadre général adapté au développement d'outils méthodologiques capables de saisir toute la complexité du système médical. Dans sa présentation, la hCWA se veut être une extension de la CWA : « *The Cognitive Work Analysis* » (Rasmussen 1986 ; Vicente 1999b), faisant de cette dernière un pilier méthodologique à ce travail. En ce sens, nous présenterons dans un premier temps le cadre général de la CWA ayant servi de base au développement de la hCWA. Une fois les fondements théoriques et méthodologiques de la CWA

exposés, nous aborderons ses limites, notamment celles ayant poussés certains auteurs à développer des solutions méthodologiques alternatives. Notre objectif étant de maîtriser les spécificités de la CWA pour être en mesure de s'en inspirer et d'étendre son application à l'analyse des systèmes faiblement couplés pour lesquels de nouveaux besoins méthodologiques ont été mis en évidence. La présentation se focalisera ensuite sur les caractéristiques de la méthode hCWA. Pour finir, nous exposerons notre contribution à la hCWA via l'application de la méthode à des situations variées dans un premier temps, puis via le développement de nouveaux outils méthodologiques destinés à modéliser l'activité des opérateurs.

II. La Cognitive Work Analysis (CWA)

Une source d'inspiration pour le développement d'outils méthodologiques nouveaux

1. Présentation générale et fondements

La CWA est définie comme une méthode d'analyse et d'évaluation des systèmes sociotechniques complexes dont le but est d'améliorer leur conception (Fidel & Pejtersen 2004 ; Lintern 2013 ; Naikar 2017 ; Read et al. 2012). Développée à l'origine pour répondre aux problématiques de contrôle dans les centrales nucléaires (Rasmussen 1986), les travaux de Kim Vicente ont permis d'étendre la CWA et d'élargir sa diffusion (Vicente 1999b). Aujourd'hui, les applications sont nombreuses et concernent des domaines multiples dont le domaine maritime (Blanche et al. 2006 ; Burns et al. 2000 ; Procee et al. 2017), le contrôle aérien (Ahlstrom 2005), la conduite automobile (Birrell et al. 2012), le domaine militaire (Jenkins et al. 2008), le domaine sportif (Hulme et al. 2019 ; McLean et al. 2017), et également le domaine médical (Burns et al. 2006 ; Effken et al. 2001, 2011 ; Jiancaro et al. 2014).

À l'inverse des méthodes descriptives et normatives, qui respectivement se focalisent sur une description du travail tel qu'il est et tel qu'il devrait être, la CWA est une méthode formative destinée à comprendre comment le travail peut être potentiellement effectué (Rasmussen et al. 1994 ; Vicente 1999b ; Sanderson 1998). Le cadre d'analyse proposé par la CWA reconnaît que les possibilités pour contrôler une situation sont nombreuses et que les opérateurs disposent d'une certaine liberté vis-à-vis de ce qu'ils doivent faire, quand et comment (Naikar 2006). Ainsi, la CWA ne s'intéresse plus uniquement à l'activité en elle-même mais à l'identification et la modélisation des contraintes auxquelles les travailleurs sont soumis et qui vont délimiter le champ des actions possibles (Naikar 2013). En faisant des contraintes du système la première unité de l'analyse, la CWA participe à la conception de systèmes qui favorisent la mise en place des comportements flexibles et adaptatifs indispensables pour faire face aux situations non familières⁵ et inattendues (Naikar 2017).

Bien que les apports principaux de la CWA concernent la conception d'interfaces, cette méthode s'étend à d'autres problématiques plus générales liées aux facteurs humains et à l'ingénierie (Naikar 2017 ; Read et al. 2012). Des études montrent la pertinence de la CWA comme technique d'évaluation des solutions de conception d'un système (Naikar et al. 2000 ; Naikar & Sanderson 2001), l'étude des besoins en

⁵ Une situation inconnue ou non familière est une situation pour laquelle les combinaisons de situations n'ont jamais été rencontrées auparavant. L'opérateur ne peut alors utiliser une méthode de travail standard et/ou des connaissances de référence, ni pour comprendre ce qui se passe, ni pour choisir une action efficace pour faire face au problème (Bainbridge 1997).

termes de formation (Naikar & Sanderson 1999), l'étude de la conception du travail d'équipe pour les systèmes complexes (Naikar et al. 2000, 2002), l'étude des compétences techniques dans la gestion des erreurs humaines (Naikar & Saunders 2003), l'étude de la distribution des rôles au sein des différents acteurs (Jenkins et al. 2008) ou encore de la gestion de crise en anesthésie (Hall et al. 2006). Cette méthode trouve également des applications tout au long du cycle de vie d'un système (Sanderson et al. 1999).

D'un point de vue théorique, la CWA se base sur trois fondements qui sont : la notion de système, la psychologie écologique, et le contrôle adaptatif (Fidel & Pejtersen 2004). La notion de système ayant été préalablement présentée, nous détaillerons ici la psychologie écologique et le contrôle adaptatif.

a) La psychologie écologique

L'approche écologique représente un fondement essentiel de la CWA dans la manière d'aborder l'être humain au travail. Dans son approche écologique de la perception (Gibson 1979), le psychologue américain James Gibson défend l'idée que la perception ne peut être expliquée qu'au travers une relation indissociable entre un organisme vivant et son environnement. L'organisme vivant agit dans un environnement en fonction de ce qu'il perçoit, en fonction de ce que l'environnement lui offre comme possibilités d'actions. En retour, ce qu'il perçoit ou peut percevoir va dépendre de ses actions et déplacements dans l'environnement. Pour citer Gibson : « nous devons percevoir pour agir mais nous devons aussi agir pour percevoir » (Gibson 1979). La perception est dite « active » parce qu'elle est possible via une exploration active de l'environnement. Cette idée se rapproche de l'approche formative défendue par la CWA qui tente d'analyser les potentialités d'opérations sur un domaine de travail.

Cette boucle dynamique entre perception et action est à l'origine du concept d'affordance, un des concepts clés caractérisant cette approche. En effet, Gibson propose que notre environnement possède des caractéristiques signifiantes qui stimulent notre perception et orientent nos actions. Nommées affordances, ces caractéristiques signifiantes traduisent des possibilités d'actions qui, elles, dépendent des capacités et des caractéristiques intrinsèques de l'organisme vivant en question. L'étude réalisée par Warren (1984) va dans ce sens en montrant que la perception du caractère « montable » d'un escalier dépend des caractéristiques des individus, de leurs tailles et de la longueur de leurs jambes, autrement dit de leur biomécanique. Un second exemple plus trivial de ce concept d'affordance est celui de la chaise. Pour un être humain adulte, la chaise constitue une affordance en l'invitant à s'asseoir dessus. Pour un bébé, dont les capacités et caractéristiques intrinsèques diffèrent, la chaise sera perçue comme un moyen de se redresser et de se tenir debout. Un même objet peut donc fournir différentes possibilités d'actions qui vont dépendre des capacités propres des individus. Réciproquement, un individu développera un comportement sur la base des différentes affordances que lui offre son environnement.

Néanmoins, et même si Gibson considère l'affordance comme une donnée invariante de l'environnement, cette dernière n'est pertinente que si l'organisme la perçoit. Contrairement aux théories cognitives qui envisagent la perception comme se réalisant à l'intérieur du cerveau en faisant appel à nos expériences passées pour interpréter les signaux perceptibles par nos sens, la théorie écologique de la perception visuelle repose sur la notion de perception directe (Luyat & Regia-Corte 2009). Ainsi, les affordances sont perçues sans traitement ou inférence préalable. Perception et action émergent donc de l'interaction entre un agent et son environnement. Donner aux opérateurs la possibilité de s'adapter et de faire face à la complexité nécessite donc de considérer l'environnement comme une source d'affordances. Ces dernières peuvent être mises en lumière ou façonnées de sorte à déclencher les comportements appropriés.

L'une des principales contributions de l'approche écologique dans l'analyse des systèmes sociotechniques est de souligner l'importance du domaine du travail, comme constituant le cœur du sens qui anime les activités humaines (Flach & Voorhost 2016). En effet, de la même façon que la psychologie écologique met en évidence un lien indissociable entre un organisme vivant et son environnement, la CWA souligne l'importance du lien entre l'opérateur et son domaine de travail. La CWA envisage le travail, non plus comme une succession de procédures à respecter, mais comme un champ des possibles qui émerge de l'interaction entre un individu et son domaine de travail. La CWA cherche à analyser les contraintes qu'impose le domaine de travail sur les comportements des individus afin de délimiter l'ensemble des actions possibles et ainsi comprendre comment ces actions vont pouvoir se mettre en place (Vicente 1999b). Adaptation, flexibilité, prise de décision sont alors au cœur de la méthode et sont abordés dans le troisième et dernier concept ci-dessous.

b) Le contrôle adaptatif

Appliqué aux systèmes automatiques, le contrôle adaptatif fait référence aux techniques d'ingénierie permettant aux machines de réguler des situations dynamiques indépendamment des humains. L'adaptation correspond aux modifications en ligne des actions de contrôle en fonction de l'évolution de l'état courant d'un système en comparaison à un état souhaité. Par exemple, la masse d'un avion diminue lentement en cours de vol en raison de la consommation de carburant. À des fins de sécurité et performance, des actions de contrôle doivent être mises en place pour s'adapter aux évolutions continues des conditions de vol (Sheridan 2011).

Concernant les systèmes humains, Flach et ses collègues (2017) ont proposés un modèle des mécanismes de contrôle adaptatif pour rendre compte des comportements associés à la prise de décision. À l'inverse de l'approche classique, qui modélise la prise de décision humaine comme un processus discret⁶ exécuté

⁶ Un processus est discret s'il est composé d'un nombre fini de valeurs.

en boucle ouverte⁷, le modèle du contrôle adaptatif présenté par les auteurs envisage la résolution de problème comme un processus dynamique, exécuté en boucle fermée⁸ et dépendant d'une évaluation continue des exigences de la situation. L'opérateur humain doit constamment surveiller l'environnement, à la recherche d'indices anormaux ou imprévus, tout en évaluant les résultats des mesures précédentes pour s'adapter et répondre aux exigences de la situation. Cependant, les possibilités d'adaptation étant nombreuses, il est impossible pour un ingénieur de lister toutes les combinaisons possibles et de concevoir un système qui s'adapte à chaque facteurs individuels et situationnels possibles. Pour y parvenir, une méthode spécifique est nécessaire pour prendre en compte la structure profonde du problème, autrement dit la dynamique du processus étant contrôlé, i.e. le domaine de travail (Flach et al. 2017 ; Naikar 2013). L'attention ne se focalise plus sur l'activité en elle-même mais sur les contraintes qui vont délimiter l'espace-problème, espace au sein duquel les opérateurs doivent adapter continuellement leurs comportements aux exigences changeantes de la situation (Naikar & Elix 2015).

Ainsi, sur la base des connaissances issues des 3 grands fondements de la CWA, à savoir la notion de système, la psychologie écologique et le contrôle adaptatif, le cadre général proposé par la CWA envisage la situation de travail comme un système complexe au sein duquel des éléments techniques et humains interagissent dans un environnement donné. De par leurs caractères dynamiques, incertains, interconnectés et risqués, ces systèmes imposent des nouvelles demandes sur les opérateurs notamment lors des tâches de supervision et résolution de problème. Soutenir les opérateurs dans ce type de tâche, dans une logique de performance et de sécurité des systèmes, nécessite le développement d'assistances qui supportent les comportements adaptatifs. Pour y parvenir, la CWA ne considère plus le travail comme une liste de procédures à réaliser mais comme un espace de possibilités (i.e. d'affordances) délimiter par des contraintes. D'un point de vue méthodologique, la CWA tente de définir ces contraintes et comprendre les comportements mis en place au sein de l'espace qu'elles délimitent. Les propositions d'améliorations issues de cette analyse sont supposées être adaptées à la fois aux contraintes, à l'espace de liberté qu'elles dessinent, et favoriser la mise en place de comportements adaptatifs. En rendant visibles les objectifs, les contraintes et les affordances du domaine, la CWA aide les opérateurs à reconnaître rapidement ce qui est possible de faire et quelles sont leurs options pour contrôler des situations imprévues pour lesquelles les procédures classiques ne sont pas adaptées (Roth & Bisantz 2013, p240).

D'un point de vue conceptuel, ces caractéristiques font de la CWA un cadre général pertinent pour l'analyse des systèmes faiblement couplés et non traçables. En effet, les notions de contraintes et degrés de liberté sont centrales et la méthode se veut favorable à l'adaptation. Néanmoins, certains aspects de

⁷ Un système de régulation en boucle ouverte ne prend pas en compte la réponse du système dans le contrôle (i.e. les boucles de rétroaction ou feedback).

⁸ Un système de régulation en boucle fermé prend en compte la réponse du système dans le contrôle.

la méthodologie proposée présentent des limites. Après avoir présenté les étapes méthodologiques de la CWA et ses outils spécifiques, nous mettrons en évidence ces limites.

2. Méthodologie

Pour analyser et comprendre les opérateurs qui évoluent dans ces systèmes complexes il faut comprendre la nature profonde de leur travail et l'ensemble des contraintes qui vont influencer leurs comportements. Cela nécessite la compréhension des objectifs qu'ils doivent accomplir, des priorités qu'ils doivent respecter, des tâches qu'ils doivent réaliser, des décisions qu'ils doivent prendre, des stratégies qu'ils peuvent adopter et des équipements qu'ils peuvent utiliser (Naikar 2013).

La CWA se compose de 5 phases d'analyse (Tableau 1). Chacune d'entre elle identifie une catégorie de contrainte auquel un système sociotechnique est soumis (Vicente 1999b) :

- L'analyse du domaine de travail (WDA pour « Work Domain Analysis ») ;
- L'analyse des tâches de contrôle (ConTa pour « Control Task Analysis ») ;
- L'analyse des stratégies (SA pour « Strategies Analysis ») ;
- L'analyse de l'organisation sociale et de la coopération (SOCA pour « Social Organization and Cooperation Analysis ») ;
- L'analyse des compétences des travailleurs (WCA pour « Worker Competencies Analysis »).

Cette séquence d'analyse respecte une transition depuis les contraintes écologiques liées au domaine de travail vers les contraintes cognitives liées aux opérateurs. Ces contraintes sont emboîtées les unes dans les autres et forment l'espace des actions disponibles (ou degrés de liberté) au sein duquel les opérateurs peuvent mettre en place des comportements flexibles et adaptés à la situation de travail.

Parmi ces 5 étapes, les deux premières sont les plus utilisées dans les travaux utilisant la CWA comme cadre d'analyse (Hajdukiewicz et al. 1998 ; Morineau et al. 2013 ; Naikar et al. 2005, 2006 ; Sanderson 1998 ; Read et al. 2015). Ces deux étapes, WDA et ConTa, feront l'objet d'une présentation et d'une critique plus approfondie.

Tableau 1 : Présentation des cinq dimensions de la « Cognitive Work Analysis »

(Vicente 1999b ; Naikar 2006, 2017)

Étape de la CWA	Objectif	Outil méthodologique
WDA	L'analyse du domaine de travail modélise les contraintes du système sur lequel l'opérateur agit indépendamment des travailleurs, automatisation, événements, tâches, buts ou interfaces (Vicente 1999b, p150). Ces contraintes environnementales peuvent être physiques, culturelles ou sociales, et dépendent des objectifs,	Hiérarchie d'Abstraction et de Décomposition

	des priorités et des ressources disponibles. Cette étape d'analyse fournit une description du terrain sur lequel se déroule l'activité, définissant ainsi le champ des actions possibles (i.e. les affordances) au sein de cet environnement.	
ConTa	Complémentaire à la WDA, l'analyse des tâches de contrôle permet d'identifier les contraintes sur ce qui doit être fait indépendamment de « Comment » ou « Par qui ». L'étape ConTa permet l'analyse de l'activité mise en place pour atteindre les objectifs compte tenu des ressources disponibles. La tâche de contrôle représente le moyen, pour les opérateurs d'agir sur le domaine de travail décrit précédemment.	Échelle de décision ou Modèle d'activité contextuelle
SA	L'analyse des contraintes stratégiques a pour objectif de comprendre quelles sont les façons possibles de réaliser l'activité identifiée précédemment. Cette fois-ci, on s'intéresse à « Comment » le travail peut être fait.	Carte des flux d'information
SOCA	L'analyse de l'organisation et de la coopération sociale permet de comprendre « Par qui » l'activité doit être réalisée en étudiant les contraintes d'attribution, de répartition et de coordination du travail dans le système.	Diagramme des possibilités d'organisation du travail
WCA	Pour finir, l'objectif de cette dernière étape est d'analyser quels sont les besoins des opérateurs en termes de compétences afin de répondre à la demande du système et comment cette demande peut être gérée compte tenu des capacités cognitives de l'Humain.	Taxonomie des Compétences, Règles, Connaissances

a) WDA – Analyse du domaine de travail

i. Les objectifs

Comme présenté brièvement dans le tableau précédent (Tableau 1), l'analyse du domaine de travail a pour objectif de modéliser les contraintes liées au domaine dans lequel le travailleur opère (Naikar et al. 2005) et d'identifier les possibilités d'actions (i.e. les affordances) que l'environnement offre aux opérateurs. Pour rappel, le domaine de travail est considéré comme « ce sur quoi l'opérateur agit », indépendamment des travailleurs, automatisations, événements, tâches, buts ou interfaces (Vicente 1999b). À titre d'exemple, le patient est considéré comme le domaine de travail de l'anesthésiste (Hajdukiewicz et al. 1998), la frégate représente le domaine de travail du pilote de la marine (Burns et al. 2000), ou encore l'espace aérien est le domaine de travail du contrôleur aérien (Ahlstrom 2005).

Dans son ouvrage consacré à la CWA, Vicente utilise la célèbre parabole de la fourmi d'Herbert Simon (Simon 1981) pour illustrer ses propos et justifier l'importance de l'analyse du domaine de travail

(WDA) pour donner du sens aux comportements mis en place par les opérateurs. Imaginons une fourmi sur une plage et observons ses comportements, et plus particulièrement sa trajectoire. La figure 4 représente une trajectoire fictive pouvant être observée entre le point d'entrée de la fourmilière et le lieu où se trouve la nourriture. H. Simon écrit que « vue comme une figure géométrique, la trajectoire de la fourmi sur la plage est irrégulière, complexe, difficile à décrire » (Figure 4A). Ce n'est qu'en prenant en compte les particularités de la plage (e.g. présence d'obstacles) que le comportement de la fourmi et ses choix d'orientation peuvent être compris (Figure 4B). La complexité de la trajectoire est liée à la complexité de la plage, et pas uniquement à la complexité de la fourmi.

L'étude des caractéristiques de la plage et des contraintes qu'elle impose sur la fourmi sont donc indispensables pour comprendre le comportement de cette dernière. En effet, les particularités de la plage, sa taille, la présence ou non d'obstacles, définissent un ensemble de trajectoires que la fourmi, compte tenu de ses propres caractéristiques, pourra ou non emprunter dans sa quête de nourriture. Il en est de même pour l'opérateur dans une situation de travail donnée où les contraintes réduisent les comportements à un ensemble d'actions possibles compte tenu du but (Chevalier & Cegarra 2008). De la même façon que les trajectoires de la fourmi dépendent de la plage, les comportements des opérateurs sont dépendants du domaine de travail sur lequel ils effectuent leur contrôle. L'analyse du domaine de travail représente l'étude des particularités de la plage indépendamment de la fourmi, de ses caractéristiques, de son but.

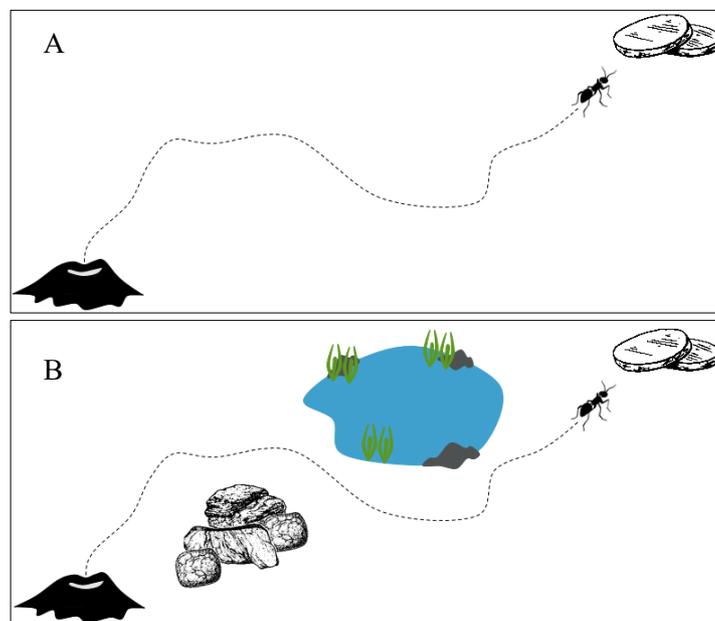


Figure 4 : La parabole de la fourmi d'Herbert Simon (1981).

Illustre l'importance de l'environnement pour comprendre les comportements observables. Vue comme une simple forme géométrique la trajectoire de la fourmi est complexe (A). Une fois corrélée à l'environnement et à ses particularités, le comportement et les choix de la fourmi apparaissent adaptés à la situation (B).

À titre illustratif, dans le domaine de l'aviation, il nous serait difficile d'énumérer de façon précise toutes les positions ou trajectoires qu'un avion pourrait prendre à l'échelle de la planète. Les possibilités dans les 3 dimensions de l'espace étant extrêmement nombreuses. Néanmoins, comme le soulignent Flach & Voorhost (2016, p213), il serait possible de décrire des contraintes réduisant certaines possibilités. Par exemple, les lois en aéronautique et aérodynamique vont limiter des chemins possibles. Les caractéristiques de l'avion, telles que la taille des ailes ou la capacité du réservoir vont elles aussi limiter les trajectoires possibles. Ainsi, compte tenu de ces contraintes, des trajectoires désirables et un espace de navigation au sein duquel un pilote pourra voyager en toute sécurité seront identifiables. La phase d'analyse du domaine de travail a pour but de définir cet espace des possibilités.

ii. Les outils

Pour modéliser le domaine de travail, l'Espace Abstraction-Décomposition (« *Abstraction- Decomposition Space* ») proposé dans les travaux de Rasmussen (1986) est utilisé. Composée de deux dimensions, une dimension « abstraction » basée sur des relations de type « moyens-fins » et une dimension « décomposition » basée sur des relations de type « partie-tout », cette matrice permet d'identifier la complexité inhérente au domaine étudié en fournissant une description de l'espace (i.e. la plage) dans lequel les activités de résolution de problème des opérateurs peuvent être cartographiées comme des trajectoires associées à un objectif (Vicente 1999b, p157). La dimension d'abstraction est représentée verticalement et se nomme couramment la hiérarchie d'abstraction. La dimension de décomposition est représentée horizontalement et se nomme la hiérarchie de décomposition. Tentons ci-dessous de décrire ces dimensions et leurs particularités.

- La hiérarchie d'abstraction (AH) et les relations de types « fins-moyens »

À l'origine, la hiérarchie d'abstraction (AH) est une méthode d'analyse fonctionnelle proposée par Jens Rasmussen (1985) et développée dans le cadre d'études visant à la détection de pannes dans les systèmes électroniques et le contrôle de supervision des centrales électriques (Rasmussen 1985 ; Lind 2003). Cette technique d'analyse repose sur la notion d'affordance propre à la psychologie écologique. Elle permet d'envisager la description d'un domaine de travail en termes de possibilités d'actions (Vicente 1999a). La AH se veut un outil d'analyse permettant de représenter la plage, autrement dit l'espace-problème au sein duquel l'opérateur raisonne pour contrôler la situation. L'espace-problème peut se définir comme un espace au sein duquel se trouvent les processus de recherche de résolution à un problème.

La AH permet de décrire un domaine de travail en 5 niveaux d'abstraction fonctionnelle connectés par des liens structuraux de types « fins-moyens ». Les niveaux inférieurs servent de *moyens* pour atteindre les *fins* des niveaux supérieurs. Pour s'assurer de la cohérence des liens structuraux unissant les différents niveaux de la hiérarchie d'abstraction, la triade « Pourquoi, Quoi, Comment » est utilisée (Vicente 1999b). Ainsi, pour un niveau donné correspondant au « Quoi ? », le niveau inférieur répond

à la question « Comment ? » tandis que le niveau supérieur répond à la question « Pourquoi ? » (Tableau 2).

La description d'un domaine par cette méthode hiérarchique commence par le niveau le plus abstrait et descend ensuite vers une description plus fine permettant de décrire (1) pourquoi le système existe et quels sont ses objectifs généraux ; (2) quelles lois ou fonctions abstraites régissent le comportement des objets du domaine ; (3) quelles fonctions générales, processus ou mécanismes permettent la mise en œuvre des fonctions abstraites ; (4) comment l'opérateur intervient sur ces objets ; et (5) comment les objets sont représentés dans le monde physique, leur forme, leur apparence. Alors que les trois premiers niveaux définissent les raisons du comportement du domaine de travail, les deux derniers définissent les ressources disponibles pour atteindre les buts fonctionnels (Naikar et al. 2005).

Selon Vicente (1999a), la hiérarchie d'abstraction est une technique d'analyse qui est :

- Indépendante des événements : à l'inverse des techniques d'analyse dépendantes des événements, qui basent l'analyse sur une classe finie d'événement déclencheurs, la AH se détache des événements, tâches, situations ou contextes propres au domaine étudié. La AH représente alors des catégories de contraintes et des relations structurelles indépendamment des situations ou événements particuliers dans le but de saisir toutes les actions possibles dans un domaine de travail (Naikar et al. 2005). La AH veut ainsi fournir aux utilisateurs un soutien informationnel adapté à un large éventail d'événements, y compris les événements qui ne sont pas familiers et qui n'ont pas été anticipés par les concepteurs.
- Indépendante des dispositifs : la AH permet aux concepteurs de se détacher des dispositifs existants qui peuvent être sous-optimaux ou non-adaptés et ainsi être ouverts à de nouvelles possibilités de conception.
- Psychologiquement pertinente : la AH se veut produire des représentation externes (e.g. des interfaces utilisateurs) qui soutiennent naturellement les processus cognitifs des utilisateurs.

L'objectif de la hiérarchie d'abstraction est donc de refléter la structure profonde du domaine de travail étudié et d'identifier les besoins informationnels nécessaires aux opérateurs pour faire face aux situations imprévues (Vicente 1999, p163) dans le but de guider la conception de dispositifs plus ergonomiques et écologiques (i.e. des interfaces ou des nouvelles organisations du travail).

À titre d'exemple, le tableau 2 illustre une application de la Hiérarchie d'Abstraction au fonctionnement d'un radiateur électrique (Morineau & Billet 2007) et permet de saisir la chronologie des étapes et la nature des liens unissant ces 5 niveaux d'analyse.

Tableau 2 : Application de la hiérarchie d'abstraction à un radiateur électrique.

Pour faciliter la lecture, les relations sont représentées aux niveaux 2 et 4 mais s'appliquent à chacun des 5 niveaux. Les déplacements de haut en bas dans la hiérarchie d'abstraction expliquent comment un processus, une fonction ou un but peut être atteint. Les déplacements de bas en haut indiquent pourquoi un dispositif, un processus ou une fonction existe.

Niveau	Dénomination	Contenu du niveau	
1	Objectifs fonctionnels	Maintenir une température donnée dans une pièce.	Pourquoi ? ↑
2	Fonctions Abstraites	Lois de conservation des énergies et de conduction électrique.	Quoi ↓
3	Fonctions généralisées (ou processus)	Mise en marche ou arrêt du système, alimentation en électricité, comparaison entre température attendue et température actuelle, arrêt du chauffage une fois la température atteinte.	Comment ?
4	Fonctions Physiques	Branchement électrique, position de la sonde détectant la température.	Pourquoi ? ↑
5	Formes physiques	Bouton, manette, indicateur, voyant visuel rouge ou vert.	Quoi ↓ Comment ?

➤ La dimension de décomposition et les relations de types « partie-tout »

Alors que la hiérarchie d'abstraction décrit le même objet à des niveaux d'abstraction différents, l'étape de décomposition structurelle divise le système étudié en différents niveaux de détails : le système entier, les sous-systèmes et les composants des sous-systèmes (Naikar et al. 2005). La dimension de décomposition repose sur des relations de type « partie-tout » où les composants font partie des sous-systèmes qui eux-mêmes font partie du système global.

Par exemple, le système « voiture » peut se décomposer en un sous-système « moteur », « chaîne de transmission », « espace passager », et les composants du moteur peuvent être « injection », « chambre à carburant », « piston ». Bouger de gauche à droite le long de cette dimension revient à réaliser un « zoom » permettant d'accéder à une vision plus détaillée du domaine de travail. À l'inverse bouger de droite à gauche permet de « dézoomer » et donc perdre en granularité pour obtenir une vision plus générale du même domaine de travail (Vicente 1999b).

➤ L'Espace Abstraction-Décomposition (Abstraction Decomposition Space – ADS)

L'association des dimensions Abstraction et Décomposition forme une matrice à 2D (Tableau 3) où chaque cellule est une représentation différente du même domaine de travail (Vicente 1999b).

Tableau 3 : Représentation de l'espace Abstraction-Décomposition formé par l'utilisation conjointe de la hiérarchie d'abstraction en ligne et la décomposition structurelle en colonne.

Chaque cellule propose une représentation différente d'un même domaine de travail. Au sein de cette matrice, une activité de résolution de problème fictive est cartographiée sous forme de trajectoire.

Abstraction \ Décomposition	Décomposition		
	Système Global	Sous-Systèmes	Composants
Objectifs généraux	①		
Fonctions Abstraites	②		
Fonctions Généralisées		③ → ④	
Fonctions Physiques		⑥ ← ⑤	
Formes Physiques			Ok

Sur la diagonale de l'espace « Abstraction-Décomposition » (ADS), la cellule en haut à gauche représente les objectifs généraux du système global alors que la cellule en bas à droite représente les formes physiques des composants individuels du système. Comme le signalent Naikar et ses collègues dans leurs travaux sur l'analyse du domaine de travail (Naikar et al. 2005), les études de Rasmussen menées en 1979 ont permis de montrer que pour répondre à la demande et aux objectifs de la tâche, les travailleurs experts ont tendance à changer leur niveau d'attention et à se déplacer entre une représentation du système entier et une représentation détaillée des composants. Ainsi, les opérateurs tendent à naviguer dans cet espace 2D le long de la diagonale (Tableau 3 – Cellules Grisées) leur permettant de passer rapidement d'une représentation générale à des hauts niveaux d'abstraction à une représentation fine disponible à des bas niveaux d'abstraction. Ce mécanisme est un bon moyen de faire face à la complexité des systèmes (Vicente 1999b).

b) ConTa – Analyse des tâches de contrôle

i. Les objectifs

Deuxième phase de la CWA, l'analyse des tâches de contrôle permet de comprendre ce qui a besoin d'être fait dans un domaine de travail pour assurer son contrôle (Vicente 1999b). ConTA ne se préoccupe pas de savoir comment, par qui ou avec quelles compétences l'activité est réalisée (voir respectivement SA, SOCA, et WCA) mais identifie les activités nécessaires pour atteindre les buts, les priorités, les valeurs et les fonctions d'un domaine de travail compte tenu d'un ensemble de ressources matérielles (Naikar et al. 2006). Tandis que la première phase WDA délimite l'espace-problème, la seconde phase,

ConTa, permet d'apporter des informations supplémentaires concernant les différents modes opératoires, les étapes, les informations, les tâches nécessaires pour la prise de décision (Bisantz & Burns 2009, p169).

De façon plus générale, une tâche de contrôle peut se définir comme un procédé qui transforme des informations spécifiques en entrée, en des actions spécifiques en sorties (Roth & Bisantz 2013, p248). Il s'agit ici du couplage « perception-action » entre un opérateur et son domaine de travail évoqué précédemment. Cette boucle dynamique lui permet d'assurer le contrôle du domaine de travail sur la base d'une structure de buts mettant en séquence des comportements adaptés à la demande. L'étape d'analyse ConTa fait l'hypothèse que l'accomplissement des tâches nécessite des processus cognitifs qui permettent de passer d'un état cognitif à un autre (Lintern 2013). ConTa se focalise alors sur les états cognitifs établis pendant l'exécution de la tâche ainsi que les processus cognitifs utilisés pour effectuer les transitions entre ces états.

ii. Les outils

L'échelle de décision (Rasmussen et al. 1994 ; Vicente 1999b) est l'outil de modélisation généralement utilisé pour l'analyse des tâches de contrôle réalisée sur le domaine (Figure 5). L'échelle de décision tente de décrire les tâches nécessaires pour atteindre les objectifs fonctionnels du domaine de travail mis en évidence via la Hiérarchie d'Abstraction. Cet outil fournit un cadre pour modéliser les mécanismes cognitifs impliqués dans la prise de décision, à savoir les états, ainsi que les processus cognitifs permettant le passage entre ces états. Dans un système physique, un état est une condition décrite en termes de phase, de forme, de structure et les processus physiques agissent sur ces états pour les modifier. Par exemple, la glace est l'état solide de l'eau et le refroidissement est le processus permettant de transformer l'eau en glace. En termes de cognition, les états représentent des états mentaux internes et les processus de traitement de l'information permettent de naviguer entre les états (Lintern 2010). La structure de base de l'échelle propose un modèle pour cartographier les « chemins de décisions observés » et « identifier les différents processus de décision » (Rasmussen et al. 1994). L'objectif étant d'identifier des besoins propres à certaines classes de situations et les contraintes sur ce qui doit être fait (Vicente 1999b, p181).

L'échelle de décision se présente sous la forme de rectangles et de cercles reliés entre eux par des flèches. Les rectangles représentent les activités de traitement de l'information, autrement dit les activités cognitives que les opérateurs doivent mettre en place pour réaliser une tâche, et les cercles représentent les états de connaissances qui résultent de ces activités de traitement. L'activité est modélisée depuis l'activation d'un besoin d'agir (alerte), jusqu'à l'exécution des actions, en passant par l'observation, la classification des informations, et la sélection de la réponse avant exécution (Vicente 1999b ; Rasmussen 1994 ; Roth & Bisantz 2013, p250).

En accord avec Naikar & Saunders (2003), l'échelle de décision se divise en 3 grandes parties ayant des buts spécifiques :

- Partie gauche (montante) : la partie gauche concerne l'observation de l'état actuel du système, la représentation de la tâche de contrôle nécessaire pour connaître l'état du système, l'état de l'environnement. C'est une phase d'analyse de la situation.
- Partie haute : la partie haute représente la tâche nécessaire pour évaluer les buts. L'état actuel et les buts actuels sont évalués pour déterminer un état cible. Cette tâche peut être une tâche de prédiction, de choix, de jugement de valeur.
- Partie droite (descendante) : la partie droite modélise la planification des tâches par l'acteur et l'exécution des actions. Elle comprend différentes étapes dont : définir les tâches, les ressources disponibles, formuler une série d'action ou de procédure à respecter puis l'exécuter.

Le cheminement en cloche proposé par la double échelle de décision (de gauche à droite) représente le flux cognitif d'un raisonnement rationnel chez les opérateurs agissant dans des milieux complexes et dynamiques (Naikar et al. 2006). Néanmoins, les points d'entrées et de sorties sur l'échelle ainsi que les trajectoires peuvent contourner ce cheminement classique. Certains raccourcis sont possibles et permettent de passer rapidement d'un état à un autre et de naviguer entre les différentes parties de l'échelle de décision (Naikar et al. 2006). Les raccourcis de type « shunts » ou déviation, permettent de faire des liens rapides entre une activité de traitement d'information (rectangle) à un état de connaissance. Par exemple, observer les informations présentes dans l'environnement peut permettre d'identifier immédiatement la tâche ou la procédure à exécuter. Les raccourcis de type « leaps » ou sauts, permettent de relier deux états de connaissances entre eux (cercles). Par exemple, lorsqu'un opérateur connaît l'état du système, il peut tout de suite savoir quelle tâche ou procédure il doit effectuer.

La structure de l'échelle de décision soutient les 3 niveaux de performance des comportements humains proposés par Rasmussen (1983), à savoir les comportements basés sur les compétences, sur les règles et les connaissances. Le séquençage linéaire de base caractérise les comportements rationnels basés sur les connaissances. Ces comportements sont principalement adoptés dans les situations complexes pour lesquelles des règles prédéterminées ou les raccourcis ne sont pas disponibles. Dès lors que la situation est familière, les opérateurs expérimentés exploitent les comportements basés sur des règles, leur permettant d'utiliser les raccourcis de type « shunt » ou « leap » et ainsi contourner certaines parties de l'échelle de décision. Ces raccourcis sont également appelés heuristiques et permettent de réduire les étapes internes de traitement de l'information qui sont longues et coûteuses. Pour finir, les comportements basés sur les compétences permettent de relier directement les cases activation et exécution du modèle. Ces comportements sont des comportements hautement automatisés tels que les comportements sensori-moteurs (Naikar 2010).

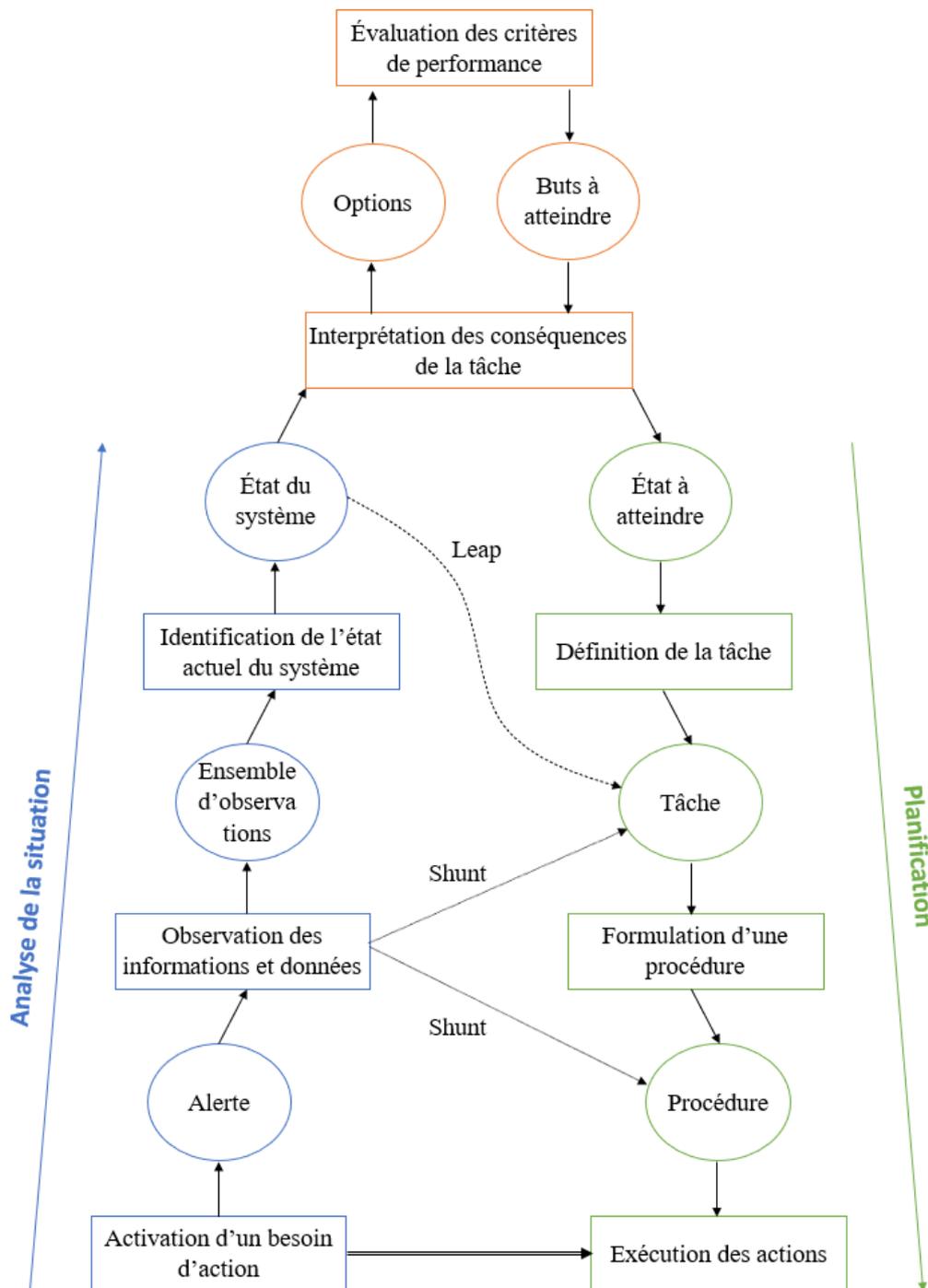


Figure 5 : Structure classique de l'échelle de décision.

Elle se compose de 3 parties distinctes : partie haute (orange) concernant les buts de la tâche, la partie gauche (bleue) concernant la tâche de contrôle nécessaire à la compréhension du système, la partie droite (verte) concernant l'exécution des étapes planifiées pour atteindre l'objectif souhaité.

Les rectangles représentent des états de traitement de l'information, les cercles sont des états de connaissance résultants de ce traitement. Les flèches pleines illustrent le raisonnement rationnel et représentent les comportements basés sur les connaissances (KBB). Les raccourcis de type « shunt » et « leap » sont représentés en pointillés et correspondent aux comportements basés sur les règles (RBB). La double flèche reliant les cases activation et exécution du modèle représente les comportements basés sur les compétences (SBB).

La phase d'analyse basée sur l'échelle de décision permet donc d'identifier quelles sont les exigences en termes d'informations, de connaissances, et en termes d'étapes à suivre dans la réalisation des tâches pour contrôler un système complexe identifié. À titre d'exemple, des études focalisées sur ConTa ont permis d'étudier les mécanismes de prises de décision dans des domaines spécifiques tels que le domaine médical et les situations de triage (Bisantz & Burns 2009, p155), le domaine ferroviaire et la sécurité aux passages à niveau (Mulvihill et al. 2016), le domaine sportif (Salmon et al. 2010, p85), le domaine de la sécurité routière (Cornelissen et al. 2013).

Néanmoins et malgré de nombreuses applications, WDA et ConTa semblent posséder certaines limites importantes à détailler.

3. Limites et solutions alternatives

a) Limites

Bien que la hiérarchie d'abstraction, la dimension de décomposition et l'échelle de décision aient été largement appliquées à des domaines multiples, ces outils d'analyse semblent présenter certaines limites. Après avoir exposé ces limites, nous mettrons en évidence quelques solutions alternatives existantes ayant pour but de les contrer.

i. À propos de l'espace d'abstraction et décomposition

➤ ***La hiérarchie d'abstraction présente des problèmes conceptuels et méthodologiques***

Dans son article, Lind (2003) identifie toute une série de problèmes propres à l'espace d'abstraction et de décomposition. Nous pouvons citer notamment :

- Des problèmes liés à l'acquisition des connaissances nécessaires pour remplir la hiérarchie d'abstraction. En effet, il n'existe pas de procédure destinée à aider l'analyste dans sa recherche d'information. L'obtention de ces informations nécessitent un long travail d'interview, d'analyse de documents pour tenter d'identifier clairement quels sont les buts, objectifs, fonctions d'un système. De plus, ces informations peuvent être inaccessibles et les ingénieurs interviewés peuvent ne pas être en mesure d'expliquer tous les choix de conception qui, parfois, reposent plus sur des pratiques internes que sur des concepts d'ingénierie clairement identifiables.
- Des problèmes liés à la construction et la validation des modèles. Comme le souligne Vicente dans son ouvrage consacré à la CWA (Vicente 1999b, p164), les 5 niveaux de la hiérarchie d'abstraction ont été jugés utiles pour décrire les systèmes de contrôle des procédés tels que les centrales soumises aux lois de la thermodynamique. Bien que ces 5 niveaux aient été appliqués à de nombreux domaines, Vicente souligne qu'il n'y a aucune raison de penser que tous les

domaines de travail doivent être modélisés au regard de ces 5 niveaux d'abstraction. Un problème connexe réside donc dans l'absence de critères explicites permettant de choisir le nombre de niveaux appropriés et leur pertinence au regard d'un domaine. Au-delà du nombre de niveaux pertinents, la terminologie proposée pour décrire ces niveaux semble problématique. En effet, les dénominations moyens-fins et partie-tout à la base de la AH, ainsi que les différents niveaux d'analyse sont des concepts généraux difficilement dissociables. Lind (2003) souligne ainsi que le concept de *fonction* est délicat car il peut avoir différents sens. Il est difficile de dissocier les fonctions physiques, des fonctions abstraites, des fonctions générales. De plus, les dénominations couramment utilisées (i.e. buts fonctionnels, fonctions abstraites, fonctions généralisées, fonctions physiques et formes physiques) ont été modifiées et un nouvel ensemble de labels a été proposé par Rasmussen : « buts fonctionnels », « valeurs et mesures prioritaires », « fonctions liées aux buts », « processus liés aux objets » et « objets physiques » (Reising 2000 ; Naikar et al. 2005). Malgré les modifications de labels, Naikar et al. (2005) conseillent aux analystes de sélectionner eux-mêmes les intitulés de la AH et d'utiliser une terminologie propre au domaine étudié. Hajdukiewicz et al. (1998) utilisent par exemple des labels propres au domaine de travail de l'anesthésie (i.e. buts, équilibres, processus, physiologie, anatomie). Ces multiples possibilités sémantiques ainsi que les confusions qu'elles soulèvent rendent la modélisation dépendante des choix de l'analyste. Dès lors que les intitulés ou le nombre de niveaux diffèrent, la comparaison et la validation des modèles se complexifient.

- Des problèmes liés à la place accordée aux systèmes de contrôle ou systèmes automatiques dans l'analyse du domaine de travail. En effet, dans la définition donnée par Vicente (1999b), la AH représente la structure du système contrôlé indépendamment de l'opérateur, des automatisations, des événements, des tâches ou des interfaces. Avec cette définition, l'auteur semble exclure les systèmes automatiques et les systèmes de contrôle de la AH. Autrement dit, le système automatique est considéré comme un outil capable d'accomplir des tâches de contrôle au sein des contraintes définies par la AH, plutôt que faisant partie intégrante du domaine à contrôler. Cependant, Naikar et al. (2005) suggèrent que « les systèmes de contrôle ne permettent pas seulement de contrôler un domaine de travail mais font aussi l'objet d'un contrôle ». En effet, le système automatique contrôle certains aspects du domaine, mais l'automatisation est elle-même sous le contrôle de l'opérateur. Par conséquent, il peut s'avérer pertinent que les systèmes de contrôle, eux-mêmes contrôlés par des opérateurs humains, soient inclus dans la AH, surtout lorsque la première phase d'analyse WDA se veut modéliser la structure profonde de l'objet de contrôle du domaine (Burns et al. 2005 ; Bisantz & Mazaeva 2009 ; Vicente 1999b, p179).

Cette problématique touche particulièrement le domaine du soin médical et les systèmes biologiques au sein des quels le contrôle est, par nature, imbriqué dans le système et intrinsèque au domaine. Les travaux de Miller & Sanderson (2000) ont soulevé cette problématique dans le

contexte de l'étude des unités de soins intensifs à l'hôpital. Sur la base de travaux précédents appliquant la AH au domaine de soin (Sharp & Helmicki 1998 ; Hajdukiewicz et al. 1998), les auteurs concluent que la AH n'est pas appropriée pour modéliser des processus biologiques ayant des systèmes de contrôle imbriqués. En effet, un patient est un système vivant autonome capable d'assurer le contrôle de ses propres fonctions biologiques et physiologiques. Dans le cadre de l'analyse du travail, le patient est à la fois le domaine de travail et son propre contrôleur. En ne prenant pas en compte les systèmes de contrôle dans l'analyse du domaine, la AH est inadaptée dès lors que « domaine » et « contrôle » sont imbriqués.

➤ ***La AH ne semble pas adaptée aux systèmes intentionnels (vs. Systèmes causaux)***

Un système est dit causal lorsqu'il est gouverné par les lois de la Nature (e.g. la physique, la chimie, la thermodynamique). À titre d'exemple, les centrales électriques ou les barrages hydrauliques sont des systèmes causaux. Au sein de ces systèmes, les liens entre les buts, les fonctions et les objets sont stables et leurs comportements peuvent être prédits sur la base des lois de la Nature. Par exemple, l'eau se transforme en glace dès lors que la température avoisine 0°C et se transforme en vapeur dès lors que la température approche 100°C. Ces transformations ou changements d'états sont prévisibles sur la base des lois de la physique. Une absence de vapeur dans un compartiment censé en contenir, peut, par exemple, mettre en évidence une défaillance du système de réchauffement. Ainsi dans les systèmes causaux, l'identification d'un composant défaillant est possible en utilisant les liens structuraux unissant les différents niveaux de la AH. Ces liens étant couplés physiquement et modélisables mathématiquement sur la base des lois de la nature (Wong et al. 1998). Comme le soulignent Wong et al. (1998), les systèmes causaux sont également statiques dans le sens où leurs composants et leurs ressources ne bougent pas spatialement (leurs emplacements restent statiques). Autrement dit, une turbine à vapeur dans une centrale électrique sera toujours au même endroit et les relations que la turbine entretient avec les composants voisins, tels que le circuit de refroidissement ou le réservoir d'eau, seront toujours les mêmes. Identifier le but général d'un système, identifier les fonctions et les objets qui vont permettre l'atteinte de ce but, comprendre comment les composants de ce système sont reliés entre eux et quelles seront les conséquences d'une défaillance d'un composant X sur un composant Y, sont des étapes indispensables pour comprendre la complexité d'un système causal. Une fois que la structure profonde d'un tel système est identifiée, la AH permet de la rendre visible aux opérateurs pour faciliter le contrôle.

Cependant lorsqu'il s'agit d'un système intentionnel, les apports de la AH sont limités. En effet, les systèmes intentionnels sont caractérisés par des pratiques sociales, organisationnelles et des conventions plutôt que par des lois physiques (Roth & Bisantz 2013, p241). Comme évoqué précédemment, les systèmes intentionnels sont des systèmes au sein desquels l'organisation interne change couramment de sorte à répondre aux exigences situationnelles, aux buts et aux exigences de performance. Contrôler ces

systèmes revient à gérer les nombreux degrés de liberté et à s'adapter constamment aux évolutions situationnelles. Bien qu'il existe des lois sociales, il est difficile de prédire le fonctionnement de ce type de système (Rasmussen 1985). Adaptation et auto-organisation sont donc indispensables pour faire face à la complexité de ces systèmes. Dans ce cadre, l'utilisation de la AH soulève quelques questions.

Dans un système causal, la résolution d'un problème repose couramment sur l'identification du composant défaillant et son remplacement. Dans le cas d'une panne de voiture, un diagnostic permet d'identifier la pièce défectueuse avant la planification des actions nécessaires à son remplacement. Dans un système intentionnel, la problématique est différente. Il ne s'agit pas d'identifier ce qui ne fonctionne pas dans le système, il s'agit de savoir quelles sont les ressources humaines et matérielles disponibles et comment les organiser afin de répondre à la situation problématique (Wong et al. 1998). Dans ce cadre, l'identification de la structure profonde du système sur la base d'une décomposition fonctionnelle n'aide pas l'opérateur à identifier les ressources humaines et/ou matérielles, leurs localisations et comment les coordonner. Alors que la AH a fait ses preuves dans l'analyse et la conception de systèmes causaux dont le couplage repose sur des lois physiques prédictibles, cette approche ne semble pas parfaitement adaptée aux systèmes intentionnels définis par l'activité humaine (Wong et al. 1998).

➤ ***La hiérarchie d'abstraction représente le domaine comme un système stable, permanent et ne prend pas en compte la dynamique intrinsèque du domaine de travail.***

La hiérarchie de décomposition propose de décomposer le domaine de travail en composants et sous-composants constituant le domaine. C'est un moyen de décomposer un système complexe en plus petits morceaux plus facilement analysables. Cependant, la AH n'identifie pas le couplage dynamique entre le système et ses sous-systèmes (Lind 2003).

Quant à la hiérarchie d'abstraction, elle décompose le domaine en différents niveaux d'abstractions. Même si le niveau « fonctions généralisées » a pour but de décrire les processus dynamiques, la description faite dans le cadre de la AH ne constitue pas une réelle description de la dynamique présente dans le domaine. Par exemple, les fonctions généralisées (processus) présentées dans le tableau 2, concernant la hiérarchie d'abstraction d'un radiateur électrique, listent plusieurs fonctions dont « comparaison entre température attendue et température actuelle », et « arrêt du chauffage une fois la température atteinte ». Ces items décrivent des processus dynamiques mais n'expliquent pas, à proprement parlé, la dynamique sous-jacente au fonctionnement de ces processus. La AH permet uniquement de fournir une liste finie de fonctions, de processus dynamiques mais la modélisation finale du domaine de travail reste stable et statique.

Parce que la AH se veut être une méthode indépendante des événements, le modèle du domaine de travail produit par cette méthode n'évolue pas dans le temps. Cependant, sur la base des concepts défendus par la thermodynamique, il est possible de considérer le monde comme un système fermé soumis au principe irréversible de l'entropie. Le second principe de la thermodynamique stipule qu'un

système fermé tend systématiquement à se désorganiser, c'est-à-dire à accroître son degré d'entropie. En effet, dans la mesure où on laisse un système aller au hasard, il y a de grandes chances que ce système évoluera vers le désordre même si certaines forces se battent localement contre cette tendance naturelle grâce à l'auto-organisation (Prigogine 1996). Dans le cadre de l'analyse AH, on peut considérer que le domaine de travail qu'elle décrit est également soumis à des forces entropiques. Par exemple, un patient hospitalisé non surveillé verra son état de santé se détériorer. De la même manière, un avion non contrôlé aura tendance à s'écraser ou encore une maison non entretenue aura tendance à prendre la poussière. Contrôler un domaine de travail serait donc lié à la capacité des opérateurs à vaincre ces forces entropiques qui tendent à faire évoluer le domaine vers le désordre. Bubb (2006) montre ainsi que l'activité humaine peut être perçue comme un processus de mise en ordre qui va à l'encontre de la tendance naturelle de l'entropie. La compréhension de l'activité humaine devrait nécessiter la prise en compte des forces naturelles entropiques et les actions de contrôle qu'elles nécessitent.

En plus de cette dégradation naturelle des propriétés intrinsèques de l'environnement, l'activité humaine générée pour contrer cette entropie produit elle aussi du désordre qu'il faudra réguler. Par exemple, après avoir injecté des drogues, les anesthésistes doivent surveiller la réaction du patient. Après avoir utilisé du matériel, un nettoyage ou un rangement est nécessaire. Il faut donc distinguer la dynamique intrinsèque de l'environnement ou du domaine (i.e. le patient qui se dégrade) de la dynamique des opérateurs qui interagissent avec ce domaine (i.e. modification du domaine par l'activité).

La complexité du domaine est donc évolutive dans le temps. Comprendre la structure profonde du domaine nécessite de comprendre le couplage dynamique entre le processus physique de dégradation et le système de contrôle nécessaire pour le contrôler (Lind 2003). Il semble important que l'analyse du domaine de travail mette en évidence la dynamique qui gouverne le système si l'analyste souhaite comprendre la complexité de ce système.

➤ ***La hiérarchie d'abstraction ne permet pas d'identifier le risque et l'incertitude***

Rasmussen (1985) met en évidence qu'une représentation des liens moyens-fins via la AH est une condition préalable nécessaire pour modéliser et prédire les erreurs. Cependant, lorsqu'un domaine de travail est décrit comme un ensemble d'objets stables et permanents, accessibles par des chemins « moyens – fins » bien définis, les notions d'incertitude et de risque associés sont difficiles à décrire. Cet aspect est particulièrement problématique puisque l'analyse du domaine de travail vise à l'origine à fournir des informations permettant aux opérateurs de faire face à des situations de travail dégradées, imprévues dans lesquelles l'incertitude et le risque sont particulièrement élevés.

Il semble ainsi que la AH présente des problèmes méthodologiques et conceptuels fondamentaux qui soulèvent des questionnements. Les confusions méthodologiques qui en découlent poussent les analystes à s'adapter en modifiant eux-mêmes les caractéristiques des outils. Les mécanismes de

validation et de transposition des modèles sont alors difficiles. De plus, de par la nature des liens causaux qui composent la AH, cette dernière n'est pas adaptée pour analyser le risque et l'incertitude des situations. Il semble également que AH ne soit pas appropriée pour analyser les systèmes intentionnels, dynamiques, soumis à une dégradation naturelle (i.e. entropie) pour lesquels le contrôle ne repose pas sur des lois naturelles prédictibles mais sur la mise en place de comportements d'adaptation et d'auto-organisation (i.e. le domaine des soins critiques).

ii. À propos de l'échelle de décision

➤ ***L'échelle de décision présente des problèmes conceptuels et méthodologiques***

En accord avec les travaux de Read et al. (2015), l'étape d'analyse ConTa et l'échelle de décision sont, juste après la WDA et la hiérarchie d'Abstraction, les processus les plus utilisés dans la CWA. Malgré de nombreuses applications dans différents domaines (Mulvihill et al. 2016, ; McIlroy & Stanton 2011 ; Naikar et al. 2006 ; Burns et al. 2008 ; Elix & Naikar 2008 ; Cornelissen et al. 2013), Naikar et al. (2006) soulignent que l'étape d'analyse ConTa est limitée du fait d'un manque de directives méthodologiques et de cohérence théorique. De plus, et comme l'expliquent ces mêmes auteurs, Vicente définit l'analyse de l'activité comme des modes opératoires et des tâches de contrôle tandis que Rasmussen l'exprime en termes de domaine de travail et de prise de décision. Ces approches quelque peu différentes de l'activité génèrent des ambiguïtés théoriques et méthodologiques qui poussent certains auteurs à proposer des extensions conceptuelles et de nouvelles directives méthodologiques pour ConTa que nous aborderons ultérieurement (Naikar et al. 2006).

➤ ***L'échelle de décision est une méthode basée sur les contraintes cognitives***

Bainbridge (1997) distingue deux catégories d'approches concernant l'analyse de la tâche : les approches séquentielles et les approches contextuelles. Dans l'approche séquentielle, la tâche est perçue comme une séquence d'étapes de traitement que l'opérateur doit respecter. De nombreuses limites concernant les modèles séquentiels de la tâche ont été mises en évidence, notamment le manque de flexibilité pour retracer les degrés de liberté dont dispose l'opérateur ou encore le manque de sensibilité face aux contraintes contextuelles. Face à ces critiques, des modèles contextuels de la tâche ont été proposés (*Critical Decision Method* (Klein & Armstrong 2004 ; Suchman 1987) - *Cognitive Work Analysis* (Vicente 1999b)). Dans l'approche contextuelle, la tâche est perçue comme un choix fait parmi plusieurs processus en fonction du contexte. L'opérateur active alors des ressources cognitives pour faire face aux contraintes de l'environnement de travail, sans séquence spécifique prédéfinie.

L'échelle de décision est un cadre d'analyse dont la structure de base repose sur des étapes de traitement séquentielles. Malgré cela, l'échelle de décision permet d'intégrer les comportements flexibles, autrement dit ceux qui s'éloignent de la structure rigide du raisonnement rationnel, en modélisant les

raccourcis/heuristiques et en permettant d'initier et/ou terminer un processus à n'importe quel endroit de l'échelle et dans n'importe quel sens. Ainsi, le flux d'activité modélisé via l'échelle de décision n'a pas besoin de suivre une séquence linéaire, peut tenir compte de divers points de départ et de fin, et peut se produire de droite à gauche (Naikar et al. 2006). Néanmoins, même si ces particularités permettent de modéliser les comportements flexibles, la structure de l'échelle de décision ne repose que sur des spécifications issues des contraintes cognitives (Morineau et al. 2009). En effet, l'échelle de décision a été développée initialement pour étudier les mécanismes de diagnostic en maintenance électronique. Le modèle se base alors sur les processus cognitifs relatifs à une tâche non dynamique, indépendante du contexte. En ce sens, l'échelle de décision ne s'inscrit pas vraiment dans une approche contextuelle (Bainbridge 1997).

➤ ***WDA et ConTa sont deux étapes complémentaires dont la mise en relation reste difficile***

Au sein des systèmes sociotechniques complexes, le domaine de travail n'est pas la seule source de contrainte. Il existe également des contraintes liées à la tâche de contrôle. Les deux premières étapes de la CWA, à savoir l'analyse du domaine de travail (WDA) et l'analyse de la tâche de contrôle (ConTa) constituent deux étapes complémentaires pensées pour faire le lien entre contraintes écologiques et contraintes cognitives. En effet, la première décrit les contraintes imposées par le système étant contrôlé, alors que la seconde décrit les contraintes imposées par les activités de traitement de l'information associées au contrôle (Vicente 1999b, p193). Les outils respectifs de ces deux étapes, à savoir la hiérarchie d'abstraction et l'échelle de décision, sont donc censés entretenir une relation forte, inspirée de la relation dynamique entre perception et action à l'origine du concept d'affordance (Gibson 1979). La figure 6 illustre un comparatif entre la relation entretenue entre AH et DL et le couplage dynamique entre perception et action.

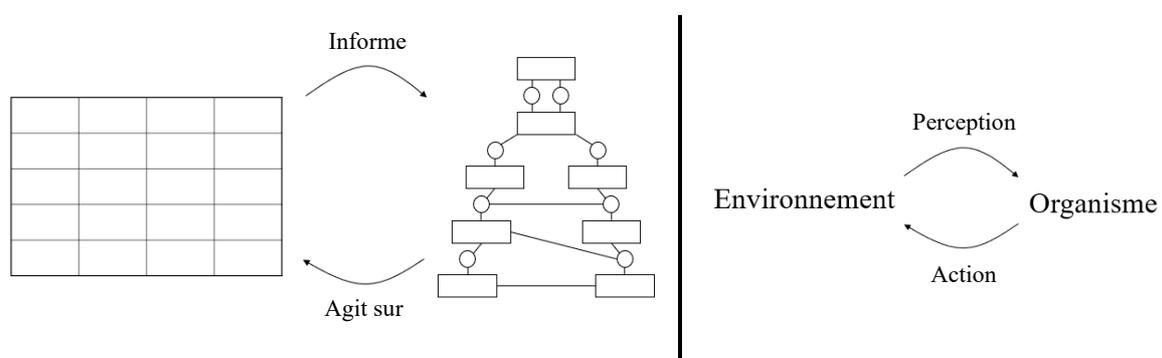


Figure 6 : Relation entre AH - DL et le couplage dynamique perception - action.

Illustrations des relations entretenues entre la hiérarchie d'abstraction et l'échelle de décision (à gauche), comparées à la boucle dynamique perception-action (à droite) proposée par Gibson (1979). Inspirées de la psychologie écologique et de la notion d'affordance, les outils méthodologiques de la CWA se veulent entretenir une relation forte permettant de faire le lien entre contraintes écologiques propres au domaine et contraintes cognitives propres à l'opérateur.

Néanmoins, en pratique, la hiérarchie d'abstraction et l'échelle de décision sont deux outils de modélisation ayant des buts différents et dont la mise en relation est délicate. En effet, le concept d'affordance qui permet de faire le lien entre contraintes écologiques et contraintes cognitives (Gibson 1979) n'est pas directement capturé par l'échelle de décision de Rasmussen. Les affordances existent indépendamment dans l'environnement mais leur caractère perceptible dépend de l'état mental dans lequel se trouve l'opérateur (Wells 2002 ; Morineau et al. 2009). Modéliser séparément les affordances et les états mentaux des opérateurs ne permet pas de prendre en compte la boucle dynamique entre perception et actions, autrement dit la dynamique entre les informations provenant de l'environnement et l'état mental actuel de l'opérateur.

➤ ***L'échelle de décision permet d'identifier les informations nécessaires à l'atteinte d'un but précis mais ne modélise pas les conflits potentiels pouvant exister pour des buts multiples et simultanés***

La phase d'analyse de la tâche permet de modéliser une échelle de décision pour chaque fonction généralisée ou chaque processus préalablement identifié dans la hiérarchie d'abstraction. Néanmoins, lorsque les fonctions généralisées ou processus sont très nombreux, la multiplication des échelles de décision peut être coûteuse en temps et les analystes ont tendance à sélectionner, parmi l'ensemble des fonctions identifiées, celles qui feront l'objet d'une analyse plus approfondie. Par exemple, dans leur étude consacrée aux sorties extravéhiculaires réalisées lors des vols spatiaux, Miller et al. (2017) identifient 13 fonctions généralisées et développent une échelle de décision pour seules 2 de ces fonctions. Dans la même logique, dans leur étude consacrée aux comportements des usagers de la route aux intersections, Cornelissen et al. (2013) identifient 7 fonctions généralisées et développent 1 échelle de décision. L'échelle de décision ne permet qu'une analyse compartimentée des activités et mécanismes cognitifs impliqués dans un nombre limité de fonctions généralisées ou processus.

De plus, chaque échelle de décision est dépendante d'un but. Autrement dit, les mécanismes cognitifs impliqués dans la prise de décision sont traités séparément pour chacun des buts. Cependant, et comme c'est le cas pour les systèmes faiblement couplés, le problème évolue de façon dynamique et l'opérateur doit souvent répartir les ressources de traitement entre plusieurs tâches réalisées simultanément (Bainbridge 1997). Il se peut également que l'activation d'une tâche B soit dépendante de la réalisation d'une tâche précédente A. Les buts se superposent alors et dépendent d'une dimension temporelle qui va contraindre l'opérateur dans son activité. Les processus de décisions relatifs à un but peuvent se superposer, s'effectuer en parallèles d'autres processus ayant des buts différents, peuvent être dépendants du temps et des relations de dépendances qu'entretiennent les buts entre eux. Les caractéristiques de DL ne permettent pas de modéliser ces contraintes dynamiques et temporelles qui jouent un rôle important dans l'organisation et la planification des comportements.

➤ ***L'échelle de décision ne permet pas de modéliser les comportements d'anticipation et de prédiction***

La structure de base de l'échelle de décision débute dès lors qu'un besoin d'agir est activé (Figure 5). Autrement dit, l'analyse des processus cognitifs sur la base de DL est possible une fois que le problème a été perçu et que des comportements orientés vers la régulation de ce problème sont déclenchés.

Cependant, et comme l'explique Bainbridge (1997), dans certaines situations les prédictions ou l'anticipation visant à éviter que les problèmes surviennent sont bien plus efficaces que la régulation du problème une fois le besoin d'action activé. En effet, dans les systèmes complexes et particulièrement dans les systèmes faiblement couplés, le domaine de travail évolue de façon continue en parallèle de la réflexion des opérateurs et les conséquences de leurs actions peuvent avoir des effets retardés. Les comportements de prédiction et d'anticipation sont alors indispensables pour prédire les futurs états du système et proposer des actions appropriées au contexte. L'échelle de décision ne prend pas en compte ces mécanismes réalisés en amont de l'activation d'un besoin d'action.

➤ ***L'échelle de décision se focalise sur un individu***

Initialement réalisés en laboratoire, les travaux sur l'étude de la cognition humaine visent à mettre en place des situations expérimentales permettant d'analyser l'impact de certaines variables sur le comportement des individus au sein d'un environnement fortement contrôlé. En sciences cognitives, par exemple, les travaux sur la mémoire (Miller 1956), sur l'attention (Broadbent 1958) ou encore la vigilance (Macworth 1950) ont permis d'exprimer des modèles du comportement humain et d'approfondir les connaissances relatives aux fonctionnements des mécanismes cognitifs en environnement contrôlé. Malgré l'importance de ces études, une critique persiste : l'expérimentation en laboratoire ne représente pas la « vraie vie » et la transposition des résultats du laboratoire à la vie réelle est limitée.

Plus tard, d'autres travaux permettent de voir la cognition comme un processus situé et distribué dont l'analyse nécessite des situations de travail réelles. Les travaux de Hutchins (1995) ont montré notamment que les principes des sciences cognitives pouvaient s'appliquer aux systèmes et que l'activité cognitive n'était pas limitée à un individu et se partageait entre les systèmes et les agents. En effet les situations à un opérateur ne sont pas représentatives des situations de la vie courante. Les individus, rarement seuls, appartiennent à un écosystème, un environnement, une équipe de travail qui peuvent influencer les comportements. Beaucoup de travaux sur la cognition partagée et située se développent alors. Nous pouvons citer les travaux sur la cognition distribuée (Hutchins 2001 ; Grundgeiger et al. 2010, 2014), la conscience de la situation (Endsley 1995, 2000), ou encore les modèles mentaux partagés (Gorman et al. 2005 ; Cannon-Bowers et al. 1993). Avec l'échelle de décision, Rasmussen tente d'analyser des situations de travail réelles telles que la résolution de problème en maintenance électronique. Néanmoins, la modélisation se focalise sur l'étude d'un seul opérateur. Les processus

cognitifs de prise de décision au sein d'une équipe de travail ne peuvent être clairement capturés via l'échelle de décision.

Ainsi, et de la même façon que pour la hiérarchie d'abstraction, l'échelle de décision présente des problèmes conceptuels et méthodologiques qui, de par les ambiguïtés que ces problèmes génèrent, poussent certains auteurs à repenser les fondements et outils de la CWA. Telle qu'elle est proposée à l'origine, l'échelle de décision est un outil d'analyse qui ne prend pas en compte les particularités du contexte dans lequel se déroule l'activité et ne repose que sur des spécifications issues des contraintes cognitives. De plus cet outil ne modélise pas les comportements d'anticipation et prédiction pourtant indispensables au contrôle des systèmes sociotechniques dynamiques et complexes. L'échelle de décision est une modélisation à l'échelle d'un opérateur, or les situations réelles mettent en interaction plusieurs individus dans un environnement changeant.

Pour résumer, la méthode CWA possède des caractéristiques méthodologiques qui font de son cadre conceptuel, un cadre qui semble pertinent pour l'étude des systèmes faiblement couplés. Il est vrai que dans sa description, la CWA permet de mettre en évidence l'importance des contraintes et des degrés de liberté pour assurer le contrôle du système, et d'envisager l'activité comme un champ de possibilités au sein duquel les opérateurs naviguent pour répondre aux exigences situationnelles. Ainsi, la nature dynamique des contraintes, les degrés de liberté nombreux, l'ensemble des trajectoires possibles à l'atteinte des objectifs, qui sont des caractéristiques fortes des systèmes faiblement couplés, pourraient être capturés par la CWA. Néanmoins, une étude plus approfondie révèle que la CWA possèdent des limites conceptuelles et méthodologiques remettant en question sa validité face à l'analyse de ce type de système. En effet, ses outils méthodologiques (i.e. AH et DL) fournissent une représentation du système de travail relativement stable, statique, essentiellement basée sur des liens causaux bien définis réduisant leurs pertinences pour capturer les aspects dynamiques et incertains dans l'évolution du système. La question de la coordination des ressources humaines et matérielles disponibles, celle de la gestion des conflits potentiels existants dans la poursuite des buts ne sont pas prises en compte dans l'analyse. Or, contrôler un système faiblement couplé nécessite d'adapter les comportements en temps réel pour faire face aux situations imprévues et maintenir un équilibre entre les objectifs à atteindre et les ressources humaines et matérielles disponibles. C'est le cas, par exemple, lors d'une urgence médicale où la détresse physiologique du patient est soudaine, rapide, et imprévue. Les soignants doivent alors s'organiser et exploiter les ressources disponibles pour mettre en place des soins adaptés. Ainsi, il est possible de remettre en question la pertinence de la CWA face à l'analyse des systèmes faiblement couplés. Avant de présenter la méthode hCWA comme une extension de la CWA adaptée à l'analyse des systèmes faiblement couplés, nous évoquerons rapidement quelques-uns des efforts méthodologiques fournis pour contrer les limites évoquées.

b) Solutions alternatives

Pour faire face à ces critiques, certains auteurs tentent de proposer des solutions alternatives. Ces solutions se présentent sous la forme de versions améliorées des outils existants ou de nouveaux modèles. Parmi les solutions apportées pour contrer les limites de la AH, nous pouvons citer la méthode MFM (Lind 1994), la structure du diagnostic récursif (Miller & Sanderson 2000) ou encore la technique de multiplication des hiérarchies pour étendre l'analyse aux ressources et aux notions de risques (Burns et al. 2008). Malgré les efforts de ces propositions, l'efficacité de la hiérarchie d'abstraction pour l'étude des systèmes faiblement couplés au sein des quels risque, incertitude, autoadaptation sont des caractéristiques fortes, reste limitée. Ces nouvelles propositions ne permettent toujours pas de mettre en évidence le couplage dynamique entre un domaine de travail et l'organisation nécessaire pour contrôler ce domaine. De plus, la dynamique intrinsèque du domaine ainsi que l'entropie générée par l'activité des opérateurs ne sont pas modélisées. Cependant, dynamique, incertitude, risque et couplage entre différentes parties d'un système constituent les quatre dimensions de la complexité selon Woods (1998). L'utilisation de la AH pour analyser et comprendre les systèmes intentionnels faiblement couplés ne semble pas permettre de saisir toute la complexité de ce type de système.

Il en est de même concernant l'échelle de décision pour laquelle la méthode des échelles en chaînes (Rasmussen 1994), le cadre d'activité contextuel (Naikar et al. 2006), ou encore la méthode des roues décisionnelles (« Decision Wheel » - Ashoori & Burns 2011) ont été proposées pour pallier aux limites de cet outil. Ces méthodes alternatives mettent en évidence un besoin fort de prendre en compte, dans le cadre de l'analyse CWA, la dimension partagée et collaborative du travail. En effet, ces travaux montrent qu'une contrainte supplémentaire est pertinente, celle de l'organisation du travail en équipe (Ashoori et al. 2014). La composition, la taille, la dispersion géographique de l'équipe vont effectivement contraindre les opérateurs et spécifier les possibilités en termes de contrôle. Cependant, ces modèles alternatifs se basent sur les fonctions préalablement identifiées dans la hiérarchie d'abstraction. Les échelles de décision ou le cadre d'activité contextuel reposent sur une liste finie de buts, de fonctions, de processus et fournissent une représentation stable et statique du domaine de travail. De plus, et dans le cas où les fonctions sont nombreuses, les combinaisons possibles peuvent avoir un nombre très élevé et la modélisation peut devenir impossible.

Tous ces aspects poussent certains auteurs à repenser l'étape d'analyse du domaine dans le but de l'adapter à la complexité des systèmes faiblement couplés ainsi que leur caractéristique dynamique et à développer de nouveaux outils méthodologiques adaptés. C'est notamment ce que proposent Morineau & Flach (2019) au travers la méthode hCWA que nous présenterons maintenant.

III. L'heuristic Cognitive Work Analysis (hCWA)

Une version étendue de la CWA

1. Présentation générale et fondements

La hCWA, proposée récemment par Morineau & Flach (2019), est une méthode alternative développée pour augmenter la compatibilité de la CWA avec l'analyse des systèmes faiblement couplés, faiblement traçables et caractérisés par une forte auto-organisation au sein desquels les capacités adaptatives des opérateurs sont indispensables pour faire face aux exigences situationnelles et aux nombreux degrés de liberté. La question étant de comprendre comment, au sein d'un système faiblement couplé, les opérateurs utilisent ces nombreux degrés de libertés pour produire des comportements adaptés aux exigences situationnelles compte tenu des objectifs et des ressources disponibles. Il est important de noter que la méthode hCWA ne s'oppose pas à CWA mais se positionne comme une méthode complémentaire. L'objectif est toujours d'obtenir des connaissances sur l'écologie du travail comme source d'innovations en matière de design (amélioration des technologies de l'information, des procédures ou de la formation) mais ces deux méthodes offrent des perspectives différentes.

La CWA propose une méthode d'analyse des contraintes basée sur une procédure dite « Top – Down » ou descendante. Les méthodes descendantes sont basées sur les connaissances et les représentations. Elles débutent par l'identification des composants d'un système, de ce qui est connu et maîtrisé pour ensuite identifier des contextes d'études plus fins. Dans le cadre de l'analyse cognitive du travail, le processus débute par une représentation abstraite d'un domaine (niveau macro) pour progressivement identifier des contextes d'activités plus concrets (niveau micro). L'objectif étant d'imaginer comment le travail peut être effectué compte tenu des contraintes et des buts fonctionnels et ainsi guider la conception de systèmes de travail performants et sécurisés (Rasmussen 1986). Cependant, Morineau & Flach (2019) montrent que cette approche descendante fonctionne bien lorsqu'il est possible de décrire un domaine de travail sous forme d'un ensemble finis et stable de buts fonctionnels et de contraintes, autrement dit lorsque les analystes possèdent des connaissances de bases très précises sur le fonctionnement d'un système ou d'un domaine. C'est le cas par exemple pour l'aviation ou l'énergie nucléaire pour lesquels les objectifs et les contraintes (physique, thermodynamique...) ont tendance à être stables et pour lesquels le travail est prédictible et structuré. Dans d'autres domaines tels que la médecine d'urgence, les buts ne sont pas clairement explicites et sont situés. Ils dépendent des interactions qui émergent entre les individus et les ressources en temps réel. Ainsi, les objectifs, les buts, la question de l'équilibre entre l'atteinte des buts et la gestion des ressources dépendent des exigences

situationnelles. Comprendre et analyser de tels domaines, nécessite de comprendre la dynamique du système, les processus d'auto-organisation et d'adaptation mis en place, d'identifier de nouvelles affordances ou possibilités d'actions qui permettraient aux opérateurs de s'adapter et faire face à la dynamique du système et ainsi, limiter les situations à risques. Une approche basée sur les interactions, dite « Bottom – Up » ou ascendante, semble alors plus appropriée. En partant de l'observation des activités des opérateurs en situation d'interaction, l'objectif est d'inférer comment les contraintes écologiques, sociales et organisationnelles façonnent les comportements adaptatifs des opérateurs en situation réelle. Autrement dit, à partir de l'observation d'un contexte d'activité donné, l'objectif est de comprendre comment les contraintes vont délimiter un espace de travail au sein duquel les opérateurs vont naviguer via la mise en place de comportements, de stratégies spécifiques, la gestion de conflit ou encore l'instauration d'une organisation particulière entre les opérateurs.

En tant que version étendue de la CWA, la hCWA trouve également ses fondements dans la notion de système, la psychologie écologique, et le contrôle adaptatif. Les bases conceptuelles précédemment présentées pour CWA restent donc pertinentes pour hCWA. Néanmoins, certains éléments sont revisités et de nouvelles connaissances y sont associées, élargissant ainsi les bases théoriques de la hCWA. Nous présenterons ici les nouvelles notions théoriques.

a) Des notions nouvelles relevant de la psychologie écologique

Nous retenons de ce concept que les contraintes écologiques du domaine délimitent un espace des possibles et façonnent les actions et la cognition des opérateurs. Dans le cadre de la hCWA, les contraintes sont également considérées comme dynamique et à l'origine d'un champ de force. À l'image des champs magnétiques en physique qui possèdent des charges positives ou négatives capables de modifier la trajectoire d'une particule, un champ de force en psychologie est capable d'influencer les comportements des individus et donc leurs trajectoires. Un champ psychologique est tout aussi imperceptible qu'un champ de force physique, il doit être inféré par la distribution et les actions des objets présents en son sein (Flach et al. 2008 ; Gorman et al. 2010 ; Guastello 2017 ; Vicente 1999b). L'espace de déplacement sûr, plus connu sous sa dénomination anglaise « The Field of Safe Travel », est une théorie proposée par Gibson & Crooks (1938) illustrant cette notion de champ de force dans le cadre de la conduite automobile. Fondamentalement, le problème d'un conducteur est de se rendre à destination sans heurter les obstacles pouvant se trouver sur son chemin. En se mettant en mouvement, le véhicule déplace avec lui un espace de déplacement sûr, autrement dit une zone spatiale non fixe à l'espace physique qui dessine un espace au sein duquel le véhicule peut bouger sans prendre le risque d'heurter un obstacle. Le challenge pour le conducteur est de juger la taille de cette espace, son déplacement, ses limites, et adapter sa conduite en conséquence. Une fois dans cette zone, les objets sont dotés de forces répulsives ou attractives qui vont influencer les décisions et les comportements du conducteur. Par exemple, les lumières rouges du feu tricolore vont forcer l'arrêt tandis que les lumières

vertes vont inciter à poursuivre le déplacement ou encore la présence d'obstacles ou la réduction de la taille du champ d'action vont provoquer des arrêts ou des ralentissements. Ainsi, comprendre les comportements observés n'est possible que si l'on est en mesure d'identifier les affordances présentes dans cet espace de déplacement sûr et leurs capacités attractives ou répulsives qui vont influencer les comportements. Maintenant, si l'objectif de conduite change et que le conducteur doit se rendre du point A au point B le plus vite possible, alors la taille de la zone de sécurité change (i.e. elle se réduit dû fait de l'augmentation de la prise de risque) et les valeurs attractives ou répulsives des objets se modifient. Sur la base de l'exemple précédent, un feu tricolore rouge ne forcera plus l'arrêt du conducteur si celui-ci prend des risques pour atteindre son objectif. Ainsi, Gibson montre que la taille de la zone de déplacement sûr ainsi que les valeurs attractives ou répulsives des objets constituant cet espace dépendent des objectifs à atteindre. Pour le conducteur, les objectifs vont aussi déterminer la façon dont il percevra la valeur attractive ou répulsive des objets constituant cet espace. En sécurité des systèmes, un modèle capable de rendre compte de cette dynamique et de considérer l'espace de travail comme une enveloppe de sécurité au sein de laquelle les opérateurs peuvent agir librement est le modèle dynamique de sûreté proposé par Jens Rasmussen (1997).

b) Une approche basée sur le système avec le modèle dynamique de sûreté (DSM)

Le modèle dynamique de sûreté ou DSM (« *Dynamic Safety Model* ») est un modèle proposé par Rasmussen (1997) qui vise à rendre compte des mécanismes conduisant aux situations à risque au sein des systèmes sociotechniques complexes. Ce modèle trouve ses fondements dans les travaux de Gibson, notamment dans le concept d'affordance (Gibson 1979) et l'espace de déplacement sûr évoqué précédemment (Gibson & Crooks 1938). Également appelé « modèle de migration », DSM ne cherche pas à identifier puis supprimer la cause de l'erreur, mais bien à représenter les mécanismes dynamiques qui génèrent les comportements qui conduisent aux erreurs. Pour y parvenir, DSM se focalise essentiellement sur l'identification des contraintes que les opérateurs doivent satisfaire pour maintenir les exigences de performance et de sécurité.

Dans une première version publiée en 1990, Rasmussen souligne que les comportements humains peuvent être régis par 3 types de contraintes : l'état de la situation actuelle acceptable, le profil des ressources individuelles, les moyens de travail disponibles. D'autres versions plus tardives identifient des contraintes différentes relevant de l'échec économique, de la charge de travail inacceptable et de la performance fonctionnelle acceptable (Rasmussen 1997 ; Cook & Rasmussen 2005). À chaque fois, une contrainte est donnée par les exigences de contrôle imposées par le système, une seconde est donnée par les moyens disponibles offerts par l'environnement, et une troisième correspond aux ressources humaines qui dépendent des caractéristiques individuelles telles que la compétence, la capacité mentale... (Rasmussen 1990). Autrement dit, chacune des contraintes proposées relève respectivement du domaine de travail, de l'environnement organisationnel, et des opérateurs.

L'espace formé par ces contraintes, illustré en figure 7, est alors considéré comme une enveloppe d'opérations sûres dont les limites vont contraindre les comportements des opérateurs. Au sein de cet espace, le point opératif ou le point de fonctionnement du système, représentant les opérateurs, peut se mouvoir librement et les comportements sont perçus comme des trajectoires. Autrement dit, le modèle DSM considère les comportements humains comme des trajectoires au sein d'un espace de travail abstrait entouré par un ensemble de contraintes qui délimitent les degrés de liberté disponibles pour l'agent.

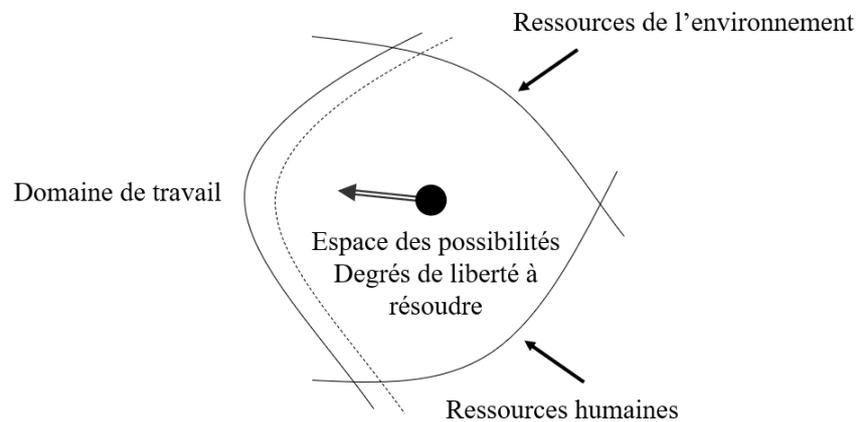


Figure 7 : Espace des possibilités défini par DSM.

Cet espace est délimité par trois contraintes devant être respectées pour maintenir les exigences de sécurité d'un système. Une contrainte est donnée par le domaine de travail, une seconde dépend des ressources de l'environnement et une troisième représente les limites des ressources humaines. À l'intérieur de cet espace l'opérateur peut bouger librement et les comportements sont considérés comme des trajectoires. Dépasser les limites représente une erreur ou une violation. Les trajectoires sont dépendantes des pressions exercées par les contraintes (flèches pleines) et des préférences subjectives des opérateurs. Ces pressions peuvent induire une migration du point opératif (flèche double) vers les marges de risques du modèle (ligne pointillée).

Certaines règles propres à ce modèle stipulent que la distance séparant le point opératif des limites est un indicateur de risque (Cook & Rasmussen 2005). En effet, plus le point opératif est loin de la limite, plus la probabilité de la franchir est faible. À l'inverse, plus le point opératif se rapproche la limite, plus la probabilité de la dépasser augmente. Ce déplacement progressif vers la limite conduit à des situations problématiques qui, lorsque la limite est franchie, laissent le système hors de contrôle. Pour finir, la trajectoire du point opératif n'est pas uniquement dépendante des comportements des opérateurs et de leurs préférences subjectives. En effet, le modèle DSM souligne également qu'en fonction des valeurs attractives ou répulsives des contraintes, ces dernières peuvent produire des pressions combinées sur le point opératif, influençant sa position et pouvant progressivement le faire migrer vers les limites de

sécurité. Le réajustement continu des objectifs en fonction de la situation, l'évolution dynamique des événements, font que la position de l'opérateur dans cet espace est en constante évolution.

Les travaux impliquant le modèle DSM sont nombreux. Par exemple, DSM est utilisé pour comprendre les mécanismes qui conduisent à des événements tragiques au sein des systèmes complexes (Cassano-Piche et al. 2009 ; Vicente & Christoffersen 2006), pour décrire les risques générés par l'utilisation de nouvelles techniques de gestion dans un hôpital (Cook & Rasmussen 2005), pour décrire les effets négatifs et positifs des violations des procédures standard dans le domaine médical (Amalberti et al. 2006) et également pour identifier les stratégies que le personnel des centres d'urgences peut adopter pour faire face à une forte affluence de patient (Miller & Xiao 2007). Cependant, même si la métaphore reste puissante pour toutes ces applications, DSM n'est utilisé que comme un modèle interprétatif qui permet de comprendre et expliquer les phénomènes observés et non comme un réel outil de modélisation.

De nouveaux objectifs sont alors envisagés pour aller plus loin avec DSM, notamment le besoin de connaître précisément la dynamique et la localisation du point de fonctionnement ainsi que la localisation de la limite (Cook & Rasmussen 2005). À ce sujet, 4 aspects essentiels pour y parvenir ont été identifiés, à savoir (1) décrire l'emplacement du point, (2) connaître sa distance par rapport à la limite marginale, (3) connaître la dynamique de l'environnement et les mouvements possibles du point et (4) connaître l'emplacement de la limite de performance acceptable par rapport à la limite marginale (Cook & Rasmussen 2005). À ce jour, il n'existe que peu ou pas de travaux visant à atteindre ces objectifs. Seules quelques études ont tenté de modéliser les mouvements du point de fonctionnement par rapport aux contraintes (Morineau et al. 2017 ; Kanagarajah et al. 2010). Cependant, ces deux tentatives posent des problèmes. Tout d'abord, la modélisation proposée par Kanagarajah et ses collègues semble s'apparenter à une méthode normative, où la localisation des points de fonctionnement est modélisée par rapport à une seule contrainte statique. En outre, les contraintes sont analysées séparément et ne prennent donc pas en compte l'aspect dynamique du système et les pressions des autres contraintes. Tout l'intérêt du modèle, résidant dans sa capacité à mettre en évidence la dynamique entre les pressions internes des agents (préférences, compétences, objectifs...) et les pressions externes (provenant d'éléments extérieurs et influençant le comportement) est alors perdu. Ensuite, en codant différentes classes de comportements et en calculant les fréquences relatives en pourcentage des actions effectuées sur chaque contrainte, Morineau et al. (2017) fournissent un moyen de quantifier et de localiser la position des acteurs par rapport aux contraintes (Morineau et al. 2017). Cependant, la localisation reste globale et doit encore être améliorée. Des efforts restent à fournir pour localiser et suivre le point opérant dans son enveloppe à un moment précis. Comprendre les trajectoires au sein de cet espace des possibilités, nous amène à aborder la question de la résolution du problème des degrés de liberté (Bernstein 1967).

c) Le problème du contrôle des degrés de liberté (Bernstein 1967)

Le problème généralisé des degrés de liberté est abordé à l'origine par Bernstein (1935-1967) dans le but de fournir une explication au contrôle des comportements moteurs. Il pose le problème de la façon suivante : « comment le système neuromusculaire peut, compte tenu du nombre exorbitant de degrés de liberté disponible, agir comme s'il n'y avait qu'un seul degré de liberté ? ». En effet, une infinité de combinaison peuvent produire le même mouvement, et un même résultat peut être issu d'une multitude de combinaison différente en termes d'activations musculaires. Pour autant, le corps humain est capable de produire de façon naturelle des comportements adaptés aux contingences locales. Pour répondre à ce problème, Gibson stipule qu'un système complexe avec beaucoup de degrés de liberté peut agir comme un système simple si et seulement si un nombre suffisant de contraintes ou de liens sont établis entre les composants du système de sorte à les coupler en synergie (Shaw & Turvey 1999). Kelso définit les synergies comme des regroupements fonctionnels d'éléments structurels qui sont, à un moment donné, contraints d'agir comme une seule unité cohérente. Ainsi, identifier les sources de contraintes est une stratégie adaptée pour résoudre des problèmes complexes aux nombreux degrés de libertés. Dans la logique d'une méthode ascendante, ces contraintes doivent être écologique, situationnelle, capable de modéliser l'espace des interactions et provenir de l'observation de contextes d'activités réels et à risques.

d) La simulation comme outil méthodologique

Issue des expériences de l'industrie aéronautique, les méthodes de simulation sont aujourd'hui des outils incontestables pour assurer la sécurité des patients dans le domaine médical (Gaba 2004 ; Gaba et al. 2015 ; Kohn et al. 2000 ; Angel & Angel 2016). En effet, dès 1980, l'industrie aérienne a fait face à plusieurs accidents qui ne pouvaient s'expliquer par des erreurs techniques. Lors d'une conférence de la NASA dédiée à la gestion des ressources dans le cockpit, certains auteurs ont montré que des échecs de communication interpersonnelle, de prise de décision et de leadership constituaient les principales causes d'erreurs dans ces accidents aériens (Cooper et al. 1980 ; Helmreich et al. 1999). Face à cette prise de conscience de l'importance des facteurs humains dans la survenue des accidents, les CRM ou « *Crew Resource Management* » se sont développées pour tenter de réduire les erreurs. En plus de compétences techniques propres au contrôle de l'avion, l'approche CRM stipule que les équipages doivent acquérir des compétences non-techniques indispensables pour la gestion des ressources individuelles et collectives en situation de crise dans le but d'optimiser le travail d'équipe (Gaba et al. 2015, p25). La simulation apparaît alors comme un outil permettant de développer et renforcer ces compétences dites non-techniques lors de scénario mettant en scène des situations et des environnements reconstitués sur la base du réel.

Cette volonté d'éduquer les opérateurs aux facteurs humains pour limiter les erreurs humaines se propage rapidement au domaine de l'urgence médicale (Hicks et al. 2008). Les travaux de Gaba en anesthésie sont les premiers à adapter et appliquer les connaissances issues de l'aéronautique à la

médecine, notamment via le développement des ACRM « *Anesthesia Crisis Resource Management* » (Gaba et al. 1994, 1995, 2001 ; Gaba 2000). La simulation se définit comme « l'utilisation d'une technique de simulation (mannequin, réalité virtuelle ou patient standardisé) destinée à reproduire des situations et des environnements de soin qui vont permettre d'enseigner des procédures diagnostiques et thérapeutiques, de répéter des processus, des concepts médicaux ou des prises de décision par un professionnel de santé ou une équipe de professionnels » (Simulation en Santé Rapport HAS). La formation, l'entraînement, la performance, l'évaluation des compétences, la recherche sont ses principaux champs d'actions (Gaba 2004 ; Nishisaki et al. 2007).

Plusieurs avantages à la simulation sont identifiables (Gaba 2000) : (i) s'entraîner à faire face à des scénarios critiques, rares dans la pratique réelle, pour lesquels une réponse rapide et coordonnée est indispensable, (ii) explorer et faire des erreurs sans aucun risque pour le patient, (iii) recréer des environnements cliniques fidèles⁹ permettant de tester les interactions humains-machines mais également les interactions humains-humains, (iv) maîtriser les causes sous-jacentes du scénario et contrôler les étapes de dégradation du patient, (v) enregistrer de façon intensive les sessions de simulation pour confronter les soignants à leurs propres actions, décisions, et pour une analyse approfondie des enregistrements à posteriori. L'objectif premier étant d'entraîner les soignants à développer des compétences non-techniques comme la communication, le leadership, la résolution de problème et prise de décision, l'utilisation des ressources, conscience de la situation, la gestion du stress, et de la fatigue (Flin & Maran 2015 ; Hicks et al. 2008). Dans un cadre de recherche, la simulation constitue une source précieuse pour explorer la question des erreurs médicales et donc de la sécurité en santé (Naik & Brien 2013). En effet, comme le soulignent les auteurs, les chercheurs peuvent alors multiplier les situations indésirables et étudier leurs effets sur les performances des soignants tout en contrôlant certains paramètres comme la difficulté du cas clinique, le temps de prise en charge, la composition des équipes... Cela représente une grande amélioration par rapport à l'étude post hoc des événements indésirables associés au traitement de patients réels. Les spécificités de la simulation permettent également de tester de nouveaux outils de prises en charge, de nouvelles procédures, et explorer comment de telles modifications peuvent affecter la performance des soignants.

Utilisée dans le cadre de la hCWA, la simulation est un moyen technique permettant l'observation de contextes d'activités multiples où des opérateurs sont en situation d'interaction quasi-réelle. Les processus adaptatifs qui émergent de l'interaction des 3 composants constituant le système (organisation-domaine-environnement) peuvent alors être observés, filmés et à posteriori analysés.

⁹ La fidélité de l'environnement fait référence à la relation entre l'environnement d'apprentissage généré par simulation et l'environnement de la pratique clinique réelle. Plus l'environnement simulé intègre les éléments présents dans la situation réelle, plus il est fidèle (Naik & Brien 2013).

2. Méthodologie

La méthode hCWA se divise en 5 grandes étapes (Figure 8). Alors que les étapes 1, 2 et 3 constituent les entrées du modèle, les étapes 4 et 5 représentent les sorties. Plus précisément, les 3 premières étapes consistent respectivement en (1) l'analyse du domaine de travail via l'identification des contraintes délimitant l'espace de liberté, (2) l'analyse de la tâche de contrôle via l'identification d'un contexte d'activité et (3) le codage des activités observées dans un contexte de simulation. En sortie, l'étape (4) permet de capturer les modalités de contrôle engagées, les stratégies utilisées, l'organisation du travail mise en place et les compétences déployées pour faire face aux contraintes identifiées. Sur la base de ces observations, l'objectif de l'étape (5) est d'être en mesure de proposer des recommandations, des hypothèses de réorganisation des espaces, de développer des innovations technologiques, ou encore repenser les formations de sorte à les adapter aux besoins de l'activité réelle. Le but étant d'aboutir à des améliorations qui soutiennent les comportements adaptatifs nécessaires au maintien des exigences de sécurité et performance du système. Ce cycle se réitère ensuite pour tester ces innovations en situation de simulation, comprendre l'impact de l'implémentation de ces innovations sur les modalités de contrôle, les stratégies, l'organisation du travail, les compétences et ainsi acquérir des connaissances plus approfondies sur la façon dont les opérateurs contrôlent le domaine. Cette boucle itérative permet de générer de nouveaux besoins en termes de conception jusqu'à l'aboutissement d'une proposition technique ou organisationnelle testée et approuvée.

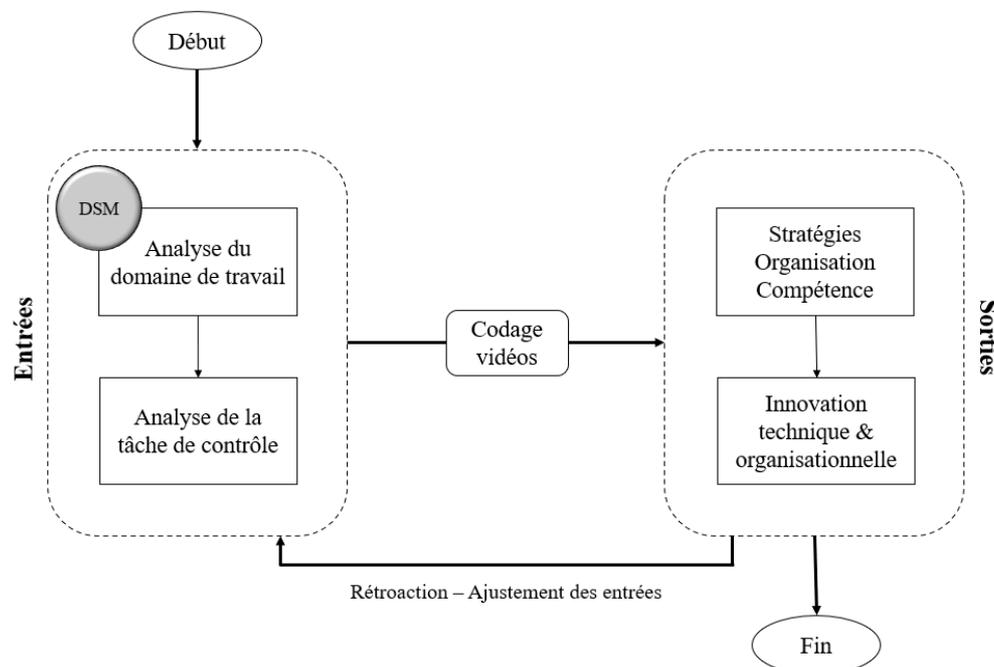


Figure 8 : Présentation des étapes méthodologiques propres à la hCWA.

Une spécificité méthodologique propre à hCWA consiste à remplacer la hiérarchie d'abstraction, couramment utilisée pour l'analyse du domaine de travail, par le modèle de sécurité dynamique de

Rasmussen (1997) précédemment présenté (Figure 9). En décrivant le domaine de travail comme un espace au sein duquel les opérateurs peuvent naviguer mentalement pour prendre des décisions ou résoudre des problèmes, la hiérarchie d'abstraction est particulièrement adaptée à l'approche descendante développée par la CWA. En effet, elle identifie, dès la première phase d'analyse, les connaissances, les propriétés statiques et les règles explicites qui façonnent les activités de résolution de problèmes des experts du domaine (Rasmussen & Vicente 1989). Dans le cadre de la hCWA, l'analyse du domaine se base sur la logique des champs de forces caractéristique du modèle DSM. Ce modèle permet alors de décrire des possibilités d'action situées (Rasmussen 1997 ; Morineau et al. 2017) et ainsi offrir une méthode ascendante focalisée sur l'analyse des comportements qui émergent des interactions dynamiques entre opérateurs, ressources et environnement en temps réel.

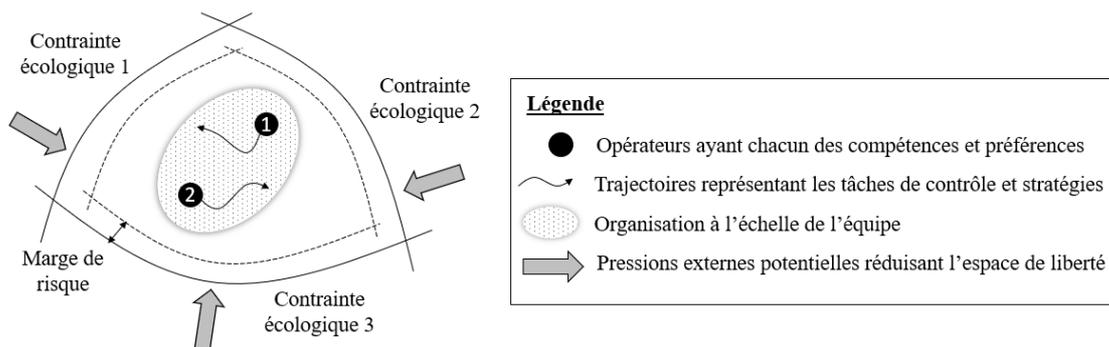


Figure 9 : Représentation de l'espace de travail décrit par hCWA.

Pour finir, nous donnerons quelques définitions afin d'identifier les grands principes gouvernants la méthode hCWA (Morineau & Flach 2019).

Domaine, organisation et espace de travail

- L'espace de travail (« *workspace* ») représente l'interaction entre le domaine de travail (« *work domain* ») et l'organisation.
- L'espace de travail contient un champ de force dynamique. Maintenir la stabilité nécessite des comportements adaptatifs et des ajustements continus en termes de contrôle au regard du domaine et de l'organisation.
- L'espace de travail est délimité par des contraintes. Ces contraintes sont les contraintes de bases à contrôler pour assurer la stabilité du domaine et de l'organisation.
- À l'intérieur de cet espace, un point opératif représente un état de l'activité des opérateurs. Leurs comportements sont représentés sous forme de trajectoires.
- L'espace de travail constitue l'espace des possibilités d'action, autrement dit l'ensemble des degrés de libertés (DDL) disponibles pour assurer le contrôle du système.

- En fonction des forces exercées par les contraintes, le champ des possibles peut s'agrandir ou rétrécir (i.e. le nombre de DDL peut augmenter ou diminuer), laissant plus ou moins de liberté aux opérateurs pour s'adapter.
- Certains événements ou certaines forces provenant des contraintes peuvent générer des trajectoires qui violent parfois les contraintes de sécurité. Les agents migrent alors progressivement vers la marge de risque d'une frontière donnée.
- Selon les valeurs attractives ou répulsives des contraintes, certaines affordances perceptibles vont attirer les opérateurs vers la contrainte ou au contraire les repousser de la contrainte. Les valeurs attractives ou répulsives des contraintes évoluent en fonction des événements.
- Tout événement au sein du système peut modifier les forces qui façonnent les trajectoires.

Tâche de contrôle

- La tâche de contrôle est l'activité, le comportement mis en place pour contrôler le domaine.
- Les trajectoires sont les comportements mis en place par les opérateurs pour contrôler une situation.
- Les comportements nécessaires pour assurer la stabilité du système conduisent à des trajectoires spécifiques au sein de l'espace de travail qui dépendent du champ de force issu des contraintes, des contingences locales, des menaces, des objectifs et préférences des opérateurs.
- Les comportements adaptatifs nécessitent de la coordination à l'aide de différentes boucles de contrôle (régulation, exploration, anticipation).
- Le contrôle adaptatif peut conduire au dépassement des limites de sécurité.

Stratégies

- Les opérateurs mettent en place des stratégies pour pouvoir s'adapter en équilibrant les priorités et les valeurs, en gérant les capacités et préférences de chacun et en répartissant la charge de travail personnelle et/ou collective.
- Le partage des tâches, l'ajustement continu des priorités sont des stratégies visant à réduire la charge de travail individuelle et collective.

Organisation du travail

- Pour faire face à des situations imprévues et dynamiques, pour faire face aux pressions variables provenant des contraintes, pour gérer les conflits potentiels entre des objectifs ou pressions contradictoires, l'auto-organisation est indispensable.
- La répartition des tâches permet de distribuer la charge de travail entre les opérateurs compte tenu de leur capacités, limites, préférences... Cette distribution des tâches, l'utilisation adéquate des ressources en fonction de l'évolution dynamique des objectifs nécessitent de la coordination entre les humains, les machines et les caractéristiques de l'environnement.

- L'organisation spatio-temporelle de l'environnement de travail a un impact sur la façon dont les opérateurs s'organisent, sur la charge de travail, et sur les possibilités d'adaptation.

Compétences

- La coordination requiert une bonne communication pour pouvoir anticiper les actions et les besoins informationnels des agents qui coopèrent pour maintenir la stabilité du champ de force issu des contraintes.
- Des compétences spécifiques et changeantes peuvent être requises pour assurer le contrôle des tâches et le déploiement de certaines stratégies.
- Les compétences peuvent être classées en fonction des 3 niveaux de performance des comportements humains proposés par Rasmussen (1983), à savoir les compétences sensori-motrices, les règles et les connaissances.
- Les conflits peuvent être résolus grâce à des transitions entre des niveaux de contrôle cognitifs.

3. Première application au domaine médical

Dans leurs travaux, Morineau & Flach (2019) proposent une première application de hCWA à l'analyse d'une situation médicale d'urgence. Dans le cadre de ce travail de thèse, seule la première étape d'identification des contraintes sur la base du modèle DSM sera détaillée. Pour une présentation complète de chacune des étapes méthodologiques, je vous renvoie à l'article « *The heuristic version of Cognitive Work Analysis : A first application to medical emergency situations* » publié par Morineau & Flach (2019).

Ainsi, la première étape d'analyse de hCWA consiste en l'identification des contraintes écologiques qui délimitent l'espace de travail. Ces contraintes forment un espace fonctionnel au sein duquel les soignants réalisent les tâches de contrôle nécessaires au maintien de la stabilité du système. Comme évoqué lors de la présentation de DSM précédemment, les comportements humains sont gouvernés par des contraintes qui relèvent respectivement du domaine de travail, de l'environnement organisationnel, et des opérateurs. Appliqué à l'urgence médicale, et sur la base de précédents travaux (Morineau et al. 2017), les auteurs sélectionnent 3 contraintes propres à l'urgence médicale : le soin au patient (i.e. la contrainte donnée par le domaine de travail) ; la gestion des tâches (i.e. la contrainte propre à l'environnement) et le traitement de l'information (i.e. la contrainte propre aux opérateurs) (Figure 10). L'hypothèse est alors de dire que ces 3 contraintes doivent être respectées, contrôlées par les opérateurs pour maintenir les exigences de performance et sécurité propres à la prise en charge d'une situation d'urgence. Caractérisons chacune de ces contraintes :

- La contrainte de soin au patient (SP) ou la contrainte propre au domaine

Apporter des soins adaptés et maintenir le patient dans un état stable constitue le but ultime lors de la prise en charge d'une situation d'urgence (Miller 2004). En effet, les comportements mis en place par

l'équipe médicale sont organisés au regard de cette contrainte. L'intubation, la réalisation d'un massage cardiaque, l'injection de drogue sont tant de soins qui s'expriment au regard de cette contrainte SP. Sur la base des principes de DSM, cette contrainte peut posséder des valeurs attractives ou répulsives qui évoluent en fonction des objectifs et des exigences situationnelles. D'un point de vue dynamique, deux mécanismes sont possibles : le rapprochement/éloignement de la contrainte SP par rapport au point opératif ou le rapprochement/éloignement du point opératif au regard de la contrainte SP. Par exemple, lorsque le patient demande de l'aide ou que son état se détériore brutalement, la contrainte représente un attracteur fort et le point opératif se rapproche de la contrainte. Si les soins prodigués ne sont pas adaptés et que l'état du patient continue de se détériorer malgré les actions menées par les opérateurs, la contrainte se rapproche du point opératif. Ce mouvement vers l'intérieur de la contrainte réduit l'espace des possibilités (réduit les degrés de libertés) et limite les soignants dans le choix des actions possibles pour faire face à la situation. À chaque mouvement « point opératif vers contrainte » ou « contrainte vers point opératif », la probabilité que la limite SP soit franchie augmente. Le risque que l'équipe médicale perde le contrôle augmente.

- La contrainte de gestion des tâches (GT) ou la contrainte propre à l'environnement

La gestion des tâches est une contrainte inévitable dans la gestion de l'urgence. En effet, la manipulation d'objets, la préparation de médicaments, l'allocation des tâches entre les soignants sont des moyens intermédiaires indispensables à la mise en place du soin. Chaque soin nécessite par nature la manipulation d'objet et la réalisation d'actions concrètes. Concernant la dynamique de cette contrainte, un équipement non fonctionnel ou des difficultés dans la manipulation des objets peuvent provoquer la migration du point opératif vers la contrainte. Un environnement de travail encombré déplace la contrainte vers le point opératif, réduisant ainsi les possibilités d'actions.

- La contrainte de traitement de l'information (TI) ou la contrainte propre aux opérateurs

De la même façon que GT est un moyen d'atteindre les objectifs de soin, le contrôle de la contrainte TI est indispensable pour prodiguer des soins de qualité. Cette contrainte représente toute activité de traitement et partage d'information entre individus et systèmes. À titre d'exemple, toute activité de surveillance des constantes physiologiques, toute communication entre soignant sur les aspects du soin et leurs réalisations, ou encore toute utilisation d'aides visant à limiter la charge cognitive de certaines tâches sont caractéristiques de la contrainte TI. Concernant la dynamique de cette contrainte, un environnement de travail trop bruyant entraînant une impossibilité de communiquer ou des pertes d'informations génère le rapprochement de la contrainte vers le point opératif. Un soignant focalisé sur une tâche cognitive complexe, coûteuse en temps, provoque la migration du point opératif vers la contrainte avec le risque toujours de franchir cette limite et de perdre le contrôle de la situation.

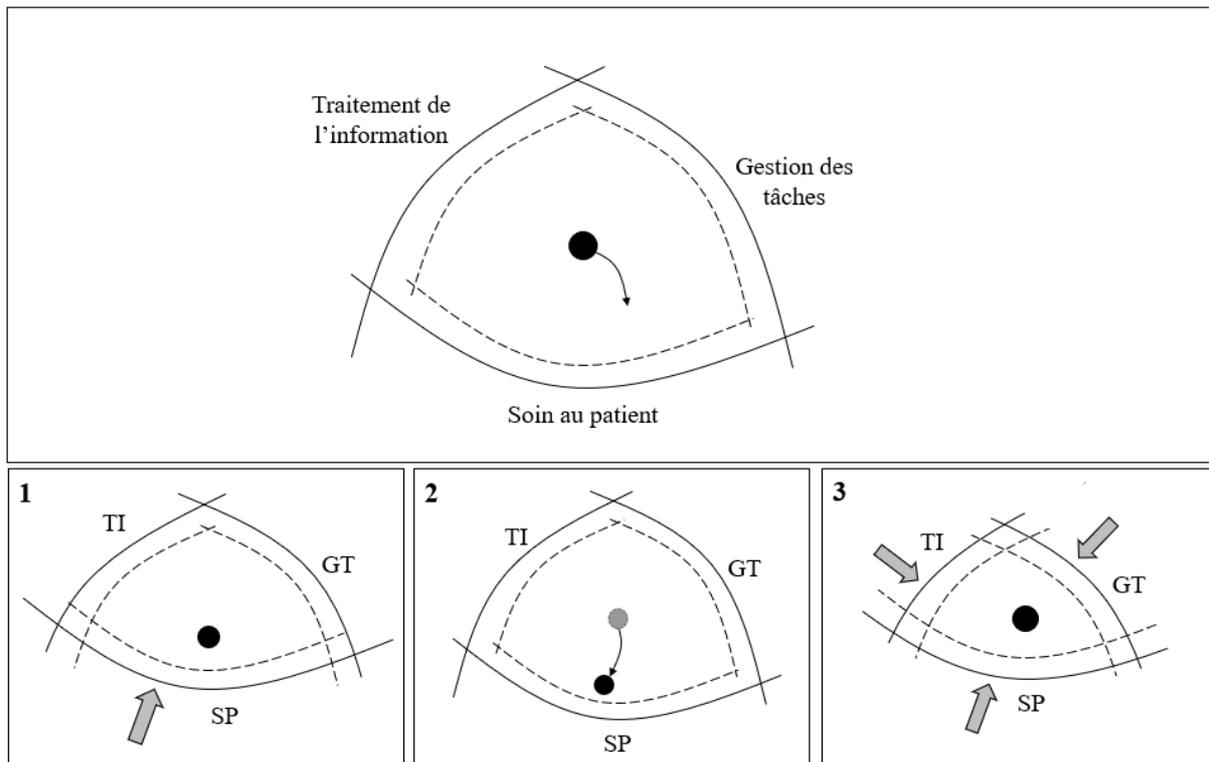


Figure 10 : Représentation de l'espace de travail propre à la prise en charge de l'urgence médicale.

Cet espace est délimité par les contraintes SP (Soin au patient) ; TI (Traitement de l'information) et GT (Gestion des tâches). Le point opératif représente les soignants et leurs comportements sont des trajectoires au sein de cet espace. L'espace constitue l'ensemble des degrés de liberté disponibles. En fonction de la dynamique sous-jacente aux contraintes, plusieurs mécanismes sont possibles. La situation 1 représente le cas où une contrainte se rapproche du point opératif. La situation 2 représente le cas où le point opératif se rapproche d'une contrainte. En situation 3, et par l'effet de pressions combinées, un mouvement des 3 contraintes peut drastiquement réduire l'espace de liberté. La probabilité que le point opératif franchisse les limites augmente, la probabilité qu'une situation problématique survienne augmente.

Dans une logique systémique, la contrainte SP représente la contrainte propre au domaine de travail, les contraintes TI et GT représentent l'organisation de travail (opérateur et machine) nécessaire au contrôle du domaine. La hCWA permet ainsi de modéliser cette double complexité (organisation – domaine) et les processus adaptatifs qui émanent de l'interaction de ces deux systèmes.

Cette première application montre que hCWA permet de modéliser certains aspects dynamiques du travail indispensables pour comprendre les comportements adaptatifs des opérateurs impliqués dans la prise en charge d'une urgence médicale. Sur la base de DSM et de l'observation de contexte d'activité en simulation, hCWA permet de mettre en évidence des problèmes de conception nécessitant une réflexion approfondie et l'apport de solution techniques ou organisationnelles. Cependant, comme

toutes méthodes, hCWA possède certaines limites. Les premières sont principalement liées au fait que cette nouvelle méthode est encore aux balbutiements de son développement et que des applications multiples sont nécessaires pour confronter la méthode à des situations de travail variées. Les auteurs soulignent également que des efforts de formalisation restent à fournir notamment dans l'idée d'aboutir à une modélisation capable de rendre compte de la dynamique des contraintes et comment elle influence la trajectoire des opérateurs dans le but de détecter, réguler les trajectoires à risques.

Section 2

Problématique

La revue de littérature effectuée dans le cadre de cette thèse souligne l'importance de prendre en considération le champ de force de l'espace de travail (i.e. domaine et organisation) pour analyser et comprendre les comportements adaptatifs mis en place par les opérateurs pour contrôler les pressions émanant des contraintes et ainsi faire face aux situations complexes et dynamiques des systèmes faiblement couplés. Cependant, une telle analyse nécessite des outils méthodologiques appropriés.

Face aux manques méthodologiques existants, Morineau & Flach (2019) proposent la hCWA comme une méthode d'analyse destinée à fournir des éléments conceptuels et méthodologiques capables de capturer les spécificités des systèmes caractérisés de faiblement couplés et non traçables. Sur la base de concepts tels que l'espace de déplacement sûr (Gibson), le problème des degrés de liberté (Bernstein) ou encore le modèle dynamique de sûreté (Rasmussen), la méthode hCWA envisage l'espace de travail comme un champ des possibles au sein duquel les opérateurs naviguent pour exploiter les degrés de libertés disponibles et produire des comportements destinés à vaincre les pressions émanant des contraintes délimitant cet espace. Autrement dit, contrôler le système, et donc maintenir les exigences de sécurité et performance, c'est être en mesure d'utiliser les degrés de liberté disponibles pour contrôler les contraintes. Ainsi, comprendre comment les opérateurs gèrent le champ des actions possibles revient à analyser et comprendre les trajectoires des opérateurs au sein de DSM. En observant les opérateurs dans un contexte d'activité simulé, l'idée est de mettre en évidence les comportements adaptatifs en les modélisant sous forme de trajectoires au sein de l'espace de travail défini par DSM. Les connaissances qui en découlent servent ensuite de base pour proposer des solutions de conception adaptée. Cependant, nous avons montré que modéliser les trajectoires des opérateurs au sein de l'espace de travail défini par DSM implique des développements méthodologiques supplémentaires. En effet, peu de travaux se sont à ce jour intéressés à modéliser précisément l'emplacement du point opératif et sa trajectoire au sein de cet espace de liberté.

L'objectif de ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux menés par Morineau & Flach (2019) et tente à la fois de répondre aux limites de hCWA soulevées par les auteurs et de poursuivre le développement de la méthode en fournissant des outils méthodologiques appropriés. En effet, nous avons notamment souligné que : (i) hCWA est encore aux balbutiements de son développement et il est nécessaire de multiplier les applications pour confronter la méthode à des situations de travail variées, (ii) remplacer la hiérarchie d'abstraction par le modèle DSM engendre des besoins méthodologiques nouveaux pour caractériser les comportements observés sous forme de trajectoires.

Le premier axe conception sera destiné à appliquer la hCWA à différentes situations d'urgence médicale et explorer dans quelles mesures ce cadre conceptuel permet le développement d'assistances adaptées. Deux situations médicales critiques seront abordées : le cas de l'urgence pédiatrique et le retard de réveil en anesthésie générale. Après avoir modélisé l'espace de travail propre à chacune de ces situations, et sur la base des connaissances issues de la littérature et/ou de discussions menées auprès d'experts médicaux, nous identifierons des besoins en termes de conception et proposerons des assistances

destinées à y répondre. Deux assistances seront développées : (i) une assistance organisationnelle destinée à faciliter la coordination des équipes médicales lors de la prise en charge d'une urgence en pédiatrie ; (ii) une assistance numérique, sous forme de check-list, conçue pour soutenir les opérateurs devant faire face à un retard de réveil en anesthésie générale. Deux expérimentations seront ensuite menées pour tester et évaluer l'apport de ces assistances lors de la prise en charge de scénario d'urgence en simulation.

Le second axe modélisation tentera de répondre aux nouveaux besoins méthodologiques qu'engendre l'utilisation de DSM. Plus précisément, nous tenterons de répondre à la question suivante : comment modéliser les comportements des opérateurs sous forme de trajectoire au sein de l'espace de travail délimité par DSM ? Autrement dit, comment les opérateurs gèrent les nombreux degrés de liberté disponibles pour faire face aux contraintes ? Des premiers éléments de réponse seront apportés via le développement d'une nouvelle méthode d'analyse, la méthode SSS « State Space Sketch » (le croquis de l'espace des états). Sur la base des principes fondamentaux de la cybernétique (Ashby 1957), la méthode SSS sera appliquée à l'analyse des vidéos issues de sessions de simulation lors de formation professionnelle.

Le dernier axe ouvrira des perspectives permettant d'évoluer vers des modèles mathématiques capables de prédire les trajectoires des opérateurs et détecter, puis réguler les trajectoires à risques dans le but, toujours, d'assister les opérateurs dans la gestion de situations à haut risque telle que l'urgence médicale.

Section 3

Conception

« How we organize physical space says a lot
about how we think people behave,
but how people behave is often a by-product
of how we set up physical space »

Stanley McChrystal - *Team of Teams: New Rules of Engagement for a Complex World* (2015)

« La façon dont nous organisons l'espace physique en dit long
sur la façon dont nous pensons que les gens se comportent,
mais le comportement des gens est souvent un résultat
de la façon dont nous organisons l'espace physique »

Stanley McChrystal - *Team of Teams: New Rules of Engagement for a Complex World* (2015)

I. Objectifs du chapitre

Cette section a pour objectif d'appliquer la hCWA à deux situations d'urgences médicales afin de concevoir des assistances répondant à des problématiques réelles de terrain. Le premier cas applicatif abordera la question de la coordination au sein des équipes médicales lors de la prise en charge d'une urgence pédiatrique et proposera une assistance organisationnelle. Le second cas applicatif s'intéressera à la prise en charge du retard de réveil suite à une anesthésie générale et proposera une assistance numérique sous forme de check-list. Menées en collaboration avec le personnel du Groupe Hospitalier de Bretagne Sud (GHBS, Lorient) et le Centre de Simulation en Santé du Scorff (C3S, Lorient), ces études émanent de besoins de terrains réels mis en évidence par les soignants.

Seule la première étape de la hCWA sera appliquée ici. L'idée étant de tester dans quelles mesures cette étape d'analyse, basée sur l'utilisation du modèle DSM, permet de fournir un cadre de modélisation et de réflexion propice à l'émergence d'innovation en termes de conception. Dans un premier temps, le modèle DSM nous permettra de réaliser une analyse du domaine de travail et des contraintes organisationnelles délimitant l'espace de liberté au sein duquel les soignants peuvent naviguer et mettre en place des comportements adaptatifs qui répondent aux exigences situationnelles. Spécifiquement à chacune de ces situations critiques, la dynamique naturelle des contraintes et les conséquences potentielles sur la trajectoire du point opératif seront inférées. Ces hypothèses seront renforcées par une analyse de la littérature et par les avis experts des soignants impliqués dans le contrôle de ces situations. Pour finir, et comme réponse à cette analyse, nous mettrons en évidence des situations à risques qui nécessitent le développement d'assistances. Des assistances seront ensuite proposées, développées et testées en situation de simulation.

Les étapes méthodologiques

- # Étape 1 : Identifier les contraintes délimitant l'espace de travail.
- # Étape 2 : Inférer la dynamique sous-jacente aux contraintes et les conséquences potentielles sur la trajectoire du point opératif ou la taille du champ des possibles.
- # Étape 3 : Identifier les situations à risques potentielles.
- # Étape 4 : Proposer, imaginer des solutions visant à éviter ces situations risquées.
- # Étape 5 : Définir précisément le problème à résoudre.
- # Étape 6 : Reformuler le problème au regard d'une analyse approfondie de la littérature.
- # Étape 7 : Proposer et concevoir une solution innovante.
- # Étape 8 : Sur la base d'une démarche expérimentale, tester, quantifier l'apport de cette assistance en contexte de simulation.

II. Premier cas applicatif

La prise en charge d'une urgence pédiatrique

1. Étape 1 : Identifier les contraintes de l'espace de travail

Sur la base de travaux précédents et de la première application de la méthode hCWA au domaine de l'urgence médicale (Morineau et al. 2017 ; Morineau & Flach 2019 ; Burtscher et al. 2010) trois contraintes délimitant l'espace de travail ont été identifiées : la contrainte de soin au patient (SP), la contrainte de gestion des tâches (GT), la contrainte de traitement de l'information (TI).

Rappelons que la contrainte SP constitue le cœur de l'activité de soin dont l'objectif est de maintenir l'état du patient à un état acceptable. C'est une contrainte propre au domaine. Les contraintes TI et GT représentent les moyens informationnels, matériels et humains disponibles pour assurer le fonctionnement de l'organisation du travail et l'atteinte des objectifs de la tâche. En effet, prodiguer des soins nécessite des échanges informationnels entre humains et/ou machines (TI) ainsi que la répartition des tâches, la manipulation d'objets et/ou l'organisation des espaces de soin (GT). Ainsi TI et GT sont respectivement des contraintes informationnelle et physique propres aux opérateurs et à l'environnement.

2. Étape 2 et 3 : Identifier les pressions potentielles qui se produisent lors d'une urgence pédiatrique ainsi que les risques associés

En accord avec les principes fondamentaux du modèle DSM évoqués précédemment, ces trois contraintes délimitent un espace de travail fonctionnel (modélisé ici sous la forme d'un triangle) au sein duquel les opérateurs peuvent naviguer librement (Figure 11.1). Selon les valeurs attractives ou répulsives de chacune de ces contraintes, des affordances perceptibles attirent ou repoussent les opérateurs vers ces dernières. Rappelons que les valeurs attractives ou répulsives des contraintes évoluent en fonction de la dynamique des événements et des exigences situationnelles.

Dans une situation d'urgence médicale, nous émettons plusieurs hypothèses concernant ces valeurs, la dynamique sous-jacente des contraintes et les risques potentiels associés :

1. La situation d'urgence donne à la contrainte SP un pouvoir d'attraction fort. En effet, compte tenu de la pression temporelle et de la gravité de la situation, nous supposons que les soignants auront tendance à se focaliser sur le contrôle de SP (i.e. le domaine) et sur les aspects techniques du soin dans le but de contrôler l'état du patient et contrer la dégradation clinique. La puissance attractive issue de SP entrainera une migration du point opératif vers SP avec le risque que ce point opératif

franchisse cette limite (Figure 11.2). La puissance attractive attribuée à la contrainte SP en situation d'urgence peut être soutenue par le phénomène de tunnelisation attentionnelle, plus couramment appelé « effet tunnel ». En effet, l'effet tunnel se définit comme une baisse de l'attention à un moment donné impliquant que l'opérateur se focalise sur un élément de la situation en oubliant son environnement (Wolff et al. 2018). En attribuant son attention à une seule tâche ou à une seule hypothèse, l'opérateur néglige les événements qui l'entourent et ne tient pas compte d'autres alternatives ou de la nécessité de réaliser d'autres tâches (Wickens & Alexander 2009). Ainsi, le mécanisme propre à l'effet tunnel est souvent une cause de défaillance dans la gestion des tâches (Wickens & Alexander 2009). Face au stress, à la pression temporelle, les ressources attentionnelles des soignants sont monopolisées pour tenter de comprendre pourquoi l'état du patient se dégrade, donnant à la contrainte SP un pouvoir d'attraction fort. L'attention portée à l'environnement, à la gestion des tâches et des ressources est limitée, donnant aux contraintes TI et GT un pouvoir d'attraction faible.

2. Dans cette logique, la migration vers SP éloignera le point opératif des contraintes TI et GT. L'attention portée sur le contrôle de ces contraintes sera alors réduite, voire absente. Des problèmes de communication, la perte d'information, l'encombrement de l'espace de travail sont autant de conséquences potentielles résultant du manque de contrôle des contraintes TI et GT (Figure 11.3).
3. Un contrôle inadéquat des contraintes TI et GT entrainera un rapprochement de ces contraintes vers l'intérieur, réduisant ainsi l'espace de travail. Les moyens d'actions disponibles pour faire face à la situation seront alors limités et la probabilité que le point opératif franchisse l'une ou l'autre des 3 contraintes augmentera (Figure 11.4).

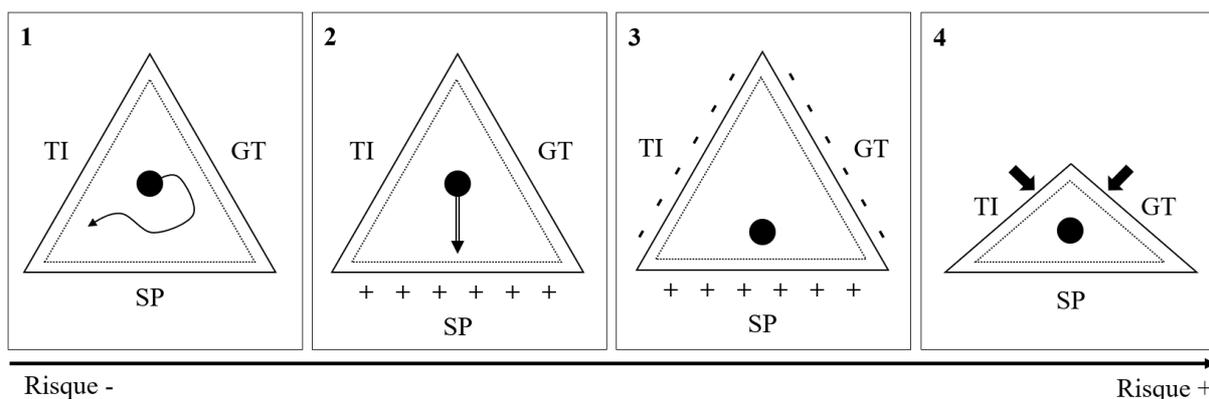


Figure 11 : Espace de travail et dynamique des contraintes de l'urgence pédiatrique.

Cette figure modélise l'espace de travail propre à l'urgence médicale ainsi que la dynamique sous-jacente aux contraintes de soin au patient (SP), de traitement de l'information (TI) et de gestion des tâches (GT). Les soignants explorent l'espace de travail afin d'appliquer des soins (figure 1). Les valeurs attractives de SP (+) et par conséquent, les valeurs moins attractives (-) accordées à TI et GT entraînent une migration du point opératif vers SP (figure 2), un rapprochement des contraintes TI et GT vers l'intérieur (figure 3) et une réduction de l'espace des possibles, augmentant ainsi le risque de franchir les limites de sécurité (figure 4).

3. Étape 4 : Proposer, imaginer des solutions visant à éviter ces situations risquées

Sur la base de cette première modélisation, plusieurs pistes d'améliorations sont alors envisagées pour maintenir les exigences de sécurité - performance, et assurer le contrôle du système :

- Rééquilibrer, limiter la migration du point opératif vers la marge de risque SP.
- Réorienter l'attention vers les contraintes TI et GT pour permettre leur contrôle et assurer la gestion des ressources humaines et informationnelles.
- Limiter la réduction de l'espace de liberté en fournissant aux opérateurs des degrés de liberté supplémentaires, indispensables à leur adaptation.

4. Étape 5 : Définir précisément le problème à résoudre

Nous pouvons donc envisager le contrôle du système de soins d'urgence comme un problème de répartition/coordination du contrôle sur les 3 contraintes SP, TI, GT. En répartissant de manière équilibrée les actions de contrôle au regard de chacune des contraintes, la migration vers SP serait réduite (i.e. le contrôle sera réparti équitablement entre SP, TI, GT), le rapprochement des contraintes TI et GT sera limité (i.e. les actions de contrôle réalisées sur ces contraintes permettraient de les maintenir à distance) et l'espace de travail gardera une taille fonctionnelle suffisante offrant aux opérateurs de nombreux degrés de liberté et la possibilité de mettre en place des comportements adaptatifs.

Cependant, le contrôle simultané des trois contraintes relève de compétences particulières, comparativement au contrôle unilatéral d'une des trois contraintes. Le contrôle dédié spécifiquement à la contrainte SP repose essentiellement sur des gestes techniques tels que l'intubation, le massage cardiaque ou l'injection de drogue. Contrôler la contrainte SP fait donc intervenir des compétences *techniques* relatives à une formation clinique et à une certaine expertise médicale ou paramédicale. Concernant la contrainte de gestion des tâches (GT), et la contrainte de traitement de l'information (TI), le contrôle implique, elles, des compétences *non-techniques* nécessaires à la communication, au partage des informations, à la prise de décision ou encore à la répartition des tâches entre les soignants... Ces compétences non-techniques se définissent généralement comme des compétences cognitives, sociales et personnelles qui complètent les compétences techniques et qui contribuent à l'exécution sûre et efficace des tâches (Fletcher et al. 2002 ; Flin et al. 2010). Le manque de compétences non-techniques est aujourd'hui reconnu comme une cause importante d'événements indésirables dans de nombreux domaines, notamment celui des soins (Kemper et al. 2013 ; Neuhaus et al. 2019). Contrôler simultanément les soins, la gestion des tâches et le traitement de l'information relève d'une compétence de coordination.

Afin de maintenir les exigences de sécurité et de performance du système propre à l'urgence médicale, autrement dit éviter une migration du point opératif vers la zone à risque, la question à laquelle nous tentons de répondre est donc la suivante : comment coordonner les compétences techniques et non-techniques nécessaires pour assurer le contrôle des 3 contraintes SP, TI et GT qui délimitent l'espace de travail ?

5. Étape 6 : Reformuler le problème au regard d'une analyse approfondie de la littérature

Nous savons, de par l'identification des spécificités du système médical, que l'urgence est une situation complexe qui exige la collaboration d'équipes multidisciplinaires autour d'objectifs communs de soin, dans un environnement doté d'équipements spécifiques (Brilli et al. 2007 ; Brady et al. 2015). La complexité émerge de l'interaction entre l'environnement de travail, le domaine, et les opérateurs. Une prise de décision rapide est alors nécessaire pour gérer la détérioration clinique du patient et la coordination des activités est essentielle à sa sécurité (Burtscher et al. 2010). Une telle complexité nécessite une coordination dynamique, autrement dit une coordination qui évolue en fonction des contraintes environnementales et des exigences situationnelles (Gorman et al. 2010 ; Gorman 2014).

La question de la coordination dans le domaine médical est souvent associée à des questions de leadership (Flin 2004). En effet, et lorsque plusieurs opérateurs sont nécessaires pour gérer la complexité du travail, l'émergence d'un leader est une stratégie couramment utilisée pour assurer ce qui relèverait d'une coordination au sein de l'équipe (Flach et al. 2013 ; Künzle et al. 2010 ; Neuhaus et al. 2019 ; Zaccaro et al. 2001). Même si les définitions associées au concept de leadership sont multiples dans la littérature, il est admis qu'un leader doit être en mesure de gérer le travail d'équipe, d'attribuer les rôles au sein des équipes, d'assurer le partage des connaissances, le suivi des activités et de définir les performances attendues (Carne et al. 2012). Ces compétences cognitives, sociales et personnelles reflètent le socle de compétences non-techniques, par opposition aux compétences techniques qui interviennent directement dans les actes de soins prodigués aux patients (Gaba et al. 2015). Mais l'expert médical qui assume le rôle de leader doit gérer simultanément ces compétences non-techniques relatives au leadership et des compétences techniques propres au rôle clinique (médecin anesthésiste, pédiatre, urgentiste,) qu'il tient au sein de l'équipe (Bleetman et al. 2012 ; Hopkins et al. 2015). Cependant, cette double responsabilité peut créer une confusion des rôles entraînant des déficiences en termes de travail d'équipe et de communication et ayant des conséquences négatives sur les performances et la sécurité des patients (Manser et al. 2009 ; Rosen et al. 2008 ; Salas et al. 2007). Le leader doit-il être à la fois un chef d'orchestre dirigeant l'équipe et un clinicien spécialisé dans certains soins techniques, avec les risques liés à la surcharge cognitive, aux interruptions, aux conflits et au partage des tâches que cela sous-entend (Chisholm et al. 2000 ; Wickens 2008 ; Salvucci 2013) ? Le leader des activités techniques

doit-il aussi être responsable des activités non-techniques ? Les études médicales fournissent peu d'indications sur la façon dont le soignant peut équilibrer ce double rôle. Afin d'éclairer ces questions, nous allons aborder le problème à travers le point de vue des systèmes dynamiques.

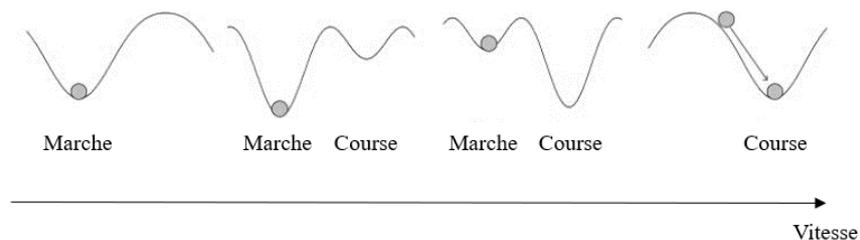


Figure 12 : Paysage d'attracteurs pour la phase de transition marche-course compte tenu de la vitesse de déplacement croissante du corps humain.

Plus la vitesse de déplacement augmente, plus le pouvoir attracteur de l'état « course » est fort. Cette variation de vitesse modifie le paysage et force la balle à passer de la marche à la course. La trajectoire de la balle représente l'évolution du schéma de coordination du corps.

- Issu de Delignières 2004 -

Les travaux cherchant à modéliser le comportement des systèmes dynamiques montrent qu'un système tend toujours, en raison des contraintes qui pèsent sur lui, à adopter un comportement préférentiel ou naturel, également appelé attracteur (Kelso 2013 ; Kelso et al. 1981). Le principe des attracteurs s'illustre généralement par le comportement d'une balle lancée dans un paysage d'attracteurs. Chaque paysage est composé d'attracteurs, représentés par des bassins, et de répulseurs, représentés par des collines. Alors que les attracteurs reflètent des comportements stables, les répulseurs font référence à des comportements instables. Une fois que la balle est en mouvement, elle aura tendance à rejoindre l'un des bassins, de la même façon qu'une balle tournant dans un bol aura toujours tendance à atteindre le fond du bol. Plus le bassin est profond, plus l'attracteur est fort et plus le passage au bassin suivant est difficile. Très étudiée, notamment dans le domaine du contrôle moteur, cette notion d'attracteur est particulièrement précieuse pour comprendre la dynamique intrinsèque d'un système (Delignières 2004 ; Diedrich & Warren 1995). Par exemple, le paysage des attracteurs peut illustrer pourquoi, en fonction de la vitesse de déplacement, le corps humain possède une tendance naturelle à passer de la marche à la course et inversement. La figure 12 montre comment le paysage des attracteurs évolue par rapport à une vitesse de locomotion croissante. Pour une vitesse lente, la marche est l'attracteur le plus fort. Lorsque la vitesse augmente progressivement, les attracteurs changent et dessinent un nouvel état stable, la course. Ces variations de vitesse sont associées à un changement de la forme et donc de la puissance des attracteurs. Non illustré ici, le schéma inverse est également possible pour une vitesse décroissante. À haute vitesse, l'état stable est la course. Lorsque la vitesse diminue, la balle (le comportement de l'individu) a tendance à migrer vers un nouvel état stable, la marche. Ces changements de vitesse modifient la forme des attracteurs et obligent la balle à osciller entre la marche et la course.

Inspirée par cette représentation dynamique des comportements du système moteur, le conflit propre au double rôle de leader peut également être perçu à travers un paysage d'attracteurs où les exigences techniques (i.e. soigner le patient) et non-techniques (i.e. assurer le fonctionnement de l'équipe) seraient les deux attracteurs principaux.

La figure 13 représente le paysage d'attracteurs possible pour un leader, représenté par la balle noire, devant gérer à la fois les compétences techniques et non-techniques. L'état 1 représente un état stable où seules les compétences non-techniques (CNT) sont contrôlées. L'état 4 représente un deuxième état stable où seules les compétences techniques (CT) sont gérées. Les états 2 et 3 décrivent la phase de transition permettant le passage entre ces deux états stables. Le leader fait des allers-retours dans ce paysage d'attracteurs pour équilibrer le contrôle des CT et des CNT. La forme et la puissance des attracteurs étant dépendants des exigences de la situation. Cependant, certaines recherches sur le leadership au niveau organisationnel ont déjà montré que les leaders qui étaient confrontés à ce double rôle se considéraient avant tout comme des médecins formés pour être des "fournisseurs de soins directs" (Jolemore 2018 ; Quinn 2013 ; Quinn & Perelli 2016). Ainsi, les compétences techniques possèdent un pouvoir d'attraction beaucoup plus fort que celui des compétences non-techniques. En cas de conflit, la probabilité que la balle tombe dans le bassin « technique » (Figure 13 - État 4) est alors plus élevée. La gestion des aspects non-techniques est quant à elle déficiente et la sécurité des patients se voit menacée (Flin et al. 2010 ; Manser et al. 2009 ; Salas et al. 2007). De plus, nous pouvons supposer que ce risque de tomber au creux du bassin attracteur « CT » est encore plus probable dans une situation critique où les équipes médicales doivent s'occuper d'un enfant dont l'état de santé se détériore rapidement. En effet, en situation d'urgence, où la pression temporelle et le stress sont élevés, la charge mentale augmente et les ressources nécessaires pour contrôler la situation sont plus importantes. Les individus, dont les capacités cognitives sont alors altérées, deviennent vulnérables au mécanisme de tunnelisation attentionnelle (Wickens & Alexander 2009 ; Wolff et al. 2018). Comme l'écrivent ces auteurs, en cas d'évènement rare « la charge mentale de travail augmente et le stress peut engendrer une succession de mauvaises décisions et la *tunnelisation* peut alors survenir ». Par ailleurs, la charge mentale et le stress sont présentés comme des précurseurs de la tunnelisation attentionnelle (Régis 2011). De plus, nous avons déjà observé ce phénomène en simulation, lors de la prise en charge d'une situation critique nécessitant une intubation difficile. Face à l'incapacité d'intuber le patient, le médecin anesthésiste, aussi leader dans la situation, focalisait toute son attention sur la gestion de l'acte technique au détriment des activités non-techniques. Pendant 10 minutes, ses comportements étaient orientés uniquement vers la gestion des voies aériennes supérieures et vers de multiples tentatives d'intubation. Le médecin ne répondait plus à aucune question et ne se préoccupait plus des autres événements périphériques. Ainsi, la criticité de la situation et la pression temporelle propre à l'urgence médicale augmentent la probabilité que les soignants soient touchés par ce mécanisme de tunnelisation attentionnelle. Ces derniers se focalisent alors sur un seul élément (i.e. l'aspect technique du soin), et ignorent le reste de

l'environnement (i.e. les aspects non-techniques du soin). Par conséquent, la profondeur de l'attracteur CT augmente, rendant encore plus difficile le passage vers la gestion des activités non-techniques (Figure 13 - État 4 - Ligne pointillée).

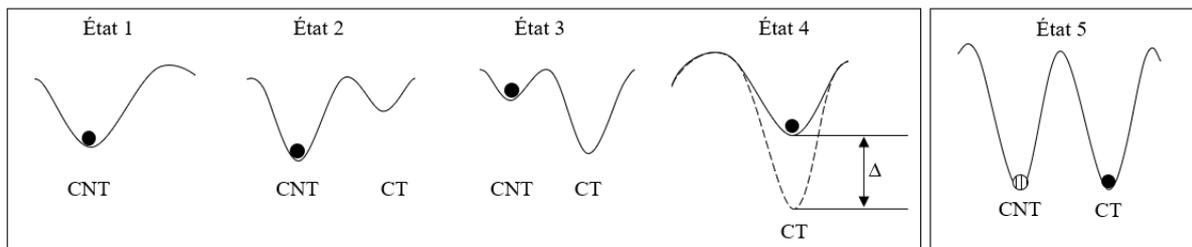


Figure 13 : Paysage d'attracteurs propre au rôle de leader.

L'état 1 est un état stable où "compétences non-techniques" (CNT) est l'attracteur le plus fort. L'état 4 est un état stable où "compétences techniques" (CT) est l'attracteur le plus fort. Les états 2 et 3 représentent les phases de transition permettant le passage de la balle d'un état stable à un autre. La ligne en pointillé de l'état 4 décrit la situation d'urgence pour laquelle le pouvoir d'attraction de CT augmente, formant un bassin plus profond (Δ). Le retour aux CNT est alors plus difficile, voire impossible. L'état 5 décrit notre proposition d'ajouter une balle et de rééquilibrer les pouvoirs d'attraction de CT et CNT pour créer deux états stables : un leader technique chargé de gérer les compétences techniques (balle noire) et un leader non-technique, nommé "coordinateur", chargé de gérer les compétences non-techniques (balle blanche).

Étant donné qu'un système tend naturellement à migrer vers un état stable, qui, pour un leader médical, correspond à la gestion des exigences techniques, et que la profondeur de ce même attracteur augmente pendant une urgence médicale, nous supposons que demander au leader de gérer simultanément les CT et les CNT pendant une urgence est contraire à la dynamique intrinsèque du système. En effet, nous prenons le risque dans une telle situation, que le leader soit happé par la gestion des aspects techniques du soin et se retrouve piégé par la profondeur de l'attracteur, l'empêchant ainsi d'assurer le contrôle des exigences non-techniques. Connaissant l'importance des CNT sur la coordination et les performances de l'équipe, le double rôle du leader peut donc être risqué pour la sécurité des patients.

6. Étape 7 : Proposer et concevoir une solution innovante

Face à ce constat, plusieurs propositions ont été faites (Figure 13 - État 5). Le premier objectif consiste à ajouter une balle dans le paysage des attracteurs de manière à ce que chaque attracteur (CT et CNT) puisse recevoir une balle. Cela se traduit par la conception d'un nouveau rôle au sein de l'équipe médicale destiné à gérer la coordination de l'équipe via le contrôle des activités non-techniques. Nous nommons ce rôle, le "coordinateur". Ainsi, lorsque la balle représentant le leader tombe naturellement dans le bassin CT lors d'une urgence, la seconde balle représentant le coordinateur peut tomber dans le bassin

CNT. Cependant, cela n'est possible que si le pouvoir d'attraction des CNT est aussi fort que le pouvoir d'attraction des CT. Dans le cas contraire, la balle du coordinateur tomberait également vers l'attracteur le plus puissant. Cela nous amène à notre seconde proposition, le rééquilibrage des pouvoirs d'attractions de CT et CNT. En termes de conception, cela se traduit par l'introduction d'outils de coordination dans la salle de soin destinés à jouer le rôle d'affordance en attirant le coordinateur vers la gestion des CNT.

Cette première métaphore, basée sur la modélisation des comportements des systèmes dynamiques, nous a permis de mettre en évidence le conflit que doit gérer un médecin dès lors qu'il endosse le rôle de leader en plus de son propre rôle d'expert médical. La schématisation de ce conflit par l'intermédiaire des bassins d'attracteurs illustre notamment qu'en cas d'urgence, un seul et unique leader ne peut contrôler simultanément et de façon optimale les aspects techniques et non-techniques du soin. En effet, la criticité de la situation couplée à la tendance naturelle du médecin à s'impliquer techniquement dans la prise en charge génère un terrain propice à la survenue du phénomène de tunnelisation attentionnelle. Ce phénomène étant modélisé par la chute de la balle au fond de l'attracteur CT dont la profondeur est telle que la transition vers l'attracteur CNT est quasi impossible. Le médecin focalise alors son attention sur le patient (SP) en oubliant son environnement (TI et GT). L'ajout d'une « balle » dans le système et la rééquilibration de la profondeur des bassins peuvent alors constituer des solutions innovantes. En termes de conception, le rôle de coordinateur est proposé comme une assistance organisationnelle destinée à rééquilibrer le système de l'urgence médicale dont la tendance naturelle génère une chute de la balle au fond de l'attracteur CT, autrement dit une migration du point opératif vers la contrainte SP. Afin de pouvoir imaginer concrètement ce rôle de coordinateur, le modèle DSM est utilisé pour spécifier son rôle, ses fonctions et ses outils.

a) Le coordinateur : un contrepoids dynamique au sein de DSM

Rappelons que dans le cadre de ce travail, le modèle DSM est caractérisé par trois contraintes : la contrainte de soin au patient (SP), la contrainte de gestion des tâches (GT), la contrainte de traitement de l'information (TI). Alors que le contrôle de la contrainte SP relève de compétences techniques, le contrôle des contraintes TI et GT relèvent de compétences non-techniques. Ainsi, et dans la logique de la démonstration précédente, nous pensons que le coordinateur doit occuper, au sein de l'espace de travail, une position proche des contraintes TI et GT lui permettant d'assurer la gestion des compétences non-techniques. D'un point de vue dynamique, cette position permettrait de contrer le déséquilibre provoqué par la migration naturelle des soignants vers la contrainte SP (Figure 14.A). À l'image d'une balançoire à bascule où l'équilibre n'est atteint que si les poids exercés de part et d'autre du point de rotation sont égaux, le coordinateur représenterait le contrepoids dynamique nécessaire au maintien de l'équilibre du système (Figure 14.B). Sa position et son poids étant toujours dépendants de la position des soignants situés de l'autre côté du centre de rotation, et dépendant du point de rotation qui lui-même dépend de la taille de l'espace de travail (i.e. de la dynamique des contraintes).

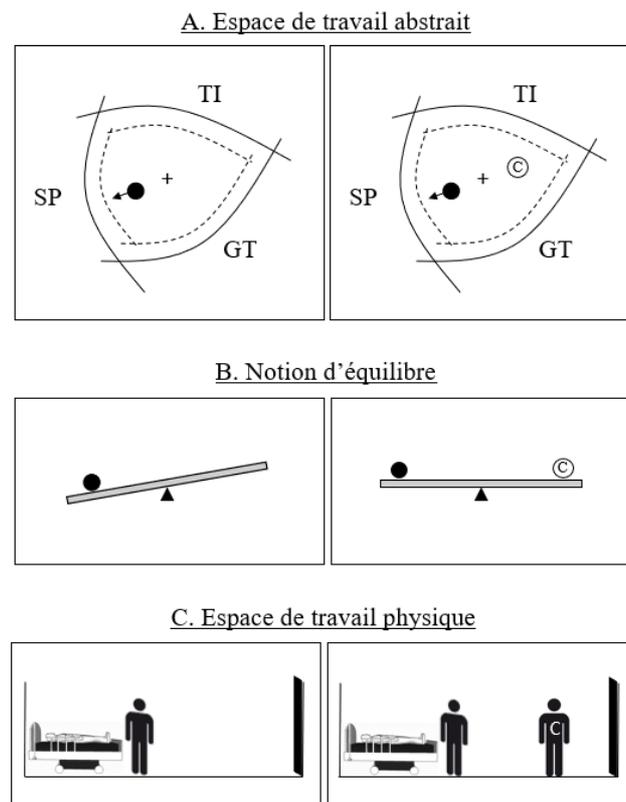


Figure 14 : Présentation du rôle de coordinateur comme un contre poids dynamique.

Le rôle de coordinateur (©), développé sur base du modèle DSM (A), est envisagé comme un contre-poids dynamique permettant de contrer la migration naturelle du système vers la contrainte SP et rééquilibrer le système (B). Cette position conceptuelle (A) est mise en relation avec l'espace physique (C), où le coordinateur est localisé en retrait pour pouvoir assurer ses fonctions.

Si la taille de l'espace de travail est modifiée sous l'effet des forces provenant des contraintes, le point d'équilibre du système voit sa localisation changer. Le coordinateur doit alors adapter sa position dans l'espace de travail. De la même façon, si les soignants modifient leurs positions au regard de la contrainte SP, le coordinateur doit également adapter sa position pour maintenir l'équilibre. À titre d'illustration, c'est comme si la taille de la balançoire à bascule ou son centre de rotation changeaient en continu et de façon aléatoire, forçant ainsi un joueur à adapter constamment sa position le long de cette balançoire pour assurer l'équilibre du couple.

Au sein de l'espace de travail, nous supposons que cette position se situe à l'opposé de la contrainte de soin SP, contrainte vers laquelle le système tend naturellement. À cet endroit, proche des contraintes TI et GT, le coordinateur est alors chargé de gérer les tâches et les informations plutôt que de prodiguer des soins directement sur le patient (Figure 14.A). Cette localisation « conceptuelle » au sein de l'espace fonctionnel dessiné par les contraintes peut être mis en relation avec l'espace physique (Figure 14.C). Alors que la gestion technique du soin ne peut se faire à distance du patient et nécessite d'être localisé à proximité de ce dernier, le contre-poids dynamique exercé par le coordinateur sous-entend une position

plus reculée permettant d'accéder à une vision globale de la situation. En positionnant le coordinateur à l'arrière-plan de l'espace de travail, à la fois dans l'espace fonctionnel et physique, ce dernier peut assurer la surveillance et le contrôle des activités de l'équipe nécessaires pour contrer la migration naturelle du système vers SP.

b) Les fonctions et outils du coordinateur

D'un point de vue fonctionnel, le coordinateur est alors défini comme un rôle médical destiné à assurer la coordination via le contrôle de la gestion des tâches (i.e. contrôler GT) et du traitement des informations (i.e. contrôler TI) en situation d'urgence. Ce rôle est complémentaire aux actions techniques destinées à contrôler l'état du patient (i.e. contrôle SP). En effet, lorsque l'attention de l'équipe est focalisée sur le patient et le contrôle de la contrainte SP, le coordinateur, lui assure le contrôle des contraintes TI et GT. Une liste de fonctions spécifiques à ce rôle a été conçue (Tableau 4). L'objectif étant de lister les comportements de coordination pouvant permettre au coordinateur d'assurer ce rôle de contreponds dynamique à l'arrière-plan de l'espace de travail. Cette liste, composée de 13 fonctions, a été élaborée de manière itérative avec la collaboration d'experts en médecine.

Les fonctions de coordination sont classées en fonction des contraintes délimitant l'espace de travail. Cette classification fonctionnelle, permet d'identifier les comportements nécessaires au contrôle des contraintes TI et GT. Ainsi, le coordinateur peut contrôler la contrainte informationnelle (TI) en écrivant les informations sur un tableau blanc ou sur une fiche de soins pour assurer la traçabilité, en effectuant les transferts d'informations, en déterminant ou en contribuant à la spécification des drogues, en initiant ou contribuant au diagnostic différentiel ou au questionnement clinique. Il se doit de fournir des feedbacks à l'équipe, suivre l'état du patient, collecter des informations supplémentaires de l'extérieur, et vérifier le processus de soins. Concernant la gestion des tâches, le coordinateur peut planifier les tâches, répartir les tâches au sein de l'équipe, aider à la préparation de l'équipement et à l'exécution des tâches. Toutefois, dans chaque cas, le coordinateur ne doit pas être pleinement impliqué dans ces processus. Il/elle n'apporte qu'une assistance périphérique pour améliorer le fonctionnement et la coordination de l'équipe. Enfin, et pour éviter que le coordinateur ne soit lui-même attiré par l'aspect technique du soin, et pour garder sa position fonctionnelle à l'arrière-plan de l'espace de travail, il/elle ne doit pas être impliqué dans les gestes techniques de soin.

Tableau 4 : Présentation des fonctions de coordination.

Type de comportement	Comportements	Exemples
Traitement de l'information (TI)	Écrire les informations pour la traçabilité (tableau blanc ou fiche de soins)	Le coordinateur écrit sur le tableau : "A 6 minutes : remplissage adrénaline 150γ"
	Effectuer le transfert des informations	"Nous avons un petit garçon de 5 ans, il a 39 de fièvre et il a fait un arrêt respiratoire soudain"
	Synthétiser les informations à voix haute (point de contrôle régulier et partagé)	"Tout va bien, le cathéter intra-osseux est inséré"
	Déterminer ou contribuer à la spécification des médicaments (sélection des médicaments, calcul du dosage des médicaments)	"Il pèse 19 kg et nous sommes à 20 ml/kg. Nous pouvons donner 400ml"
	Initier ou contribuer à un diagnostic différentiel ou à un questionnement clinique	"Je ne sais pas s'il a des boutons... Sinon, il pourrait s'agir d'un purpura fulminans"
	Fournir un feedback (validation des informations reçues)	"Très bien, d'accord !"
	Suivre l'état du patient (relever les signes vitaux ou les paramètres physiologiques)	"Peux-tu me donner le score de Glasgow du patient, s'il te plaît"
	Recueillir des informations complémentaires à l'extérieur (famille, autres services)	"Avez-vous vu la mère ? Que dit la famille ?"
	Contrôler le déroulement des soins (suivi des soins pour en assurer la qualité et la sécurité)	"Les deux voies veineuses sont-elles perméables et fonctionnelles ?"
Gestion des tâches (GT)	Organiser ou contribuer à la planification des tâches liées aux soins (objectifs, séquence temporelle des soins)	"Dès que le remplissage est terminé, on commence un deuxième remplissage, mais les antibiotiques doivent être passés avant"
	Répartir la charge de travail et les tâches entre les soignants	"J'ai une infirmière qui gère la première voie veineuse, je te propose d'en mettre une deuxième"
	Aider à la préparation des équipements et à l'exécution des tâches	Le coordinateur lit le document pour connaître la taille de la lame nécessaire à l'intubation
Gestion technique du soin (SP)	Ne doit pas s'impliquer dans les gestes techniques	Le coordinateur n'effectue pas de compressions thoraciques ni d'intubation trachéale ni aucun soin direct sur le patient

Concernant les outils dédiés au coordinateur, un tableau blanc et une veste ont été utilisés (Figure 15). Les tableaux blancs ont déjà été présentés comme des outils communs d'affichage d'informations pour la gestion des urgences (Jenkins et al. 2010 ; Xiao et al. 2007) et comme jouant un rôle essentiel pour soutenir le partage d'informations dans des situations de travail très dynamiques (Bisantz et al. 2015 ; Jenkins et al. 2010 ; Xiao et al. 2007). Concernant la veste, nous avons supposé que ce repère visuel pouvait permettre des comportements orientés vers l'émergence d'un coordinateur d'équipe et faciliter son identification. Conformément à la position du coordinateur à l'arrière-plan de l'espace de travail fonctionnel, les outils de coordination étaient situés à la périphérie du lit du patient (Figure 15).



Figure 15 : Présentation du coordinateur en situation.

Le coordinateur, doté de sa veste, écrit les informations au tableau pendant que les soignants sont autour du patient.

Sur la base de ce modèle conceptuel et de la spécification des fonctions attribuées au coordinateur, nous avons évalué la contribution de ce rôle au sein d'équipes d'urgences pédiatriques lors de sessions de formation professionnelle. L'hypothèse principale étant que la présence du coordinateur permettrait de réduire la tendance naturelle du système à migrer vers la contrainte technique de soin et donc à améliorer la performance des équipes.

7. Étapes 8 : Sur la base d'une démarche expérimentale, tester, quantifier l'apport de cette assistance en contexte de simulation

a) Méthode

i. Les participants

Au total, 52 praticiens (33 femmes et 19 hommes) répartis en huit équipes ont participé à cette étude selon un protocole quasi-expérimental. Sur les 52 participants, 8 étaient des pédiatres (6 femmes et 2 hommes), 8 des infirmières pédiatriques (8 femmes), 8 des médecins urgentistes (1 femme et 7 hommes), 8 des infirmières (7 femmes et 1 homme), 8 des anesthésistes (6 femmes et 2 hommes), 8 des infirmières anesthésistes (4 femmes et 4 hommes) et 4 des médecins de soins intensifs (1 femme et 3 hommes). Tous les participants étaient employés au GHBS de Lorient et participaient à un programme de formation générale sur les urgences pédiatriques au centre de Simulation en Santé du Scorff (C3S). Les soignants intervenaient par binôme de spécialités. Les binômes de même spécialité travaillaient régulièrement ensemble dans le même service, mais au-delà des spécialités, les soignants ne se connaissaient pas et n'avaient jamais travaillé ensemble. Tous les participants étaient invités à signer un

formulaire de consentement nous permettant d'utiliser leurs images et les enregistrements vidéo dans le cadre de l'étude.

ii. Le programme d'entraînement

L'étude s'est déroulée dans le cadre d'un programme d'entraînement professionnel mis en place au Groupe Hospitalier Bretagne Sud (GHBS, Lorient) et conçu pour remettre à niveau les compétences nécessaires à la prise en charge d'une urgence pédiatrique. La figure 16 présente la journée type de formation en simulation, tant pour la formation habituelle que pour la formation orientée vers les expérimentations visant à tester le rôle de coordinateur.

Une journée de formation se déroule généralement de cette manière : une première phase théorique est axée sur la mise à jour des compétences médicales spécifiques aux urgences pédiatriques. Une deuxième étape se concentre sur la révision des compétences techniques requises dans une urgence pédiatrique telles que la pose d'une voie intraveineuse, d'une perfusion, ou la réalisation des compressions thoraciques... Ensuite, les soignants sont placés dans deux situations de simulation, toutes deux précédées d'un briefing et suivies d'un débriefing. Lors de la journée de formation orientée vers la mise en place du rôle de coordinateur, une phase de présentation du rôle de quinze minutes a été ajoutée entre les deux scénarios.

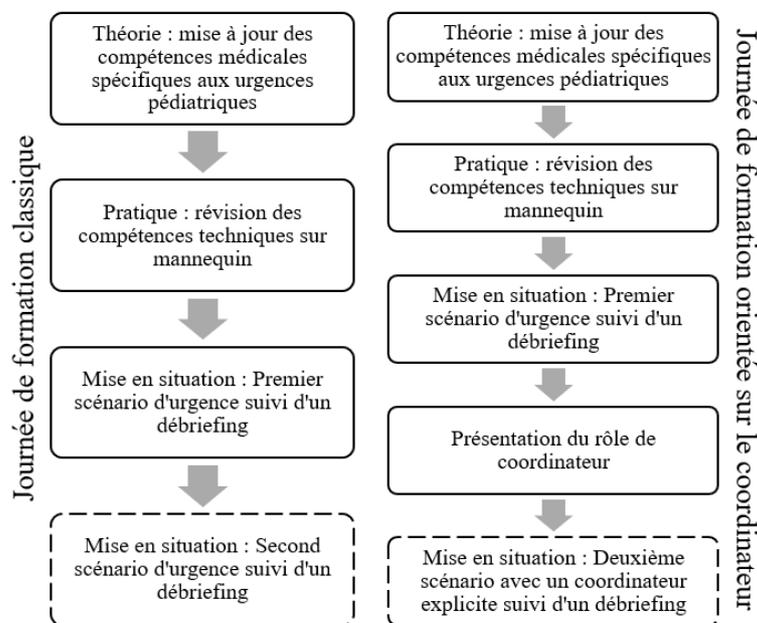


Figure 16 : Programme des journées de formations professionnelles.

À gauche, le programme d'une journée type de formation en simulation composée d'une phase théorique, d'une phase pratique et de deux simulations d'urgence pédiatrique. Chaque scénario est suivi d'un débriefing. À droite, le programme d'une journée type destinée à tester le rôle de coordinateur. Seule la phase de présentation du rôle est ajoutée entre les deux scénarios. La ligne pointillée représente les deux séries de données qui font l'objet d'une analyse.

Les scénarios ont été élaborés par des médecins experts et des formateurs en simulation. Un événement indésirable déclenche généralement l'arrivée de six soignants : un pédiatre, une infirmière pédiatrique, un anesthésiste, une infirmière anesthésiste, un médecin urgentiste et une infirmière urgentiste. Il convient de noter que, comme dans les situations réelles, la disponibilité des personnes ou la complexité de la situation peuvent modifier cette équipe standard. Dans les présentes sessions de formation, les équipes 5 à 8 ont répondu à cette norme, et les équipes 1 à 4 ont inclus un médecin réanimateur supplémentaire.

Ces scénarios impliquaient soit un arrêt cardiaque, soit un choc septique. Le scénario d'arrêt cardiaque a été présenté comme suit : Un garçon de 5 ans souffre depuis 72 heures d'une gastroentérite aiguë, et a fait un malaise à la maison. Sa mère l'a amené aux urgences pédiatriques. Après avoir été accueilli par les équipes de soin, il a été immédiatement dirigé vers les urgences car il était inconscient. Le scénario du choc septique a été présenté comme suit : Un garçon, âgé de 3 ans, présente une forte fièvre. Il a vomi pendant la nuit. La nounou l'a amené aux urgences car l'enfant ne se comportait pas comme d'habitude et a estimé que son état nécessitait une prise en charge médicale.

iii. Le protocole expérimental

Deux séries distinctes de formation ont été enregistrées et analysées : une série sans coordinateur explicite (équipes 1 à 4) durant laquelle les soignants organisaient la prise en charge comme ils le souhaitent et une seconde série avec un coordinateur explicite (équipe 5 à 8) durant laquelle le rôle de coordinateur était imposé.

Dans les deux séries de sessions, le même dispositif de simulation haute-fidélité a été utilisé, à savoir un mannequin représentant un jeune enfant installé dans une salle d'urgence. La session sans coordinateur explicite s'est déroulée dans une salle d'urgence du centre de simulation de l'hôpital. Les sessions avec un coordinateur explicite ont eu lieu in situ, dans une salle d'urgence réelle du même hôpital, avec un dispositif de simulation mobile, un an après la première série de sessions.

Le déroulement des scénarios était toujours le même, il simulait la configuration de travail habituelle. La situation était d'abord décrite à deux participants. Les autres participants attendaient dans une deuxième salle et n'avaient aucune information sur la situation. Les deux premiers soignants pénétraient dans la salle d'urgence et débutaient le traitement médical (première vague). Du fait de la dégradation rapide et brutale du patient, ce premier binôme était rapidement amené à déclencher l'appel d'urgence destiné à faire venir une équipe de soutien. Cette équipe d'assistance entrait en action (deuxième vague), suivie d'une troisième équipe de soutien quelques minutes plus tard (troisième vague). L'ordre et le moment d'arrivée dépendaient de l'ordre dans lequel l'appel à l'aide était lancé par les premiers soignants sur place. Chaque vague de soignant impliquait toujours des paires de mêmes spécialités : pédiatre avec infirmière pédiatrique ; médecin urgentiste avec infirmière ; anesthésiste avec infirmière anesthésiste.

Seuls les médecins réanimateurs arrivaient seuls lors de l'appel à l'aide pour les équipes 1, 2, 3 et 4. Pour l'analyse ils étaient considérés comme appartenant à la troisième vague.

Pour les équipes 5, 6, 7 et 8, qui ont expérimenté le nouveau rôle de coordinateur, une présentation standardisée de ce rôle a été introduite pendant la phase de briefing. Cette présentation était basée sur trois points principaux : que fait le coordinateur (i.e. une liste de 13 fonctions a été fournie sur une présentation de diapositives), qui peut être coordinateur (i.e. le premier médecin sur place a reçu l'instruction de devenir coordinateur, comme c'est généralement le cas pour un rôle de leader (Murray & Foster 2000)), et quand le rôle de coordinateur doit être assumé (i.e. dès qu'il y a suffisamment de membres de l'équipe pour permettre au premier médecin de prendre du recul pour assumer le rôle de coordinateur).

En ce qui concerne le contenu des scénarios, les équipes 1 à 6 ont pris en charge une situation de choc septique (scénario 2), tandis que les équipes 7 et 8 ont pris en charge une situation d'arrêt cardiaque (scénario 1).

iv. Les mesures

Performance de l'équipe : Sur la base des enregistrements vidéo, la performance de chaque équipe était codée à l'aide de l'échelle TEAM (Cooper et al. 2010). Le codage était réalisé par un formateur expérimenté en simulation, responsable des sessions de formation en simulation depuis 6 années et également infirmier anesthésiste, et moi-même. La performance globale de l'équipe n'était notée que lorsque l'équipe d'urgence était complète, c'est-à-dire lorsqu'elle était composée d'au moins six soignants. Cette situation correspondait à l'arrivée de la troisième vague et coïncidait avec le moment où le coordinateur prenait en charge son rôle pour les équipes 5 à 8.

Fréquence des comportements de coordination : Les fonctions de coordination (Tableau 4) ont été utilisées comme une grille de codage afin de comptabiliser le nombre total de comportements de coordination mis en place dans l'équipe. Le comportement de chaque médecin dans l'équipe a été observé et codé individuellement.

Répartition des actions de coordination entre les médecins : Nous avons évalué statistiquement la répartition des actions de coordination entre les 3 médecins les plus coordonnant grâce à l'indice d'entropie de Shannon ($H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$). Plus la valeur de l'indice de Shannon est élevée, plus les actions de coordination se répartissent de façon équilibrée entre les trois médecins. Plus la valeur de l'indice de Shannon est faible, plus la répartition des actions de coordination entre les 3 médecins est déséquilibrée.

Évaluation subjective du rôle de coordinateur : Lors du débriefing des sessions avec un coordinateur explicite, les évaluations subjectives des participants ont été recueillies au moyen d'une version adaptée de l'échelle d'utilisabilité des systèmes SUS (Brooke 1996).

Un codage indépendant de huit échantillons d'enregistrement analysés par deux codeurs a montré des niveaux élevés de fiabilité inter-juges tant pour l'échelle de performance TEAM ($Rho=0.95$; $p<0.001$), que pour les fonctions de coordination (indice Kappa-Cohen=0.93). Le test de Shapiro-Wilk n'a montré aucune déviation de la normalité pour toutes ces mesures.

b) Résultats

Le tableau 5 montre les résultats obtenus pour chaque équipe. Pour plus de lisibilité, les équipes ont été classées par ordre de performance croissant.

Tableau 5 : Présentation des résultats.

Score de performance TEAM, condition avec (C) ou sans (N) coordinateur explicite, total des actions de coordination pour les médecins de l'équipe, indice de répartition des actions de coordination entre ces médecins (indice d'entropie de Shannon), spécialité médicale du médecin le plus coordonnant, la proportion d'action de coordination prise en charge par ce médecin et son implication ou non dans des gestes techniques.

Equipes	Score de performance TEAM	Condition	Total des actions de coordination des médecins de l'équipe	Répartition des actions de coordination (Indice Shannon)	Médecin le plus impliqué dans la coordination	Proportion de coordination de ce médecin	Son implication dans du soin technique
E8	2	C	40	1,09	Pédiatre ©	40,00	Oui
E7	3	C	46	0,91	Pédiatre ©	63,04	Oui
E4	3	N	54	1,08	Anesthésiste	39,13	Oui
E2	4	N	43	1,00	Pédiatre	46,34	Oui
E3	4	N	45	0,97	Urgentiste	53,49	Non
E1	7	N	49	0,96	Réanimateur	47,83	Non
E5	9	C	71	0,58	Pédiatre ©	80,28	Non
E6	9	C	86	0,40	Urgentiste ©	88,37	Non

Les équipes ayant un coordinateur explicite montrent des performances très variables. Les équipes 5 et 6 présentent les meilleurs scores globaux en atteignant 9 points sur 10. Les équipes 7 et 8 ont les niveaux de performance les plus bas, respectivement 3 et 2 points sur 10. Il n'y a pas d'effet significatif de la présence d'un coordinateur explicite sur la performance de l'équipe par rapport aux groupes sans coordinateur explicite ($H(1)=0.02$, $p=0.88$, $\eta^2=0.06$).

Concernant le total des actions de coordination des médecins de l'équipe, tout groupe confondu, il existe une corrélation positive entre cette variable et la performance ($Rho=0.703$, $p=0.026$). Plus les actions de coordination sont nombreuses, plus la performance est bonne. De plus, la performance est également corrélée à l'indice de répartition des comportements de coordination entre les 3 médecins les plus coordonnant ($Rho=-0.800$, $p=0.017$). Cette corrélation négative indique que plus la répartition des comportements de coordination est homogène entre les médecins, plus la performance est faible. À l'inverse, la performance est plus élevée lorsque les comportements de coordination sont le fait d'un nombre faible de médecins, i.e. d'un seul médecin.

Ce dernier résultat est confirmé par la corrélation positive observée entre la proportion de coordination prise en charge par le médecin le plus coordonnant et la performance ($Rho=0.727$, $p=0.041$). Plus un médecin centralise les comportements de coordination, meilleure est la performance, et ceci qu'il y ait eu ou non la désignation formelle d'une personne au poste de coordinateur. Qualitativement, la figure 17 nous montre, pour chaque équipe, comment se répartissent les proportions de coordination prises en charge par chaque médecin en fonction de leurs spécialités. De gauche à droite, les équipes sont ordonnées par ordre décroissant de performance. Dès lors qu'un médecin, indépendamment de sa spécialité, prend en charge la plus grande partie des actions de coordination, le score de performance est élevé. Plus cette répartition s'équilibre entre les médecins de l'équipe, plus la performance diminue.

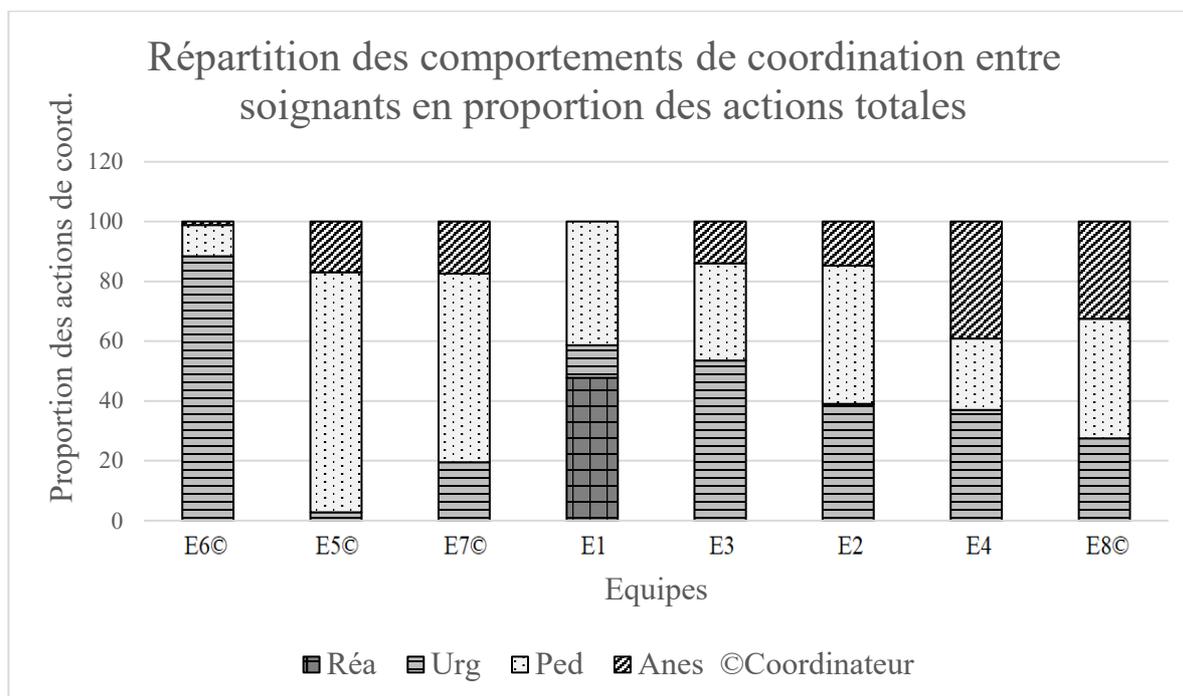


Figure 17 : Répartition des comportements de coordination entre soignants en proportion des actions totales.

Il est possible de noter également que dans les équipes 4 et 8, qui présentent respectivement des scores de performance de 3 et 2 points sur 10, la proportion d'actions de coordination prise en charge par les anesthésistes est plus importante que dans les autres équipes. À l'inverse, au sein de l'équipe 6 qui présente le score de performance le plus élevé (9/10), la proportion de coordination prise en charge par l'anesthésiste est minimale (1.16% des actions de coordination totale). Il existe une corrélation négative entre le score de performance de l'équipe et la proportion d'action de coordination prise en charge uniquement par l'anesthésiste ($Rho=-0.727$, $p=0.041$). Moins l'anesthésiste est impliqué dans la gestion des comportements de coordination, plus la performance est bonne.

Pour finir, nous pouvons remarquer que les équipes présentant les meilleurs scores de performance sont également les équipes au sein desquelles le médecin le plus investi dans la gestion des comportements de coordination (coordinateur implicites et explicites) ne réalise aucun geste technique ($U=15.5$, $p=0.040$). Par exemple, dans l'équipe 7, le médecin coordinateur exécute les compressions thoraciques de manière inappropriée alors qu'il effectue le transfert des informations. Dans l'équipe 8, le coordinateur pose un cathéter intra-osseux tout en étant impliqué dans le transfert des informations.

Concernant l'évaluation subjective du rôle de coordinateur, l'équipe ayant expérimenté le rôle explicite de coordinateur évalue positivement ce nouveau poste par un score moyen de satisfaction (score SUS de 77,1 sur 100, $SD=11,4$). Les commentaires associés mettent en évidence l'importance du rôle du coordinateur dans la répartition des tâches et la gestion de l'information : « Le coordinateur permet à chacun d'être à son poste avec une compétence spécifique » ; « Je parle au coordinateur qui est en chargé de trouver une réponse et de diffuser l'information. C'est confortable ». D'autres commentaires révèlent la difficulté pour les médecins de quitter leur rôle technique : « Il est difficile d'imposer au premier médecin d'être coordinateur », « Il est difficile de trouver le bon moment pour quitter sa tâche technique et enfiler la veste », « Le coordinateur n'est pas autorisé à exercer une activité technique ».

c) Discussion

En cas de détérioration rapide de l'état du patient, la gestion des urgences nécessite qu'un leader prenne en charge des compétences non-techniques en plus des compétences techniques relatives à son expertise médicale. Dissocier et équilibrer ces différents types de compétences est difficile pour le médecin en charge de ce double rôle, d'autant plus en situation critique où la pression temporelle et les enjeux sont élevés. À notre connaissance, c'est la première fois qu'une étude propose de dissocier les aspects techniques et non techniques du soin attribués au leader pour tenter de contrer les conflits potentiels et les effets négatifs associés au multitâche.

Au lieu d'assigner des activités techniques et non-techniques à un seul individu, l'idée consistait à dissocier deux rôles distincts, un leader technique qui se met en place de manière intuitive au près du lit du patient et un leader non technique, que nous avons nommé *coordinateur*, positionné dans une zone dédiée à la coordination. Par une prise de recul forcée induite par un éloignement spatial et la mise à disposition d'outils constituant des affordances propres à l'activité de coordination, le but était de développer une zone fonctionnelle propice à la mise en place de comportements de coordination (i.e. collecte et diffusion de l'information, gestion des tâches, inhibition des actes techniques).

Ce nouveau rôle de *coordinateur* avait également pour objectif conceptuel d'équilibrer la tendance naturelle du système à migrer vers la gestion des aspects techniques du soin, au détriment des activités non techniques. L'utilisation de la méthode hCWA proposée récemment par Morineau & Flach (2019), nous a permis de modéliser cette problématique sur la base de l'étude du champ de force propre à

l'espace de travail du système médical et à proposer un espace fonctionnel réel simulé au sein duquel nous avons testé cette nouvelle assistance organisationnelle.

Cette première tentative d'introduire un coordinateur dans une équipe d'urgence a montré des résultats contradictoires en termes de performance au sein des équipes. L'absence d'effet statistique de la présence du coordinateur sur la performance des équipes nous indique notamment qu'une coordination implicite mise en place naturellement au sein des équipes d'urgence est tout aussi efficace qu'une coordination explicite accompagnée d'outils spécifiques dédiés. Certes ce premier résultat souligne que la présence du coordinateur n'améliore pas la performance des équipes mais, à l'inverse, il nous indique également que la présence du coordinateur ne détériore pas la performance. Or, certains travaux menés sur la coordination mettent en évidence qu'une coordination explicite est souvent recommandée, surtout lors de situations complexes non routinières (Grote et al. 2009). Ainsi, en développant un rôle de coordinateur clairement identifiable visuellement et dont les fonctions et outils sont connus de tous, nous fournissons aux équipes des outils leur permettant d'installer et maintenir une coordination explicite lors de la prise en charge d'une urgence pédiatrique.

Cependant il est important de noter que la performance de l'équipe semble être affectée par la capacité du médecin à endosser ce rôle. En effet, dès lors que les consignes sont respectées par le coordinateur (i.e. prise en charge des actions de coordination et non implication dans les gestes techniques), comme c'est le cas pour les équipes 5 et 6, la performance est élevée. A l'inverse, lorsque les consignes ne sont pas respectées (i.e. partage des comportements de coordination entre les médecins et implication dans les gestes techniques) alors la performance est faible. C'est le cas des équipes 7 et 8. Nous supposons que ces différences dans l'appropriation du rôle de coordinateur et les conséquences sur la performance, peuvent avoir plusieurs origines : (i) une présentation trop brève du rôle de coordinateur et l'absence de séance de pré-test pour faciliter l'appropriation, (ii) les différences individuelles (personnalité, capacités à endosser un rôle de leader, intérêt à tester de nouvelles configurations de travail), et (iii) la relation qu'entretiennent les soignants avec l'environnement de simulation (première séance, formations passées difficiles, absence d'intérêt). À titre d'exemple, le médecin coordinateur de l'équipe 8, équipe présentant le plus faible score de performance, illustre bien ce phénomène. Le coordinateur avait déclaré en debriefing « je sais que la simulation ça marche, mais j'ai quand même du mal ». Ainsi l'investissement dans son rôle était partiel et caractérisé par des actions de coordination en faible nombre et une implication dans des actes techniques. Il apparaît alors essentiel de mieux former les soignants au rôle de coordinateur afin d'assurer une prise en charge complète du rôle et d'augmenter ainsi les performances des équipes médicales. Des travaux sont en cours pour concevoir des programmes de formation et des outils ergonomiques adaptés, tels qu'un tableau structuré pour faciliter la communication et la recherche d'informations, sur la base d'une approche de conception participative. De plus, la plupart des salles médicales sont déjà équipées de tableaux blancs. La conception serait donc basée sur l'amélioration des dispositifs existants et se ferait à moindre coût. La performance de l'équipe pourrait alors être améliorée

de manière simple, par la formation d'un seul soignant chargé de coordonner les ressources. Cela ne nécessiterait plus une longue formation d'une équipe d'urgence complète de 6 personnes, comme l'exigent les MET (Medical Emergency Team) ou les RRT (Rapid Response Team) (Brilli et al. 2007).

Cette proposition de former un seul soignant chargé d'assurer la coordination soulève néanmoins d'autres questions : quel médecin pourra recevoir cette formation ? Les médecins seront-ils désignés ou la sélection se fera-t-elle sur la base du volontariat ? Dans cette étude, et en accord avec les travaux menés par Murray & Foster (2000), le premier médecin prenant en charge l'urgence était désigné comme le coordinateur. Cependant, et compte tenu des éléments précédents, il semblerait que demander à un médecin d'endosser le rôle de coordinateur contre son gré ne soit pas une stratégie pertinente. En effet, obliger quelqu'un à faire quelque chose peut affecter son investissement. A l'inverse, laisser les soignants choisir peut également s'avérer complexe et dangereux. Cela conduirait à nouveau à des situations ambiguës où plusieurs personnes souhaiteraient endosser le rôle de coordinateur mais où personne ne serait pleinement responsable (Flin & Maran 2015). La question de « qui doit être coordinateur » reste alors ouverte. Néanmoins, nos résultats ont montré une corrélation négative entre le score de performance de l'équipe et la proportion d'action de coordination prise en charge par l'anesthésiste indiquant que plus l'anesthésiste est impliqué dans la gestion des comportements de coordination, moins la performance de l'équipe est bonne. Cela semble logique lorsque l'on considère l'anesthésie comme une discipline très technique, nécessitant une présence forte à la tête du patient et donc incompatible avec une implication complète dans la gestion des actions de coordination dans une zone fonctionnelle reculée.

Pour finir, et en considérant les équipes impliquées comme 8 groupes indépendants, nous avons été en mesure de mettre en évidence certains critères de la coordination améliorant la performance. Il semblerait ainsi que la performance soit meilleure lorsque les actions de coordination sont nombreuses à l'échelle de l'équipe et lorsque ces actions sont centralisées auprès d'un seul soignant. Ce résultat signifie qu'en cas d'urgence pédiatrique, la désignation d'un coordinateur unique serait nécessaire plutôt qu'une coordination partagée entre plusieurs soignants. L'idée de l'émergence au sein de l'équipe d'un médecin dévoué à prendre en charge la plus grande partie des actions de coordination, laissant aux autres médecins de l'équipe la possibilité de gérer les aspects techniques de la situation, semble être une stratégie efficace.

Pour finir, ces résultats contradictoires doivent être discutés au regard des limites de cette étude. La première limite est liée à la simulation et aux capacités techniques du mannequin à « réagir ». Malgré des outils techniques puissants (e.g. simulation de la cyanose labiale), les médecins sont parfois privés des repères visuels nécessaires au diagnostic. La mesure du tonus musculaire par exemple est impossible alors que c'est un indicateur important en pédiatrie pour l'examen neurologique. La seconde limite concerne le codage. Les comportements des médecins et coordinateurs ont été analysés sur la base de la grille de fonctions de coordination que nous avons élaborée. Cette grille devrait être testée et validée

afin de renforcer les résultats. La troisième limite concerne les scénarios. Ces derniers étaient différents selon les équipes et au sein même du groupe expérimental. Alors que les équipes 1 et 6 ont géré le choc septique, les équipes 7 et 8 ont géré un scénario d'arrêt cardiaque. Ces équipes étant aussi celles présentant les scores de performance les plus faibles. La performance de l'équipe et la capacité du soignant à assumer le rôle de coordinateur peuvent dépendre de la complexité du scénario. Pour finir, la pertinence des résultats sont limités par la taille de l'échantillon. Malgré un échantillon initial important (i.e. 52 soignants) notre analyse s'est focalisée sur les comportements de coordination des médecins. De plus, seules les performances de 4 coordinateurs ont été observés et analysés.

Malgré des limites importantes, les perspectives qui découlent de ce travail sont encourageantes. La première étape consisterait à évaluer cette innovation organisationnelle dans un cadre expérimental contrôlé avec un échantillon plus large de participants, et à concevoir un programme d'éducation pour exploiter pleinement les apports d'un coordinateur en situation d'urgence. Une autre piste à explorer pourrait être de tester si des non-médecins, par exemple les infirmières, pourraient assumer le rôle de coordinateur dans le but de permettre aux médecins de se concentrer sur leurs tâches techniques. Pour finir, un codage plus exhaustif serait intéressant. En effet, le codage réalisé dans ce travail ne concernait que la dernière partie de la vidéo, moment où tous les membres de l'équipe étaient présents. Il serait intéressant de coder toute la vidéo et les comportements de chacun des soignants médicaux et paramédicaux pour ainsi comparer la distribution des comportements de coordination avant et après l'émergence du coordinateur. Cela permettrait d'étudier ce que l'on nomme la phase de transition (Grote et al. 2009). En effet, ces auteurs soulignent que ce n'est pas forcément la coordination dans les situations routinières ou non routinières qui impacte la performance mais bien le moment où l'équipe passe d'une situation routinière à une non routinière. Cette phase de transition nécessite des comportements adaptatifs rapides pour répondre à la situation critique. Le coordinateur pourrait alors être envisagé comme un moyen efficace et standardisé de contrôler cette phase de transition. Des mesures dynamiques de la coordination serait alors possible sur la base des travaux menés par Gorman et ses collègues (Gorman et al. 2018).

d) Conclusion

Sur la base des principes exposés par la méthode hCWA, nous avons été en mesure de proposer une assistance organisationnelle destinée à rééquilibrer la tendance naturelle du système à migrer vers la gestion des aspects techniques du soin au détriment des aspects non-techniques. Un rôle de coordinateur a donc été spécifié et testé au sein d'équipes d'urgences pédiatriques lors de sessions de formations professionnelles. Avec l'aide d'une liste de fonctions claires, d'outils de coordination spécifiques (i.e. une veste, un tableau blanc) et d'une zone fonctionnelle dédiée, ce nouveau rôle était destiné à contrôler les contraintes de gestion des tâches et de traitement de l'information via la maîtrise des activités non-techniques du soin.

III. Second cas applicatif

Le retard de réveil en anesthésie générale

Ce second cas applicatif, réalisé en collaboration avec les soignants du Groupe Hospitalier de Bretagne Sud (GHBS), est issu d'une demande particulière d'un médecin anesthésiste sensible aux facteurs humains et soucieux d'améliorer sa pratique. Fort de longues années d'expériences sur le terrain et d'un intérêt vif pour la simulation, ce dernier souhaitait réfléchir à la question de la sécurité et de la performance lors d'une situation critique spécifique à son activité : le retard de réveil. En effet, ses constatations personnelles indiquaient que le retard de réveil concernait 1 à 2 % des anesthésies générales, soit entre 50 et 70 cas par an au GHBS. Notre objectif a alors consisté à appliquer les principes de la méthode hCWA pour répondre à des besoins de terrain : comment soutenir les anesthésistes dans la prise en charge d'un retard de réveil. Chaque étape méthodologique, citée précédemment, sera à nouveau appliquée ici. Dans un premier temps, le modèle DSM nous permettra d'analyser le domaine de travail et d'identifier les contraintes délimitant l'espace de liberté au sein duquel les anesthésistes peuvent naviguer dans une telle situation. La dynamique des contraintes et les conséquences potentielles sur la trajectoire du point opératif seront inférées. Ces hypothèses seront renforcées par une analyse de la littérature et par les avis experts des médecins anesthésistes concernés dans le contrôle de ces situations. Pour finir, une assistance sera proposée, développée et testée en situation de simulation dans le but d'évaluer l'apport de cette aide comme nouvel outil intégré au système.

1. Étape 1 : Identifier les contraintes de l'espace de travail

Le retard de réveil constitue une urgence médicale dont l'espace de travail est constitué des 3 contraintes identifiées précédemment : la contrainte de soin au patient (SP), la contrainte de gestion des tâches (GT), la contrainte de traitement de l'information (TI).

2. Étape 2 et 3 : Identifier les pressions potentielles qui se produisent lors d'un retard de réveil en anesthésie ainsi que les risques associés

Le retard de réveil est une situation complexe, angoissante et souvent énigmatique qui se définit à partir du « délai attendu de la reprise de la conscience après l'arrêt des anesthésiques » (Bruder & Gallula 2007). Les facteurs pouvant expliquer ce retard sont nombreux et dépendent à la fois du patient, du type d'anesthésie administrée et de la durée de l'opération (Saranagi 2008). Même s'il est difficile de donner des valeurs précises pour les délais normaux ou anormaux, on soupçonne un événement indésirable lors

d'une perte de conscience de plus de 30 minutes après l'heure prévue du réveil. Passé ce délai, les médecins disposent d'une courte fenêtre temporelle pour décider si le réveil relève de « situations normales témoignant de la variabilité pharmacologique interindividuelle » ou « de complications graves » (Burder & Gallula 2007). La démarche diagnostic mise en œuvre permet alors d'identifier précisément la cause sous-jacente dans le but de mettre en place, ou non, une thérapie appropriée (Misal et al. 2016). Cette réflexion est menée en parallèle au maintien de la gestion des voies aériennes supérieures, de la respiration et de la circulation (Shaikh & Lakshmi 2014). En l'absence de critères objectifs, la démarche diagnostic doit avant tout être rationnelle et orientée vers l'élimination des causes élémentaires. D'autres examens supplémentaires tels que les IRM ou les scanners doivent toutefois être demandés si aucune cause élémentaire n'est identifiée rapidement (Bruder & Gallula 2007).

Plusieurs hypothèses concernant les valeurs des contraintes, leur dynamique et les risques potentiels associés peuvent alors être émises :

1. La contrainte de soin au patient (SP) constitue la contrainte majeure du système de travail. La détérioration de l'état du patient en tant que domaine de travail doit être contrôlée et stabilisée par les soignants. Dans le cas d'un retard de réveil, les soins aux patients dépendent essentiellement de la qualité et la quantité des informations disponibles qui vont orienter le diagnostic. Face à un patient endormi, les premiers indices perceptibles proviennent des variables physiologiques et de l'examen clinique. Cependant, ces informations peuvent ne pas être suffisantes et l'équipe médicale doit alors recourir à d'autres stratégies pour recueillir l'ensemble des données nécessaires à la maîtrise de la situation. Ainsi, ces premiers indices peuvent être complétés par la consultation du dossier médical ou encore par un recueil d'informations auprès des médecins qui sont intervenus sur le patient. L'objectif étant d'identifier d'éventuels complications médicales sous-jacentes expliquant le retard de réveil. Ainsi, cette dépendance aux informations donne à la contrainte TI une forte valeur attractive. Nous supposons que le point opératif aura tendance à migrer vers TI, diminuant ainsi l'attention portée au patient et à l'évolution de ses constantes physiologiques. Le risque principal étant que l'équipe soignante perde du temps précieux à chercher des informations détenues par différents acteurs ou différents services au détriment de la surveillance rigoureuse du patient et de l'élaboration du diagnostic (Figure 18.1).
2. En fonction de la qualité ou de la quantité des informations recueillies, l'équipe médicale peut demander des tests ou examens supplémentaires pour tenter de comprendre les causes sous-jacentes au retard de réveil. Ainsi, nous pouvons imaginer que le point opératif aura tendance à migrer vers la contrainte GT dès lors que les informations disponibles seront insuffisantes à la confirmation ou l'infirmité de certaines hypothèses. Dans un contexte où la pression temporelle est forte, le temps nécessaire pour mettre en place ces examens coûteux en ressources

humaine et matérielle représente un risque pour le patient, celui de se lancer dans une multitude d'examens et de fournir un diagnostic pertinent mais inefficace car trop tardif (Figure 18.2).

3. Cette double migration vers les contraintes TI et GT éloignera les soignants de la contrainte SP. En effet, une fois focalisée sur la tâche de recueil d'information, l'attention des soignants sera détournée du patient. Nous pouvons à nouveau faire référence au phénomène de tunnelisation attentionnelle (Wickens & Alexander 2009) déjà présentée lors de l'étape #2 du cas applicatif n°1. Cette situation confèrera alors à la contrainte SP une valeur répulsive. Tout le temps consacré au cheminement diagnostic réduira le contrôle et la surveillance accordés au patient (Figure 18.3).
4. Un contrôle inadéquat de la contrainte SP entrainera un rapprochement de cette contrainte vers l'intérieur. L'espace de liberté se verra alors réduit et les possibilités d'adaptation pour faire face à la situation seront limitées. Le risque que le point opératif franchisse l'une ou l'autre des contraintes augmentera (Figure 18.4).

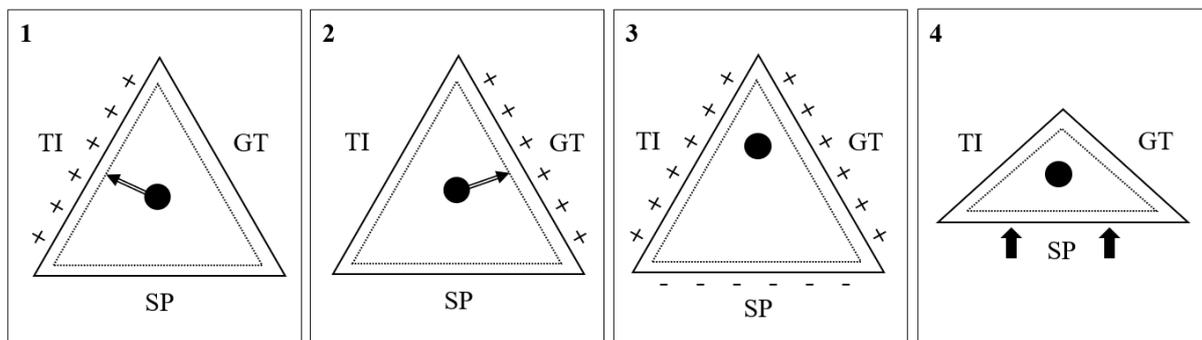


Figure 18 : Espace de travail et dynamique des contraintes lors d'un retard de réveil en anesthésie générale.

Cette figure modélise l'espace de travail propre à l'urgence médicale ainsi que la dynamique sous-jacente aux contraintes de soin au patient (SP), de traitement de l'information (TI) et de gestion des tâches (GT) durant un retard de réveil. Les valeurs attractives (+) de TI et GT et par conséquent les valeurs répulsives (-) de SP (figure 1 et 2), entraînent une migration du point opératif vers TI et GT et un rapprochement de la contrainte SP vers l'intérieur (figure 3) ainsi qu'une réduction de l'espace des possibles, augmentant ainsi le risque de franchir les limites (figure 4).

3. Étape 4 : Proposer, imaginer des solutions visant à éviter ces situations risquées

Sur la base de cette première modélisation, plusieurs pistes d'améliorations sont alors envisagées pour maintenir les exigences de sécurité - performance, et assurer le contrôle du système de travail propre à la situation étudiée :

- Rééquilibrer, limiter la migration du point opératif vers les contraintes TI et GT.

- Réorienter l'attention vers la contrainte SP pour s'assurer que certaines ressources attentionnelles soient allouées à la surveillance du patient et à l'évolution dynamique de son état physiologique.
- Limiter la réduction de l'espace de liberté en fournissant aux opérateurs des degrés de liberté suffisants et indispensables à la flexibilité et l'adaptation.

4. Étape 5 : Définir précisément le problème à résoudre

Le maintien de la sécurité et de la performance au sein de ce système repose alors sur la question d'un équilibre dans la gestion des 3 contraintes. En répartissant de manière équilibrée les actions au regard de chacune des contraintes, la migration vers TI et GT sera réduite, la valeur attractive de SP sera rééquilibrée, et l'espace de travail gardera une taille fonctionnelle suffisante pour permettre aux opérateurs de mettre en place des comportements adaptatifs.

Néanmoins, dans une situation où l'incapacité des soignants à produire un diagnostic rapide et précis peut avoir des conséquences dramatiques sur la santé et la vie du patient, la question de l'équilibre du système doit également être considérée au regard de la dimension temporelle et plus particulièrement au regard de la notion d'échéance. En effet, pendant la phase d'endormissement prolongé, les médecins disposent d'une courte fenêtre temporelle pour identifier la cause du retard de réveil et prendre une décision concernant la mise en place ou non de thérapeutiques spécifiques.

De plus, et comme nous l'avons précisé précédemment, les facteurs explicatifs potentiels du retard de réveil sont nombreux et dépendent du patient mais également des caractéristiques de l'anesthésie et de l'opération chirurgicale qui ont précédé (Saranagi 2008 ; Misal et al. 2016). L'ensemble des combinaisons est alors important et une exploration complète du champ des possibles en termes de causes potentielles nécessite du temps. D'autant plus lorsque la recherche d'information concerne 3 dimensions spatiotemporelles différentes : le présent (i.e. surveillance de l'état actuel du patient et de l'évolution dynamique des paramètres physiologiques) ; le passé (i.e. événements liés à la chirurgie et à l'anesthésie) ; et le futur (i.e. prédiction de l'évolution du patient et de la nécessité ou non de soins spécifiques).

Un conflit apparaît alors entre : (i) prendre le temps d'explorer l'ensemble des combinaisons afin de fournir un diagnostic précis basé sur une grande quantité d'information, mais prendre le risque de dépasser l'échéance et (ii) respecter l'échéance à tout prix, mais prendre le risque d'établir un diagnostic incomplet basé sur une quantité d'information limitée et potentiellement insuffisante. La gestion d'une telle situation peut être mise en relation avec le conflit *vitesse – précision* largement étudié en contrôle moteur dans les travaux de Paul Fitts (1954). La loi de Fitts stipule notamment que le temps nécessaire pour réaliser une tâche est dépendant de la quantité d'information à traiter (i.e. de la complexité de la tâche). Initialement réalisé lors de tâche de pointage entre deux cibles, les résultats indiquent que plus

la vitesse du geste augmente, plus la précision diminue. Dans notre cas, plus le diagnostic sera rapide (vitesse +), plus la probabilité qu'il soit erroné sera élevée (précision -) ; plus le diagnostic sera long (vitesse -), plus la probabilité qu'il soit précis sera élevée (précision +). Néanmoins, dans les deux cas le risque pour le patient sera important. Soit le diagnostic sera trop rapide et probablement erroné, les actions de soins ne seront donc pas adaptées. Soit le diagnostic sera précis mais proposé trop tardivement et la mise en place des thérapeutiques ne sera plus possible.

Ainsi, et afin de maintenir les exigences de sécurité et performance, la question que nous tentons d'aborder est la suivante : comment soutenir les soignants dans l'élaboration d'un diagnostic précis et rapide, tout en leur permettant d'être exhaustif et rigoureux dans la recherche d'informations.

6. Étape 6 : Reformuler le problème au regard d'une analyse approfondie de la littérature

Dans le domaine de la sécurité, l'anesthésie est considérée comme un système très sûr où les risques de défaillances sont faibles (Gaba 2000 ; Amalberti et al. 2005). Cependant, certaines particularités du domaine en font une spécialité particulièrement complexe. En effet, l'anesthésiste intervient à plusieurs stades du traitement à savoir la préparation préopératoire¹⁰, l'induction¹¹, l'entretien¹² et l'émergence¹³ (Xiao 1994). L'anesthésiste se doit d'être présent dans plusieurs salles d'opération en même temps (Thomassen 2012) et doit partager le même "objet" de travail (i.e. le patient) avec d'autres acteurs tels que les chirurgiens ou d'autres anesthésistes. Pour finir, son intervention dépend des actions des collègues, des événements antérieurs et de la pertinence des informations reçues (Cuvelier 2011). Ainsi, en plus d'une compréhension précise des événements passés, présents et futurs, autrement dit d'une pleine conscience de la situation (Endsley 1995), l'anesthésiste doit gérer un système hautement interactif composé du patient, des équipements cliniques, des chirurgiens, du personnel des salles d'opération et de l'environnement (Weinger 2002). Les exigences cognitives qui se portent sur l'anesthésiste sont alors importantes et le risque pour le patient n'est pas nul (Hajdukiewicz et al. 1998). Dans le cadre du retard de réveil, considéré comme l'un des plus grands challenges auquel un anesthésiste doit faire face (Misal et al. 2016), l'étape du diagnostic est primordiale. En effet, un traitement efficace ne peut commencer avant qu'un diagnostic précis ait été établi et le raisonnement diagnostic constitue un aspect essentiel de la performance clinique (Croskerry 2005). Assurer les

¹⁰ La préparation pré-opératoire permet à l'anesthésiste de recueillir des informations concernant les antécédents, les habitudes de vie du patient et les traitements en cours. Les informations recueillies permettent d'évaluer le risque et de proposer des stratégies anesthésiques adaptées.

¹¹ L'induction constitue l'étape d'injection des médicaments, soit par inhalation, soit par injection intraveineuse.

¹² La phase d'entretien a pour but de maintenir les effets de l'anesthésie durant la chirurgie et d'assurer le bon fonctionnement des fonctions vitales.

¹³ L'émergence représente la phase de réveil lorsque l'arrêt des médicaments de l'anesthésie permet au patient de retrouver un état de conscience normal.

exigences de sécurité et de performance nécessite alors de soutenir les soignants dans un tel processus afin d'éviter les erreurs de diagnostic.

D'un point de vue théorique, un premier moyen de réduire les erreurs est de comprendre quels sont les processus humains impliqués dans la prise de décision. Le modèle du double processus de raisonnement appliqué à la prise de décision médicale (Croskerry 2009a, 2009b) peut être utilisé pour expliquer le raisonnement médical. Dans cette théorie, l'auteur identifie deux classes de raisonnement cognitif nécessaires pour prendre une décision. Un système de raisonnement de type 1, qualifié d'intuitif et un système de raisonnement de type 2, qualifié d'analytique. Alors que le premier système est rapide, automatique, inconscient et conduit à la compréhension, le second système est lent, volontaire, conscient et conduit au raisonnement. L'auteur souligne que du fait du caractère « paresseux » du système cognitif, il y a une prévalence du système 1, ce dernier nécessitant moins d'énergie que le système 2. Selon les circonstances, l'un ou l'autre de ces systèmes peut être préférable et parfois un mélange des deux peut être optimal. Les deux étant soumis à l'erreur de manières différentes. Ce modèle, fournit des éléments pour aider les experts à comprendre les processus impliqués dans leur propre prise de décision et ainsi mettre en place des stratégies de dé-biaisement affectifs et cognitifs (Croskerry 2009b). Ceci nous amène à la seconde stratégie, celle qui consiste à analyser et à identifier les erreurs systématiques comme des biais cognitifs. De nombreuses taxonomies cognitives des erreurs médicales sont ainsi développées afin d'alerter les soignants et les sensibiliser à l'existence de ces biais cognitifs (Taib et al. 2011 ; Zhang et al. 2004). À titre d'exemple, le biais de confirmation décrit la tendance du soignant à se fixer sur les choses évidentes dès la présentation initiale du patient, trop tôt dans le processus diagnostique et à ne pas ajuster cette impression initiale à la lumière des informations ultérieures. Pour finir, une troisième stratégie, et celle que nous proposons dans ce travail, pourrait être présentée de la façon suivante : une façon d'éviter les erreurs est de s'en éloigner. Cela sous-entend deux notions importantes, celle de *distance* entre l'individu et l'erreur et celle de *mouvement* par lequel cette distance va être modifiée. Cette idée fait évidemment référence aux travaux de J. Rasmussen et au modèle dynamique de sûreté (1997) que nous utilisons pour modéliser les comportements comme des trajectoires au sein d'un espace de travail délimité par des contraintes. Lorsque le point opératif du système est éloigné des limites, le système est stable. Plus le point opératif migre vers une limite, plus le risque d'erreur est élevé. Ce modèle conceptuel offre la possibilité d'entrevoir l'erreur et la défaillance comme le résultat d'interactions complexes entre de multiples événements, opérateurs, et pressions, qui conduisent à la migration du système vers des situations à risque vulnérables aux erreurs. Dans ce contexte, il ne s'agit plus uniquement de minimiser les erreurs en protégeant le système des faiblesses cognitives de l'opérateur et en le sensibilisant à ses propres limites (i.e. erreur dans la sélection du système de raisonnement, biais cognitifs, tunnelisation attentionnelle...), mais bien de lui permettre de contrôler cette migration inévitable vers le risque.

D'un point de vue pratique, il est largement recommandé d'utiliser des aides cognitives et notamment des check-lists pour tenter de réduire les erreurs et assurer la sécurité du patient (Kohn et al. 2000 ; Ely et al. 2011 ; Böhmer et al. 2012 ; Patel et al. 2014). Certaines études ont en effet montré l'importance de la check-list pour améliorer la communication, le travail d'équipe et la conscience de la situation (Bion et al. 2010 ; Lingard 2008 ; Walker et al. 2012), pour réduire la morbidité (Haynes et al. 2009 ; van Klei et al. 2012), les complications chirurgicales (Weiser et al. 2010 ; De Vries 2010) ou encore l'incertitude concernant le site de la chirurgie (Makary et al. 2007). En général, les objectifs des check-lists sont basés sur la prévention des erreurs en situation de stress ou de fatigue et sur le rappel de la mémoire. En réduisant la variabilité, en diminuant l'incertitude, la check-list contribue à améliorer la performance. Cependant, nous pouvons considérer ces check-lists comme faisant partie de ce que Woods et ses collègues appellent la "première histoire" de l'erreur humaine, où l'objectif est d'identifier les déviations des procédures causées par des erreurs humaines (Woods et al. 2010). Dans cette approche, et comme c'est le cas pour les stratégies de dé-biaisements évoquées précédemment, la gestion des risques repose sur des tentatives de protéger le système des faiblesses humaines et les check-lists sont conçues comme une barrière statique en profondeur pour éviter les erreurs. Mais cette vision classique a montré certaines limites. En effet, des études montrent que les check-lists peuvent également souffrir d'une mauvaise conception en termes de contenu, de structure et de présentation (Winters et al. 2009). Elles peuvent représenter une limitation au jugement clinique et à la prise de décision (Hales & Pronovost 2006) ou être sources de risques, surtout lorsque les opérateurs réduisent leur propre contrôle de sécurité parce qu'ils considèrent qu'un outil s'en charge à leur place (Rydenfält et al. 2014). Pour finir, les check-lists peuvent produire des « effets secondaires » sur l'état général de la sécurité du système lorsque le degré d'adaptation de l'outil à son contexte organisationnel n'est pas suffisant (Walker et al. 2012).

Dans un contexte médical complexe et dynamique où le contrôle nécessite des comportements adaptatifs constants, l'erreur est acceptée et considérée comme un processus dynamique qui peut se produire à la suite d'une migration progressive vers des zones à risques. Ces check-lists statiques, destinées à éviter les biais cognitifs et conçues dans le but de réduire les degrés de liberté des opérateurs pour améliorer la performance, ne sont donc pas adaptées. L'enjeu n'est plus d'identifier la cause profonde mais de donner aux soignants les moyens de créer de la sécurité en régulant les migrations vers les situations risquées. Ainsi, le modèle DSM semble a priori pertinent pour analyser, comprendre ces processus et aider à concevoir des outils permettant leur contrôle.

La première modélisation basée sur le modèle DSM (# étape 1) nous a permis d'inférer ces migrations, de modéliser la dynamique du système de travail et la façon dont la trajectoire d'un opérateur peut être influencée par les pressions issues des contraintes. Sur la base de cette modélisation et du modèle DSM, l'objectif est maintenant de concevoir une check-list adaptée aux caractéristiques de ce domaine et permettant de réguler les événements anesthésiques indésirables. À notre connaissance, il s'agit de la première tentative de conception d'une check-list propre au retard de réveil. En effet, les check-lists en

anesthésie sont principalement utilisées pour contrôler les équipements médicaux (Barthram & McClymont 1992) ou pour réduire les dommages résultant de l'oubli, de la négligence ou de certaines distractions telles qu'une mauvaise injection médicamenteuse (Jenkins 2014).

6. Étape 7 : Proposer et concevoir une solution innovante

L'objectif est donc ici de développer une check-list dynamique destinée à soutenir les anesthésistes dans la prise en charge du retard de réveil. Nous supposons qu'en concevant une check-list basée sur les contraintes du domaine de travail qui participe au contrôle des processus de migration identifiés, nous fournirons aux soignants les moyens de réguler ces processus inévitables pouvant conduire à des situations à risques.

La première étape de définition des contraintes de l'espace de travail valables pour toute situation d'urgence médicale nous a permis de définir trois contraintes qui délimitent l'espace de travail des anesthésistes faisant face à un retard de réveil : la contrainte de soin au patient (SP), la contrainte de gestion des tâches (GT), la contrainte de traitement de l'information (TI). Sur la base de cette première étape de modélisation nous avons proposé trois solutions visant à éviter les situations à risques caractéristiques du retard de réveil : (i) limiter la migration du point opératif vers les marges TI et GT ; (ii) réorienter l'attention vers la contrainte SP pour s'assurer que certaines ressources attentionnelles soient allouées à la surveillance du patient et l'évolution de son état physiologique et (iii) limiter la réduction de l'espace de liberté en fournissant aux opérateurs des degrés de liberté suffisants et indispensables à la flexibilité et l'adaptation. Chacun de ces objectifs sera explicité au regard des exigences de la pratique et des particularités de la situation du retard de réveil. Pour chaque objectif, autrement dit chaque besoin en termes de contrôle des contraintes, nous proposerons des solutions techniques de conception.

Rappelons que notre démarche de conception s'inscrit dans la logique des systèmes complexes où l'on considère l'organisation des soins de santé comme un système dynamique, adaptatif, dont le tout n'est pas égal à la somme des parties. Les comportements d'un tel système émergent des interactions entre les différents composants. La théorie du chaos et de la complexité suggère d'ailleurs que « une grande partie du monde n'est pas linéaire et de petits changements peuvent produire des transformations spectaculaires dans tout un système » (Griffiths & Byrne 1998). Il est alors indispensable de considérer que l'introduction d'un nouvel élément au sein du système, tel que la check-list, entraînera des adaptations modifiant l'équilibre interne de ce dernier. Autrement dit, l'introduction de la check-list dans le système modifiera l'équilibre de base du système. Notre défi consiste également à anticiper l'impact de la check-list sur le système. Sur la base du modèle DSM nous spécifierons maintenant les fonctionnalités de notre check-list.

a) La check-list : un nouveau point d'équilibre au sein de DSM

Au regard de nos objectifs de conception, la checklist se veut limiter la migration vers les contraintes organisationnelles et refocaliser l'attention sur la contrainte de soin propre au domaine dans le but de rééquilibrer le système. En termes de modélisation au sein de l'espace défini par DSM, nous pensons que le point d'équilibre du système se situe au niveau du centre de gravité du triangle. L'implémentation de la check-list doit alors permettre au point opératif d'occuper cette position centrale d'équilibre. Néanmoins, nous savons que les pressions constantes issues des contraintes modifient constamment la forme, la taille de l'espace de travail et par conséquent modifient la position de ce point d'équilibre. Maintenir cette position centrale nécessite alors de geler les mouvements des contraintes susceptibles de modifier la position du point d'équilibre. Cette stratégie de conception s'inspire des travaux de Bernstein et de la question du contrôle des degrés de liberté au sein du système moteur (1967). En effet, face à un nombre trop important de degrés de liberté, une solution pour assurer le contrôle est d'en "geler" un certain nombre. Cette stratégie permet de réduire les DDL pour n'en conserver qu'un nombre réduit et contrôlable. Ainsi, l'opérateur peut alors plus facilement apporter une réponse au problème (Delignières 2004). Dans notre cas, la check-list est imaginée pour « geler » les degrés de libertés initialement disponibles pour le contrôle des contraintes TI et GT. Les degrés de libertés nécessaires pour contrôler la contrainte SP sont quant à eux conservés. Les mouvements du point opératif ne pouvant s'effectuer qu'au regard de la contrainte SP, nous supposons qu'une telle stratégie permettra aux soignants d'être plus efficaces dans l'élaboration du diagnostic et l'identification des causes expliquant le retard de réveil.

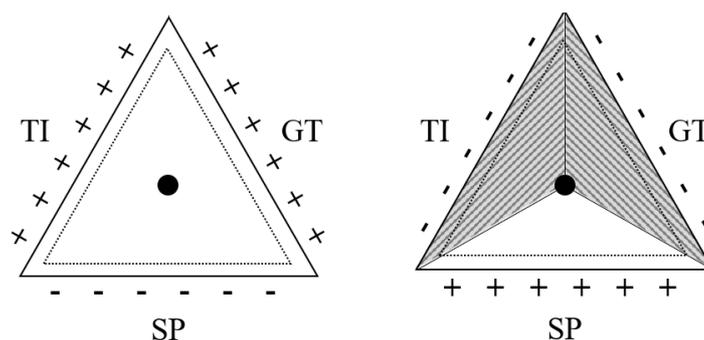


Figure 19 : Modélisation de l'impact souhaité de la check-list sur l'équilibre du système.

À gauche : le système sans check-list. À droite, l'espace de liberté avec check-list. En « gelant » le contrôle des contraintes TI et GT (zones grisées), les soignants disposent de plus de temps pour résoudre le problème qui relève du contrôle de SP (zone blanche).

Ces hypothèses de conception, peuvent être modélisées sur la base du modèle DSM. La figure 19 représente le système tel qu'il a été modélisé initialement et le système tel qu'il sera suite à l'implémentation de la check-list. En fournissant aux soignants un outil qui structure et priorise les informations nécessaires au diagnostic, et en proposant un outil simple d'utilisation et intuitif, les

contraintes TI et GT seront en grande partie contrôlées par l'assistance (Figure 19 – zone grisées). Les pressions provenant de ces contraintes seront alors réduites maintenant le point d'équilibre du système au centre du triangle. Les soignants disposeront alors d'une zone d'exploration destinée au contrôle du patient et à l'élaboration du diagnostic (Figure 19 - zone blanche).

Sur la base des exigences liées à la pratique (Tableau 6), et de la modélisation précédente, plusieurs choix de conception ont été réalisés. Nous les résumons ici :

1. Au regard des contraintes TI et GT : La check-list doit être basée sur un dispositif stockant de nombreuses variables, permettant l'exhaustivité, avec un affichage facile à partager entre les coéquipiers. Elle doit être utilisable en parallèle d'autres systèmes d'information, comme le dossier médical du patient. Ces exigences ont conduit à la mise en œuvre de la check-list sur une tablette numérique.
2. Au regard de la contrainte SP : Afin de redistribuer l'attention sur le patient, les signes vitaux du patient doivent être évalués. L'objectif étant de vérifier l'état actuel du patient afin de percevoir rapidement les anomalies potentielles concernant ses fonctions vitales. Ces besoins ont conduit à faire, de la première page de la check-list, une page dédiée à l'évaluation des paramètres physiologiques du patient.
3. Concernant la taille de l'espace de liberté et le conflit vitesse-précision : La check-list doit proposer un accès rapide aux informations nécessaires pour le diagnostic (TI), une utilisation facile et intuitive (GT). En structurant et priorisant les informations, en proposant une assistance simple d'utilisation, l'idée est de soulager la pression temporelle et « donner du temps » aux soignants de résoudre le problème et d'élaborer un diagnostic efficace et efficient (SP).

Tableau 6 : Présentation des objectifs visés par la check-list, des exigences de l'activité que cette dernière doit respecter, des propositions techniques envisagées pour répondre aux besoins.

Objectifs	Exigences liées au domaine	Propositions techniques	Mise en garde
Limiter la migration du point opératif vers la contrainte TI	Les soignants doivent accéder à un maximum d'information en un minimum de temps.	Identifier quelles sont les informations nécessaires au diagnostic et faciliter leur accès.	L'utilisation de la check-list ne doit pas nécessiter des ressources supplémentaires. La check-list doit être structurée, claire, présentée sur un support accessible.
	Ces informations peuvent provenir d'acteurs et de services différents.	Faciliter le partage des informations entre les différents acteurs.	
	Ces informations concernent le passé (i.e. anesthésie et chirurgie), le présent (i.e. état physiologique du patient), le futur (i.e. anticipation)	Faciliter l'accès aux informations relatives au dossier patient, à l'anesthésie, à la chirurgie.	

	concernant l'évolution du patient).	Faciliter la communication entre les soignants impliqués dans la prise en charge.	
Limiter la migration vers la contrainte GT	Les soignants peuvent demander des examens supplémentaires si nécessaire (IRM, scanner). Ces examens doivent être programmés, planifiés...	Faciliter le partage des informations entre les différents acteurs. Faciliter la communication entre les différents services.	L'utilisation de la check-list ne doit pas demander des ressources supplémentaires. Son utilisation, sa manipulation doivent être faciles.
Rééquilibrer l'attention sur la contrainte SP	Les soignants doivent surveiller l'évolution dynamique des paramètres physiologiques du patient. Le maintien de la gestion des voies aériennes supérieures, de la respiration et la circulation est primordial.	Orienter l'attention vers le patient. Permettre le recueil des données relatives au patient et un suivi dynamique.	Le type de support de la check-list ne doit pas interférer avec la manipulation d'autres outils (e.g. stéthoscope, insufflateur manuel, respirateur, dossier patient...)
Offrir aux opérateurs un espace de liberté suffisant pour l'adaptation	Les soignants doivent trouver un équilibre entre vitesse et précision pour pouvoir élaborer un diagnostic précis et rapide.	Limiter la perte de temps relative au recueil d'information pour offrir du temps au diagnostic. Limiter la check-list à un nombre de variables suffisantes et nécessaires tout en permettant l'exhaustivité. Proposer un mode de vérification rapide.	L'utilisation de la check-list ne doit pas consommer des ressources temporelles précieuses.

b) Les étapes de conception de la check-list

i. Identification des variables nécessaires au diagnostic

La check-list se veut soutenir le soignant dans l'élaboration d'un cheminement diagnostique. Comme indiqué précédemment, l'anesthésiste doit, lorsqu'il prend en charge un retard de réveil, prendre en considération des facteurs multiples concernant le patient, l'anesthésie et la chirurgie. Autrement dit, l'anesthésiste doit recueillir des informations concernant l'ensemble du parcours patient. L'objectif étant de détecter, dans la trajectoire du patient, des éléments pouvant expliquer son état actuel et anticiper son évolution clinique.

La figure 20 illustre les étapes du parcours patient dans un contexte de chirurgie générale. Trois grandes phases sont alors identifiées : la phase pré-opératoire, la phase per-opératoire, la phase post-opératoire. Chacune de ces phases étant respectivement composée de points d'étapes critiques tels que : (i) la

consultation préanesthésique et l'examen préopératoire, (ii) l'induction des drogues anesthésiques et l'intervention chirurgicale, (iii) le réveil immédiat, le réveil intermédiaire et le réveil à long termes.

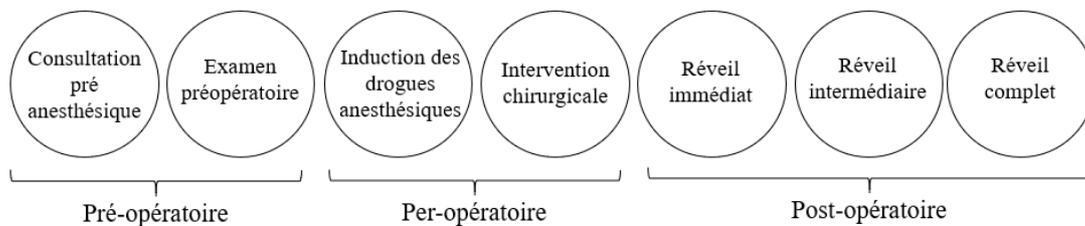


Figure 20 : Étapes principales du parcours patient lors d'une prise en charge chirurgicale.

L'anesthésiste doit recueillir des informations concernant les phases pré et per opératoires lui permettant de comprendre l'absence de réveil immédiat et d'anticiper les autres phases du réveil.

Pour chacune de ces étapes, une liste de variables critiques sont identifiées avec l'aide d'un médecin anesthésiste réanimateur expérimenté. Ces variables sont considérées comme les variables nécessaires au diagnostic. Au total, 57 variables ont été identifiées.

ii. Prioriser les variables pour un traitement rapide et efficient

Afin de faire face à la pression temporelle, l'accès aux éléments de la check-list doit être structuré et priorisé. Nous avons fait le choix de classer chaque variable précédemment identifiée en fonction de son degré de criticité. Cela permet au point opératif d'occuper la position centrale d'équilibre et de pouvoir anticiper la migration vers la zone de risque. Ainsi, les causes graves, autrement dit celles qui nécessitent la mise en place de thérapeutiques lourdes (i.e. qui nécessitent du temps), seraient les premières contrôlées. Les causes graves seraient suivies des causes modérées puis des causes plus rares.

Du point de vue de l'expert, cette classification est structurée de sorte à : 1. Éliminer rapidement les causes graves à savoir l'accident vasculaire cérébrale (AVC), l'œdème cérébral, l'état de mal épileptique, l'encéphalopathie ; 2. Éliminer les surdosages relatifs ou absolus en anesthésiants ; 3. Chercher des causes plus rares et/ou très contextuelles.

Le tableau 7 illustre l'ensemble des variables classées selon les deux dimensions sélectionnées, à savoir le degré de criticité de la variable et l'étape du parcours patient à laquelle elle est associée. Les 13 dernières variables, appartenant à la phase post-opératoire et plus précisément à l'étape du réveil immédiat, représentent les variables nécessaires à la vérification des fonctions vitales et à l'examen clinique initial. Chacune de ces variables pouvant prendre 3 valeurs : « normale », « anormale » ou « inconnue ».

Tableau 7 : Liste des variables classées selon le degré de criticité et l'étape du parcours patient.

Variables	Catégorisation	Étape du parcours patient
Traumatisme crânien préopératoire récent – Chute - Contexte d'AVP	Criticité 1 : Œdème cérébral	Pré-opératoire
Antécédent d'AVC	Criticité 1 : AVC	Pré-opératoire
Terrain polyvasculaire	Criticité 1 : AVC	Pré-opératoire
Diabète	Criticité 1 : AVC	Pré-opératoire
Tumeur cérébrale ou néoplasie à risque de métastase cérébrale (colique)	Criticité 1 : Œdème cérébral	Pré-opératoire
Patient sous anticoagulation préventive ou curative	Criticité 1 : Œdème cérébral	Pré-opératoire
Alcoolisme chronique ou aigu	Criticité 1 : Œdème cérébral	Pré-opératoire
Sténose carotidienne	Criticité 1 : AVC	Pré-opératoire
Cardiopathie emboligène (ACFA, flutter)	Criticité 1 : AVC	Pré-opératoire
Hyponatrémie pré-opératoire	Criticité 1 : Œdème cérébral	Pré-opératoire
Épilepsie ou Comitialité	Criticité 1 : Épilepsie	Pré-opératoire
Rupture thérapeutique du traitement antiépileptique	Criticité 1 : Épilepsie	Pré-opératoire
Chirurgie céphalique / rotation cervicale (ORL)	Criticité 1 : AVC	Per-opératoire
Chirurgie en position semi-assise	Criticité 1 : AVC	Per-opératoire
Épisodes d'hypotension prolongée ou à-coups hypertensifs	Criticité 1 : AVC	Per-opératoire
Embolie gazeuse, ciment ou graisseuse (fémur)	Criticité 1 : AVC	Per-opératoire
État de choc per-opératoire	Criticité 1 : AVC	Per-opératoire
Utilisation de soluté hypotonique / irrigation chirurgicale / bilan entrée / sorties incorrect	Criticité 1 : Œdème cérébral	Per-opératoire
Hypoxémie sévère per-opératoire	Criticité 1 : AVC	Per-opératoire
Perfusion de soluté hypotonique chez l'enfant sans contrôle du débit de perfusion	Criticité 1 : Œdème cérébral	Per-opératoire
Sepsis sévère	Criticité 1 : Encéphalopathie	Per-opératoire
Chirurgie longue > 4h	Criticité 1 : AVC	Per-opératoire
Toxicomanie	Criticité 2 : Potentialisation des drogues anesthésiques	Pré-opératoire
Insuffisance rénale chronique ou aigue	Criticité 2 : Retard élimination drogues	Pré-opératoire
Insuffisance hépatocellulaire	Criticité 2 : Retard élimination drogues	Pré-opératoire
Prise de neuroleptiques/psychotropes au long cours	Criticité 2 : Potentialisation des drogues anesthésiques	Pré-opératoire
BPCO / SAOS / insuffisance respiratoire	Criticité 2	Pré-opératoire
Obésité	Criticité 2 : Retard élimination drogues	Pré-opératoire
ALR pré ou per-opératoire	Criticité 2 : Surdosage en anesthésiques locaux	Per-opératoire
Absence de rinçage de perfusion en fin d'intervention	Criticité 2 : Surdosage résiduel	Per-opératoire

Prémédication massue (pré-anesthésie, SAMU)	Criticité 2	Per-opérateur
Utilisation de neuroleptiques	Criticité 2	Per-opérateur
Utilisation de sérotoninergiques	Criticité 2 : Syndrome sérotoninergique	Per-opérateur
Utilisations d'anticholinergiques / Atropine	Criticité 2 : Syndrome anticholinergique	Per-opérateur
Utilisation de clonidine en IV ou en ALR	Criticité 3 : Causes plus larges	Per-opérateur
Syndrome parkinsonien avec rupture de traitement	Criticité 3 : Causes plus larges	Pré-opérateur
Femme enceinte (éclampsie)	Criticité 3 : Causes plus larges	Pré-opérateur
Brûlure, incendie (monoxyde de carbone)	Criticité 3 : Causes plus larges	Pré-opérateur
Dysthyroïdie mal équilibrée (coma myxœdémateux)	Criticité 3 : Causes plus larges	Pré-opérateur
Myasthénie	Criticité 3 : Causes plus larges	Pré-opérateur
Enfant (hyponatrémie)	Criticité 3 : Causes plus larges	Pré-opérateur
Patient porteur d'une valve de DVE / DVP	Criticité 3 : Causes plus larges	Pré-opérateur
Rechercher une erreur d'injection médicamenteuse (relais d'équipe, fin de garde)	Criticité 3 : Causes plus larges	Per-opérateur
Décurarisation prolongée inexplicée (déficit en butyrylcholinestérases)	Criticité 3 : Causes plus larges	Per-opérateur
Pression artérielle	Examen Patient	Post-opérateur
SpO2	Examen Patient	Post-opérateur
Température	Examen Patient	Post-opérateur
Capnie	Examen Patient	Post-opérateur
Décurarisation	Examen Patient	Post-opérateur
Glycémie	Examen Patient	Post-opérateur
HemoCue	Examen Patient	Post-opérateur
Agitation patient	Examen Patient	Post-opérateur
Cyanose	Examen Patient	Post-opérateur
Sueur	Examen Patient	Post-opérateur
Pupilles	Examen Patient	Post-opérateur
Tonus musculaire	Examen Patient	Post-opérateur

AVP : Accident Voie Publique ; AVC : Accident Vasculaire Cérébral ; AFCA : Arythmie Complète par Fibrillation Auriculaire ; BPCO : Bronchopneumopathie Chronique Obstructive ; SAOS : Syndrome d'Apnée Obstructive du Sommeil ; ALR : Anesthésie Loco-Régionale ; IV : Intraveineuse ; DVP : Dérivation Ventriculo-Péritonéale ; DVE : Dérivation Ventriculaire Externe.

iii. Création de la check-list numérique

• Le modèle conceptuel

Concernant les interactions avec l'outil, seules les opérations de sélection d'un item par appui sur l'écran tactile sont possibles. Elles permettent de donner à chaque variable une valeur « normale », « anormale », ou « inconnue ». Les actions de toucher l'écran permettent également le passage aux pages suivantes.

La valeur « normale » de chaque variable est définie par défaut. Si toutes les variables contrôlées sont normales, aucune action n'est requise. En termes de feedback, la valeur sélectionnée apparaît en bleue. Une fois que les variables d'une même famille de causes ont été remplies, un bilan est accessible via un clic bouton « Voir bilan ». Les variables caractérisées anormales apparaissent alors en rouge, les variables jugées inconnues sont présentées en gris.

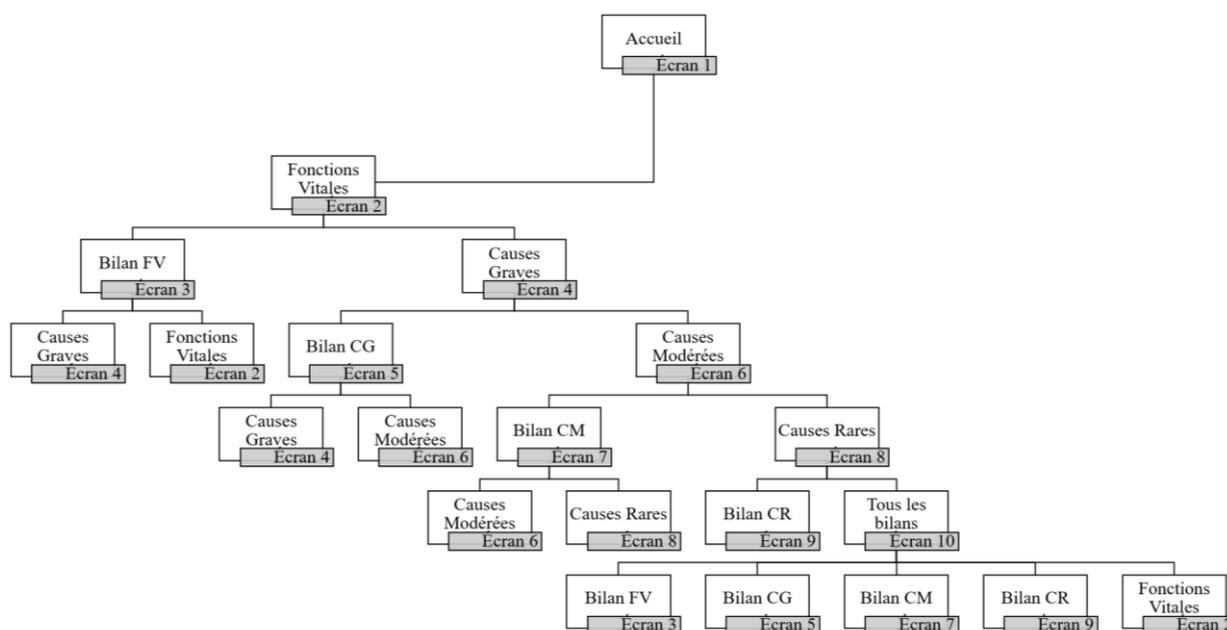


Figure 21 : Arborescence des écrans constituant l'application.

Concernant le découpage des zones, chaque page se compose d'un titre en haut de page correspondant à un des 3 niveaux de criticités proposés (i.e. causes graves, causes modérées, causes rares) ; de la liste des variables à contrôler au centre de l'écran, chacune pouvant être caractérisée comme normale, anormale, ou inconnue ; d'un ensemble de boutons en bas de page permettant le passage à la page suivante et l'accès au bilan une fois la liste de variable complétée. Un total de 10 écrans constitue l'application. L'arborescence des écrans est représentée dans la figure 21 ci-dessus.

- La maquette

Le logiciel de maquettage Proto.io (PROTOIO Inc.) a été utilisé pour réaliser la maquette. Ce logiciel disponible en ligne permet la création de prototypes pour mobile et tablette. Les images ci-dessous fournissent des imprimés écrans du maquettage (Figure 22).

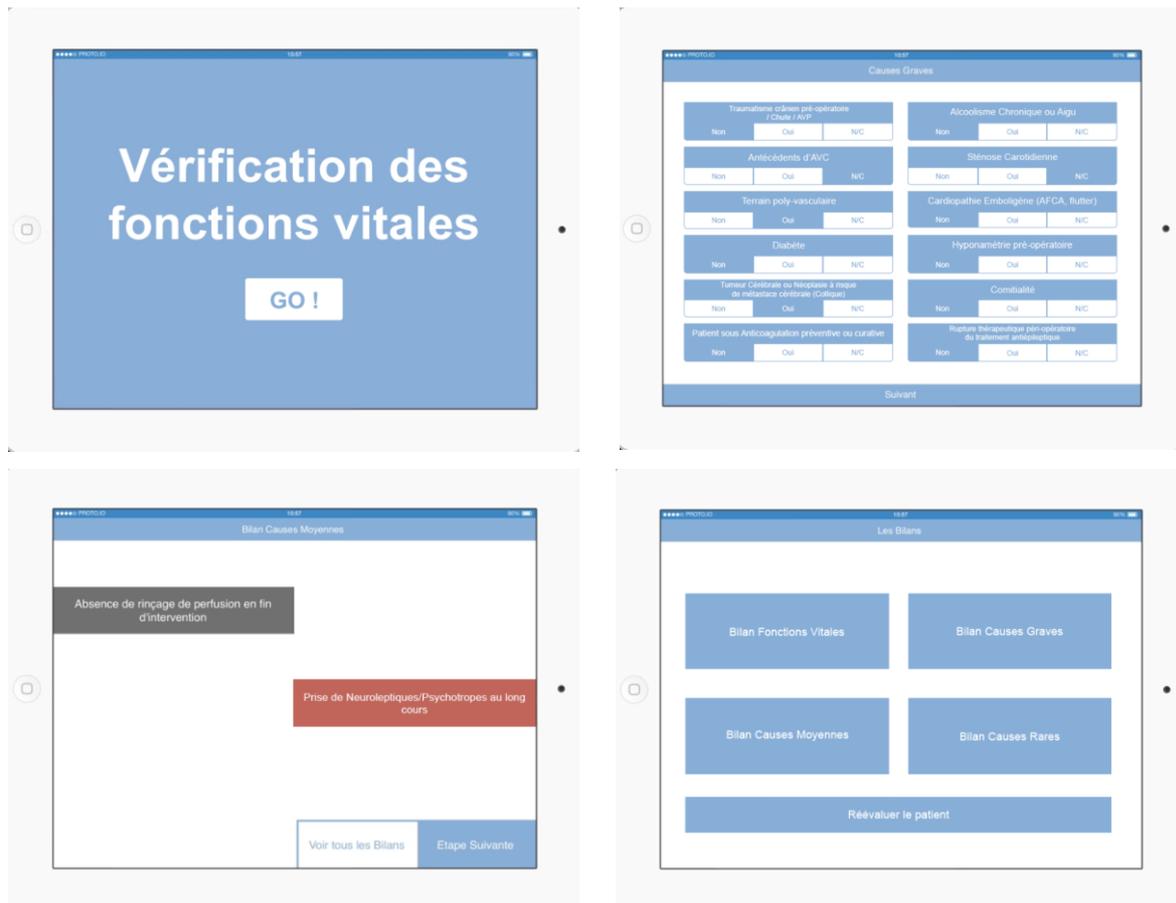


Figure 22 : Présentation des écrans constituant l'application.

7. Étapes 8 : Sur la base d'une démarche expérimentale, tester, quantifier l'apport de cette assistance en contexte de simulation

a) Méthode

i. Les participants

Au total 8 praticiens (6 femmes et 2 hommes) ont participé à cette étude. Le recrutement s'est effectué par mail sur la base du volontariat. Les participants recevaient 50€ en échange de leur participation qui s'est étalée sur un après-midi. Les praticiens étaient répartis en 4 équipes de 2. Chaque binôme était constitué d'un Médecin Anesthésiste Réanimateur (MAR) et d'un Infirmier Anesthésiste (IADE) travaillant habituellement ensemble. Tous étaient employés du Groupe Hospitalier Bretagne Sud

(GHBS). Leur niveau d'expérience en anesthésie variait entre 3,5 et 23 ans (Moy=11,2, SD=6). Tous les participants étaient invités à signer un formulaire de consentement nous permettant d'utiliser leurs images et les enregistrements vidéo dans le cadre de l'étude.

ii. Le contexte

L'étude s'est déroulée au Centre de Simulation du Scorff (C3S) au GHBS de Lorient (Figure 23). Ce centre dispose d'une grande salle semblable à une chambre hospitalière équipée d'un mannequin haute-fidélité (SimMan ALS, Laerdal International) capable de simuler des bruits pulmonaires, une cyanose, et offrant des abords vasculaires intra-veineux et intra-osseux. La pièce était également équipée des dispositifs médicaux classiques tel qu'un moniteur permettant la surveillance des paramètres vitaux, un respirateur, un chariot d'urgence, un échographe, un téléphone d'urgence, un téléviseur permettant l'affichage des imageries médicales (e.g. IRM, scanner...). Afin de simuler le bruit constant présent en salle de réveil, un enregistrement audio était diffusé en fond sonore tout au long de la simulation. Ces sons provenaient d'un enregistrement réalisé au sein de la salle de réveil « réelle » et comprenaient essentiellement des bips de machines, des voix, des bruits émis par les patients ou les soignants présents.



Figure 23 : Illustration d'une situation simulant un retard de réveil en salle de réveil.

MAR (en charge de la tablette) et IADE (en charge du dossier patient) élaborent ensemble le diagnostic.

iii. Le protocole expérimental

Chaque équipe testait, de façon consécutive, deux conditions. Chacune étant filmée et enregistrée sous un format vidéo analysé a posteriori. La première (C1) était une condition de contrôle dans laquelle les équipes devaient élaborer le diagnostic expliquant le retard de réveil sans check-list. La seconde (C2) était une condition expérimentale dans laquelle les soignants manipulaient la check-list lors du

cheminement diagnostic. La deuxième condition expérimentale était précédée d'une phase de prise en main permettant aux soignants de naviguer dans la tablette et de découvrir ses fonctionnalités.

Quelle que soit la condition, les soignants disposaient de ressources informationnelles multiples. Des ressources téléphoniques permettant d'appeler la famille pour obtenir des détails concernant des antécédents ou un traitement, et des ressources documentaires tels que le dossier d'anesthésie, les rapports de consultations préopératoires et les feuilles per-opératoire, une fiche de prise en charge initiale, les comptes rendus d'examens médicaux (biologie, scanner...).

Deux scénarios cliniques étaient présentés. Tous deux étaient conçus par un médecin anesthésiste réanimateur (MAR) largement impliqué dans la simulation et validés par un formateur expérimenté en formations médicales et paramédicales et également infirmier anesthésiste. Les deux scénarios étaient prévus pour avoir des niveaux de difficulté identiques. Le premier scénario était présenté aux soignants de la façon suivante : « Il est 8 heures du matin, vous prenez en charge, sur un relais de garde, un jeune homme de 17 ans opéré en urgence en fin de nuit d'une fracture du fémur gauche dans les suites d'un accident de scooter non casqué (sortie de boîte de nuit). Le patient est en salle de réveil post-interventionnelle depuis 30 minutes, la sédation a été levée en fin d'intervention avant le transfert. En écoutant les transmissions poussives de l'équipe qui vient de passer une nuit blanche, vous remarquez que le patient ne présente pas de signes de réveil et qu'il se laisse ventiler sans déclencher de cycle ». Le second scénario était présenté aux équipes de la façon suivante : « Jeanne-Marguerite, 85 ans, a été opérée en urgence en fin de nuit d'une occlusion et d'une perforation digestive, mode de révélation d'un probable cancer colique très évolué. Le tableau évolue depuis 3-4 jours avec diarrhées à l'EHPAD, initialement mis sur le compte d'une gastro-entérite devant un contexte d'épidémie locale. Elle arrive aux urgences sur un brancard mais est vite adressée au déchocage devant des signes de sepsis sévère. À l'arrivée au bloc, l'intervention se passe relativement correctement. Vous prenez le relais de l'équipe de garde à 8h du matin, la patiente est transférée en salle de surveillance post-interventionnelle depuis 30 minutes. En écoutant les transmissions poussives de l'équipe qui vient de passer une nuit blanche, vous remarquez que la patiente ne présente pas de signes de réveil et qu'elle se laisse ventiler sans déclencher de cycle ».

Les scénarios étaient contrebalancés entre les équipes et la tablette était une fois utilisée par le MAR, une fois par l'IADE. Le tableau 8 présente cette répartition.

Tableau 8 : Répartition des scénarios et des conditions en fonction des équipes.

Conditions	Équipe 1	Équipe 2	Équipe 3	Équipe 4
Sans Tablette	Scénario 1	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 2
Avec Tablette	Scénario 2 (MAR Tablette)	Scénario 2 (IADE Tablette)	Scénario 1 (MAR Tablette)	Scénario 1 (IADE Tablette)

Après chaque séance, les participants remplissaient des questionnaires complémentaires et évaluaient subjectivement les fonctionnalités de la check-list proposée.

iv. Les mesures

Les mesures concernaient l'évaluation de l'apport de la tablette au regard de chacune des contraintes initialement identifiées (#étape1). Pour chaque contrainte SP, TI et GT, un indicateur de mesure été utilisé.

Au regard de la contrainte SP : Sous forme d'un questionnaire, cinq facteurs potentiels pouvant expliquer le retard de réveil étaient présentés aux soignants lors du debriefing. Sur la base de l'expertise du médecin anesthésiste impliqué dans cette étude, étaient présentées comme causes potentielles : l'état de choc peropératoire, le diabète, le traumatisme crânien, l'alcoolisme chronique et l'obésité. Pour chaque item, les soignants devaient estimer si, oui ou non, la cause proposée pouvait expliquer la situation. Leur niveau de certitude quant à cette affirmation était recueilli via une échelle allant de 0% à 100%. Le 0% signifiait que le soignant était sûr que le facteur en question n'était pas impliqué dans le retard de réveil. Le 100% indiquait que le soignant estimait que le facteur était une cause sous-jacente au retard de réveil. L'indice de corrélation de Rho de Spearman a permis de mesurer le degré d'accord entre les réponses des coéquipiers d'un même binôme. L'indice d'entropie H de Shannon a également été utilisé pour mesurer le degré de certitude dans le diagnostic de chaque soignant sur la base de la répartition des scores attribués à chacune des causes. Plus l'indice H est élevé, moins le participant est certain de la cause sous-jacente. Plus l'indice H est faible, plus le participant est certain du facteur expliquant le retard de réveil.

Au regard de la contrainte TI : Les enregistrements vidéo ont été utilisés pour évaluer la contrainte de traitement de l'information. Le visionnage des vidéos permettait de coder le nombre de consultations par minute des dossiers d'anesthésie et de la check-list numérique. Une consultation était codée dès lors que le participant regardait le dossier ou la check-list plus d'une seconde, et lorsque le coup d'œil survenait au moins une seconde après le précédent. Le codage d'une vidéo choisie de manière aléatoire, correspondant à une prise en charge avec la check-list, réalisé par deux codeurs différents, a montré un niveau élevé de fiabilité inter-juges (Rho=0,93, p<0,01).

Au regard de la contrainte GT : La facilité d'utilisation de la tablette a servi d'indicateur pour évaluer l'apport de la check-list au regard de la contrainte de gestion des tâches. L'utilisabilité de la tablette a été mesurée via l'échelle « System Usability Scale (SUS) » lors des debriefing (Brooke 1996). Ce questionnaire propose une succession d'items que les participants doivent quantifier sur une échelle de 10 points allant de "Tout à fait d'accord" (5 points) à "Tout à fait en désaccord" (0 point). Les items sont par exemple : « Je pense que j'aimerais utiliser cet appareil fréquemment », « J'ai trouvé l'appareil inutilement complexe », « Je suppose que la plupart des soignants apprennent à utiliser cette tablette »

rapidement ». En raison de la petite taille de l'échantillon, des statistiques non paramétriques ont été utilisées.

b) Résultats

Le tableau 9 montre l'ensemble des résultats concernant chacune des variables mesurées en fonction des conditions.

Tableau 9 : Synthèse des résultats.

Variables	Sans la check-list	Avec la checklist
Soins au patient : - Cohérence du diagnostic : Corrélation entre les IADE et MAR d'un même binôme - Niveau de certitude : différence entre les MAR et les IADE (indice d'entropie)	Rho=0.61 ; p<0.01** W=0.0; p<0.03*	Rho=0.78 ; p<0.001** W=3.0 ; p=0.20
Traitement de l'information : - Nombre de consultations par minute des dossiers d'anesthésie et de la check-list numérique	Moyenne : 1.01 fois par minute (SD=0.28) (des traitements longs et discrets)	Moyenne : 1.87 fois par minute (SD=0.78) W=3.00 ; p<0.04* (Augmentation significative, la collecte d'information est "pilotee par la check-list")
Gestion des tâches : - Facilité d'utilisation de l'appareil (échelle d'utilisabilité du système) - Effet de l'ancienneté sur le score SUS		Score SUS : 80/100 (Satisfaction élevée) Rho=-0.81 ; p<0.02** (Effet négatif de l'ancienneté sur l'évaluation du dispositif)

Au regard de la contrainte SP, les résultats indiquent que les diagnostics entre les médecins anesthésistes réanimateurs (MAR) et les infirmiers anesthésistes (IADE) d'un même binôme sont corrélés significativement dans les deux conditions. Avec la check-list, les évaluations réalisées vis-à-vis des cinq facteurs proposés comme causes possibles du retard de réveil montrent une corrélation forte (Rho=0.78, p<0.001). Sans la check-list, les évaluations faites concernant ces cinq mêmes facteurs montrent une corrélation plus faible mais toutefois significative (Rho=0.61, p=0.004).

Sur la base de l'indice H de Shannon, la figure 24 indique des niveaux de certitude différents entre MAR et IADE. Sans la check-list, les IADE présentent un niveau d'incertitude faible (H index : M=0.26 ; SD=0.36) comparé aux médecins qui sont plus incertains concernant l'implication ou non de chacune des causes explicatives proposées (H index : M=1.61 ; SD=0.12). Cette différence dans les niveaux de certitude entre MAR et IADE est significative (Mann-Whitney : W=0.00 ; p<0.03). Avec la check-list,

les IADE gardent un niveau d'incertitude faible (H index : $M=0.37$; $SD=0.31$) comparés aux médecins qui restent incertains concernant le diagnostic (H index : $M=1.04$; $SD=0.12$), mais cette différence n'est plus significative (Mann-Whitney : $W=3.00$; $p=0.20$).

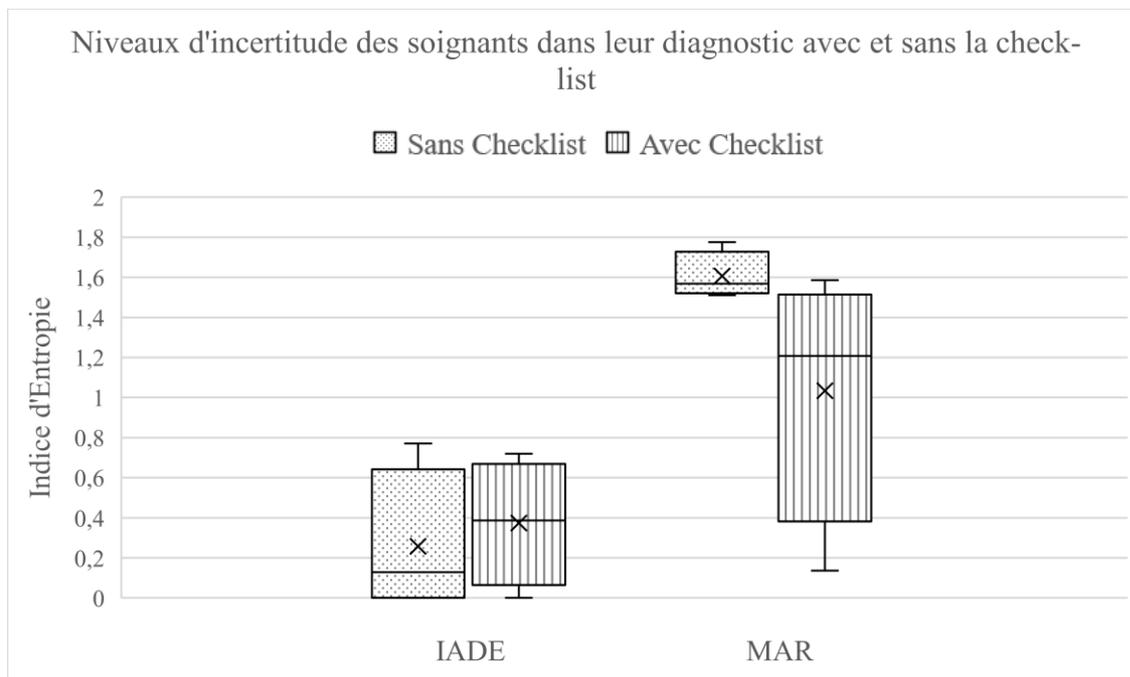


Figure 24 : Niveaux d'incertitude des soignants dans leur diagnostic avec et sans check-list.

La boîte à moustache présente les valeurs maximales et minimales (moustaches), les 3^{ème} et 1^{er} quartiles (boîte), la médiane (trait horizontal) et la moyenne (croix) de l'indice d'entropie (H index Shannon). Plus l'indice d'entropie est faible, plus le niveau de certitude est élevé. Plus l'indice d'entropie est élevé, plus le niveau de certitude est faible.

Au regard de la contrainte TI, le codage des vidéos montre que la présence de la check-list augmente significativement le nombre de consultation du dossier d'anesthésie par minute (Wilcoxon : $W=3.00$; $p<0.04$). Sans check-list, les participants consultent le dossier papier 1.01 fois par minute ($SD=0.28$). Avec la check-list, le nombre de consultation par minute augmente pour atteindre une moyenne de 1.87 consultation par minute ($SD=0.78$). Qualitativement, la figure 25 montre une augmentation du nombre de consultation du dossier avec la check-list, notamment pour l'IADE de l'équipe 1, mais pas pour les l'IADE et le MAR de l'équipe 4. Les observations des vidéos ont montré que la check-list permettait une recherche d'information structurée. Les allers-retours entre la check-list et le dossier étaient fréquents et la collecte de données était dirigée pour répondre aux items présentés dans la check-list. Ce processus "pilote par la check-list" participe à augmenter le nombre de consultations du dossier d'anesthésie. Les consultations sont brèves et nombreuses alors que dans la condition contrôle, la consultation du dossier d'anesthésie correspond plus à des traitements longs et discrets.

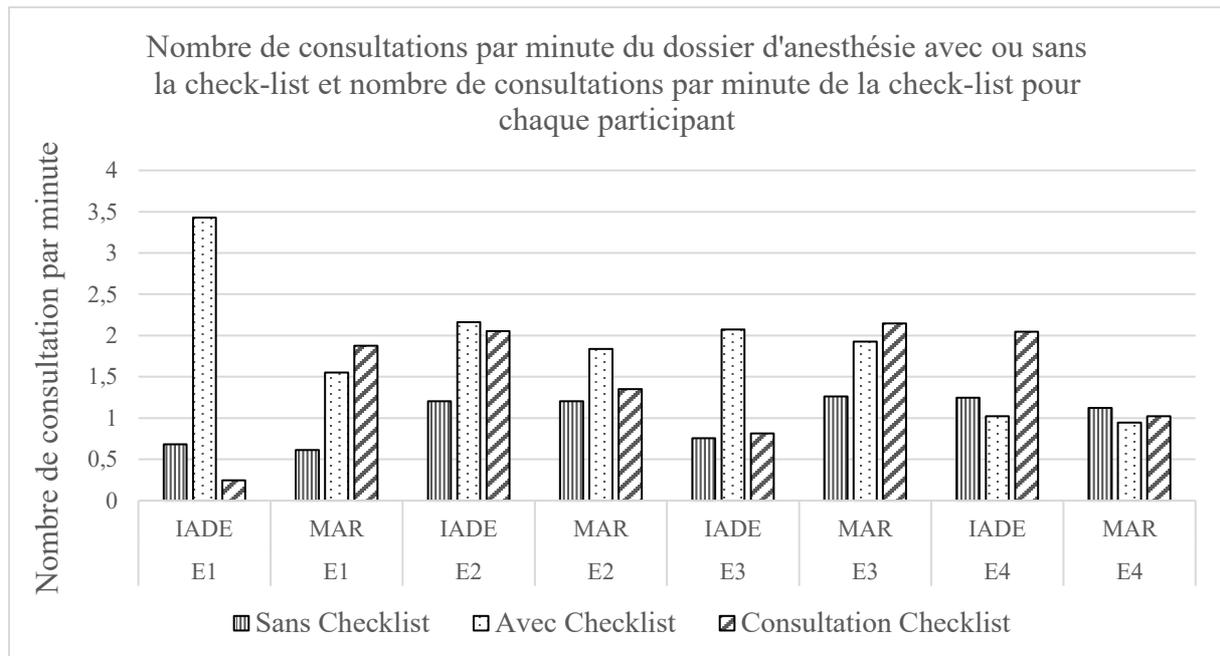


Figure 25 : Nombre de consultation par minute du dossier d’anesthésie et nombre de consultation par minute de la check-list pour chaque participant en fonction des conditions.

Au regard de la contrainte GT, la figure 25 indique que tous les participants consultent la tablette, même si la consigne initiale identifiait, à chaque début de scénario, qui des deux participants serait en charge de la check-list. Le codage des vidéos montre que la tablette était consultée 1.44 fois par minute (SD=0.70).

L’utilisabilité de la tablette, mesurée via l’échelle « System Usability Scale (SUS) », indique des scores élevés de satisfaction (M=79.38 ; SD=13.81 ; Min=57.5 ; Max=95). Les participants apprécient notamment le caractère exhaustif de la check-list (cité 4 fois), sa facilité d’utilisation (cité 2 fois), ainsi que la hiérarchisation des causes (cité 4 fois). Les critiques concernent l’absence d’une synthèse générale qui intégrerait les bilans de chacune des familles de causes (cité 5 fois). Deux participants expriment également un « classement des items non habituels » et « une distinction des causes pas claires ». Pour finir, l’indice de corrélation de Rho de Spearman montre une corrélation négative entre le score SUS attribué à la check-list et l’ancienneté, en années, des participants (Rho=-0.81 ; p=0.015). Moins les soignants sont expérimentés (en années de pratique), plus ils trouvent la check-list numérique satisfaisant. Ce point est d’ailleurs souligné par un participant qui se dit être « de la veille école » et éprouve des difficultés à « faire confiance à un nouvel outil ».

c) Discussion

Le retard de réveil en anesthésie générale est une situation complexe et incertaine qui peut regrouper à la fois des situations normales et des complications graves. Le médecin anesthésiste doit alors être en mesure d’identifier rapidement les potentielles causes pouvant expliquer l’endormissement prolongé

afin de mettre en place, ou non, des thérapeutiques appropriées. La performance et la sécurité du patient dépendent alors de la qualité et de la rapidité du processus diagnostic. À notre connaissance, ce travail représente la première tentative de conception d'une check-list numérique spécifique au retard de réveil.

A l'inverse des aides cognitives classiques, qui reposent essentiellement sur une stratégie visant à protéger le système des erreurs humaines, l'application de la hCWA nous a permis d'aborder la question de la conception sur la base de l'analyse des mécanismes qui façonnent les comportements en termes de contraintes, de pressions et de migrations vers le risque. En identifiant les contraintes propres au domaine de travail, leur dynamique respective au regard de la situation étudiée et l'impact des pressions sur la trajectoire des opérateurs, la hCWA permet d'envisager la checklist, non plus comme une barrière entre le danger et le patient, mais comme un outil intégré au système qui agit sur ces mécanismes. En effet, au regard de notre hypothèse principale, qui envisage la sécurité comme un équilibre dans la répartition du contrôle au regard des 3 contraintes, la checklist a pour objectif de limiter la migration vers les contraintes organisationnelles et de refocaliser l'attention sur la contrainte de soin propre au domaine. Cette proposition méthodologique répond à des besoins forts concernant la conception des check-lists dans le domaine de la santé, à savoir comprendre comment la dynamique du système est affectée lorsqu'une check-list est intégrée au système et proposer des solutions pour concevoir des check-lists qui soient pertinentes pour l'utilisateur et qui améliorent les mécanismes qui façonnent les comportements (Rydenfält et al. 2014).

En appliquant la méthode hCWA à la conception d'une check-list, nous montrons également que les seules performances techniques et médicales ne sont pas suffisantes pour mesurer l'impact de l'assistance cognitive sur l'équilibre du système. D'autres éléments du système de travail sont nécessaires à l'analyse, notamment l'impact de la check-list au regard de chacune des contraintes définies dans le modèle. Au regard de la *contrainte de soin au patient (SP)*, nos résultats ont montré que la check-list réduisait l'écart entre les médecins anesthésistes et les infirmiers anesthésistes concernant leur diagnostic. En effet, le degré de corrélation entre les diagnostics des soignants était plus important avec l'utilisation de la check-list. En rapprochant physiquement les soignants autour d'un même outil, il semblerait que la check-list permette aux soignants de se rapprocher « cognitivement » autour d'un même cheminement diagnostic. En effet, en l'absence de check-list, les degrés de certitude très divergents concernant le diagnostic final peuvent indiquer un cheminement cognitif individuel. Les IADE présentent des scores de certitude très élevés alors que les MAR semblent très incertains concernant l'identification des causes sous-jacentes. Avec la check-list, les médecins gagnent en certitude et les infirmiers émettent des avis diagnostic moins radicaux. L'utilisation de la check-list permettrait ainsi au binôme de converger vers des avis diagnostic plus nuancés et plus corrélés. Au regard de la *contrainte de traitement de l'information (TI)*, nos résultats indiquent que l'implémentation de la check-list modifie la stratégie de recueil d'information. Le dossier d'anesthésie, le moniteur physiologique, les imageries médicales, deviennent des sources d'informations utilisées pour remplir

les items de la check-list. La collecte d'information devient alors un processus "pilotee par la check-list". Les différentes sources d'informations sont intégrées au diagnostic et ne sont plus des étapes de traitement indépendantes. Cependant, il nous semble important d'être vigilant concernant cette dépendance aux items de la check-list. Le risque étant que les soignants piochent « passivement » les informations pour répondre aux items sans les traiter. En demandant aux utilisateurs d'attribuer à chaque variable une valeur « normale », « anormale » ou « inconnue », nous nous assurons que le soignant identifie et traite l'information pour juger de sa normalité avant d'ajouter cette information à la mémoire de la check-list. Pour finir, et concernant la *contrainte de gestion des tâches (GT)*, les jugements subjectifs des participants sont globalement positifs en raison du caractère intuitif de la check-list. Cependant, nous observons un effet de l'ancienneté sur cette évaluation. Les seniors sont moins satisfaits de cet appareil que les soignants moins expérimentés. Ce résultat confirme en partie une enquête auprès des anesthésistes qui montre que les médecins très jeunes, mais aussi très expérimentés, s'intéressent davantage aux outils tels que la check-list (Krombach et al. 2015).

Les apports de cette check-list doivent cependant être discutés au regard des limites de cette étude. Les premières limites concernent la taille de l'échantillon et le mode de recrutement des participants. En effet, seuls 8 spécialistes répartis en 4 binômes MAR-IADE ont participé à l'évaluation de la check-list. Nous sommes conscients que ce faible échantillon soulève des questions concernant la validité externe des résultats présentés. De plus, le recrutement des participants s'est fait sur la base du volontariat. Nous pouvons donc supposer que seuls les soignants intéressés par l'étude et sensibles aux problématiques de Recherche et Développement ont souhaité participer. Ainsi, les scores de satisfaction recueillis peuvent avoir été impactés par la dimension affective des participants, qui, initialement intéressés par l'étude et curieux de voir le projet aboutir, ont souhaité encourager la démarche. Cependant, il nous semble important de rappeler que ce travail constitue une première phase de conception. Les avis recueillis, si tant est qu'ils soient faibles en nombre, ont permis de mettre en évidence les avantages et inconvénients de l'assistance proposée et permettent de poursuivre les développements dans une logique de conception itérative. De plus, l'apport de ce travail est avant tout méthodologique. En effet, en appliquant la hCWA à la situation du retard de réveil, nous avons montré que cette méthode permettait de concevoir des assistances techniques adaptées aux contraintes délimitant l'espace de travail ainsi qu'à leurs dynamiques sous-jacentes. Ce travail fournit des éléments de réponses pour remplacer « l'analyse des tâches axée sur l'action et les écarts occasionnels en termes d'erreurs humaines » par des « modèles des mécanismes qui façonnent le comportement en termes de contraintes du système de travail et de limites » (Rasmussen 1997). Cependant, la méthode hCWA reste un nouveau concept qui doit encore être validé. Même si les contraintes choisies initialement semblent cohérentes avec les travaux précédents (Burtscher et al. 2010 ; Hall et al. 2006), le choix reste arbitraire et dépend de l'analyste. Il semble toutefois que les contraintes proposées soient pertinentes pour réfléchir à des problématiques

d'ergonomie organisationnelle (i.e. le coordinateur dans le cas applicatif n°1) et des problématiques d'ergonomie de conception (i.e. la check-list dans ce cas applicatif n°2).

Malgré les limites, les perspectives sont encourageantes. Nos prochaines étapes de recherche viseront à améliorer la pertinence de la check-list (e.g. ajouter un rapport de synthèse d'une page) et à finaliser le processus de conception, en particulier par des étapes telles que la validation des items et des catégories de causes. L'objectif étant de tester de façon continue les propositions de conception au près d'un échantillon plus large d'utilisateurs dans des conditions réelles. Dans cette logique, le comité « analyse et maîtrise du risque » (CAMR) de la Société Française d'Anesthésie et de Réanimation (SFAR), dont les missions concernent la mise au point d'aides cognitives dans le but d'améliorer la prise en charge du patient en situation critique, a apporté son soutien et souhaite participer aux prochaines étapes de développement.

d) Conclusion

Sur la base des principes exposés par la méthode hCWA, nous avons été en mesure de proposer et développer une assistance technique destinée à rééquilibrer la tendance naturelle du système à migrer vers la gestion des aspects organisationnels du soin au détriment de l'efficacité et l'efficacité du processus diagnostic. Une check-list numérique a donc été imaginée pour soutenir les médecins anesthésistes réanimateurs et infirmiers anesthésistes dans cet exercice critique. La simulation haute-fidélité a permis de tester, auprès d'experts, le premier prototype développé. Sur la base d'une liste de variables préalablement définies, structurée et hiérarchisée en fonction de leur degré de criticité, la check-list permet aux soignants de (i) éliminer les grandes urgences neurologiques ou neurochirurgicales, (ii) dépister les situations à risque de surdosage anesthésique absolu ou relatif ainsi que les grands syndromes toxiques (iii) identifier les causes rares et/ou très contextuelles. La première page de la check-list, consacrée au patient permet aux soignants d'assurer le recueil des constantes physiologiques et d'identifier rapidement les causes grossières de retard de réveil.

Section 4

Modélisation

« All models are wrong, but some are useful »

Georges Box (1919 – 2013)

« Tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles »

Georges Box (1919 – 2013)

I. Objectifs du chapitre

Dans la continuité des travaux précédents, notre objectif ici est de poursuivre les développements de la méthode hCWA et de proposer des outils méthodologiques destinés à modéliser les trajectoires des opérateurs au sein de l'espace de travail délimité par les contraintes liées au soin, à la gestion des tâches et au traitement de l'information. En effet, et comme l'exposent Cook & Rasmussen (2005), la question de la modélisation du point opératif et de ses trajectoires au regard des contraintes constitue un enjeu majeur pour aller plus dans l'exploitation du modèle dynamique de sûreté de Rasmussen (1997). Toute la difficulté est d'appliquer ce modèle à des systèmes faiblement couplés, comme peut constituer une équipe de soignants en situation d'urgence médicale.

Dans ce chapitre nous proposerons la méthode « SSS : State Space Sketch » comme un outil de modélisation permettant de représenter comment les opérateurs gèrent les nombreux degrés de liberté pour assurer le contrôle des contraintes. Au sein des systèmes faiblement couplés, les degrés de liberté sont nombreux et proviennent à la fois du domaine, de l'organisation et de l'interaction des opérateurs entre eux et avec leur environnement. Aussi, auto-organisation et adaptation en temps réel sont indispensables pour assurer la sécurité et contrôler les événements inattendus qui émergent de l'interaction de ces différents composants. Dans ce contexte, l'ensemble des actions possibles est conséquent et plusieurs trajectoires sont envisageables pour atteindre un même objectif. Comprendre comment les opérateurs s'adaptent et naviguent dans un champ de possibles aussi large est indispensable pour construire des environnements de soin sûrs qui soutiennent les comportements adaptatifs.

Sur la base des principes fondamentaux de la cybernétique, qui offrent un cadre théorique permettant de modéliser le comportement des systèmes complexes sous forme de trajectoires, le modèle SSS tente de mettre en évidence la variabilité du système (i.e. l'ensemble des trajectoires possibles) et tente de mettre en lumière des comportements à risques qui y sont associés et qui nécessitent une compréhension plus approfondie. L'objectif final étant de comprendre comment les opérateurs s'adaptent aux contraintes et à leurs pressions (contrainte liée au domaine de travail SP, contraintes liées à l'organisation du travail GT et TI), afin de développer des assistances adaptées à la complexité du système de l'urgence médicale. Le processus de modélisation engagé est ici cyclique. Le modèle initial permet de lire et comprendre les données, l'analyse extraite des données permet, en retour, de spécifier et d'enrichir le modèle.

La première partie sera consacrée à une brève présentation des principes fondamentaux cybernétiques développés par R. Ashby, ces derniers servant de base au développement de notre modèle. Les principes méthodologiques de SSS seront ensuite exposés et appliqués à l'analyse de 6 vidéos mettant en scène des équipes médicales devant faire face à une urgence pédiatrique en contexte de simulation.

II. La cybernétique

Dès lors que l'on aborde la question de la complexité des systèmes, la cybernétique apparaît comme un champ scientifique pertinent et adapté. Dans son ouvrage « Une introduction à la cybernétique », Ashby (1957) défend l'idée que les principes fondamentaux de la cybernétique peuvent être dissociés des grandes sciences telles que les mathématiques ou l'électronique et peuvent être abordés d'une façon simple et accessible à tous. La cybernétique offre un cadre de compréhension et d'analyse des systèmes larges et complexes et se définit comme une science de nature fonctionnelle. En effet elle s'intéresse, non pas aux choses, mais à la façon dont elles se comportent. Tout comme les méthodes formatives destinées à comprendre comment le travail peut être potentiellement effectué, la cybernétique tente de comprendre le champ des comportements possibles des systèmes et propose des outils pour les modéliser sous forme de trajectoires.

Une des lois fondamentales de la cybernétique repose sur la *variabilité requise*. Cette loi énonce que seule la variété peut contrôler la variété (p207). La « variété » étant définie par Ashby comme les entités distinguables dans un ensemble d'éléments, autrement dit le dénombrement en quantité des comportements et des différents états pour un système donné. Ainsi, face à un système complexe S1, le contrôle et la régulation de S1 par S2 ne sont possibles que si la variété de S2 est au moins égale à la variété de S1. Un régulateur S2 (dans notre cas l'organisation de travail) doit faire preuve de variabilité, de flexibilité pour pouvoir s'adapter et faire face à l'incertitude et la complexité de S1 (dans notre cas le domaine de travail).

Plusieurs grands concepts constituent les fondements de la cybernétique telle qu'elle est appréhendée par R. Ashby. Nous présenterons ceux qui nous ont inspiré pour développer la méthode de modélisation de l'activité que nous proposons dans ce travail de thèse :

Un état et ses variables essentielles : Dans le cadre de la cybernétique, Ashby définit les états du système comme des conditions explicitement définies ou des propriétés reconnaissables lorsqu'elles se produisent. Tout système possède, par nature, de nombreux états possibles. Un état se définit en termes de variables essentielles (p197). Pour un organisme vivant, les variables essentielles sont les variables fondamentales qu'il faut maintenir dans des limites physiologiques acceptables pour que l'organisme reste en vie. Pour une entreprise, une des variables essentielles à sa survie serait par exemple le maintien d'une plus-value.

Une transition : Pour aborder le concept de la transition, Ashby utilise l'exemple du changement de couleur de la peau sous l'effet du soleil, c'est-à-dire la transition de la *peau pâle* vers la *peau bronzée*. Dans cette situation, un état (i.e. la peau pâle) est influencé par un facteur (i.e. le soleil) et se change en un autre état (i.e. la peau bronzée). Ce changement, depuis la peau pâle vers la peau bronzée, représente

une transition. La transition est alors caractérisée par deux états et une indication permettant de spécifier quel état est modifié en quoi : peau pâle → peau bronzée.

Une transformation : Sur la base de l'exemple précédent, il est possible de comprendre que le facteur « soleil » ne joue pas uniquement sur la couleur de la peau. En effet, il peut générer des transitions sur d'autres objets. Par exemple, le facteur *soleil* peut permettre une transition de l'état solide à l'état liquide (glaçon → eau) ou encore de l'état froid à l'état chaud (sol froid → sol chaud). Ainsi, un même facteur peut générer un ensemble de transitions sur différents objets. Cet ensemble de transition est appelé une transformation.

Une matrice de transformation : Une transformation est donc un ensemble de transitions que génère un facteur. Dans le cadre de la cybernétique, une telle transformation est représentée sous la forme d'une matrice composée des états initiaux en colonne et des états finaux en ligne. Les cellules sont marquées du signe « + » lorsqu'une transition se produit depuis un état initial vers un état final. L'indicateur « 0 » est utilisé lorsqu'aucune transition n'a lieu. Pour illustrer ce concept, reprenons l'ensemble des exemples évoqués précédemment concernant le facteur *soleil*, à savoir les transitions peau pâle → peau bronzée ; eau → glace ; sol froid → sol chaud. La matrice de transformation du soleil peut alors être représentée de la façon suivante :

↓	Peau Pâle	Glace	Sol froid
Peau bronzée	+	0	0
Eau	0	+	0
Sol chaud	0	0	+

La flèche « ↓ » indique le sens des transitions, les « + » mettent en évidence la présence d'une transition, les « 0 » l'absence de transition. La matrice de transformation fournit donc un ensemble d'états initiaux et une indication concernant ce en quoi ces états initiaux sont transformés (i.e. les états finaux) et permet de dire que sous l'effet du soleil, l'état *peau pâle* évoluera vers un état *peau bronzée*, l'état *glace* évoluera vers l'état *eau* et l'état *sol froid* évoluera vers un état *sol chaud*.

D'une façon plus générale, et indépendamment du facteur à l'origine de la transformation, considérons maintenant la matrice de transformation suivante :

↓	O	P	Q	R	S	T
P	0	0	0	0	+	0
Q	0	+	0	0	0	0
R	+	0	0	0	0	0
S	0	0	0	+	0	0
T	0	0	+	0	0	0
U	0	0	0	0	0	+

À nouveau, la flèche « ↓ » indique le sens des transitions, les « + » mettent en évidence la présence d'une transition, les « 0 » l'absence de transition. Cette matrice de transformation, que nous nommons T, met en relation des états initiaux {O, P, Q, R, S, T}, des états transformés {P, Q, R, S, T, U} et indique

que, sous l'effet de cette transformation, l'état O évolue vers l'état R, l'état P évolue vers l'état Q, l'état Q évolue vers l'état T, etc... Sur la base de cette matrice de transformation, les transitions de passage d'un état à un autre sont connues. Ainsi, à partir de l'état O, et après avoir appliqué la matrice de transformation, le système évolue de la façon suivante : $O \rightarrow R \rightarrow S \rightarrow P \rightarrow Q \rightarrow T \rightarrow U$. À partir de l'état S, le système évolue de la façon suivante : $S \rightarrow P \rightarrow Q \rightarrow T \rightarrow U$. Cette nouvelle séquence d'état, générée à la suite de l'application de la matrice de transformation définit une ligne comportementale ou une trajectoire. Ainsi, lorsqu'on connaît la matrice de transformation on connaît la trajectoire du système ou bien l'ensemble des trajectoires possibles dans le cas où un état peut conduire à plusieurs états différents.

Une trajectoire : Une fois la transformation réalisée, la nouvelle séquence d'état générée définit une ou plusieurs trajectoires, c'est-à-dire la « ligne comportementale du système » pour reprendre l'expression utilisée par Ashby.

La notion de stabilité vs. instabilité : La stabilité est souvent associée à la notion d'équilibre. Lorsque l'état initial est inchangé à la suite d'une transformation, on parle d'état d'équilibre. La trajectoire boucle sur un même état. Dans le cadre d'une matrice au sein de laquelle les opérants et transformés sont identiques (avec n colonnes, m lignes et $n = m$), ces états d'équilibres se retrouvent le long de la diagonale de la matrice. Malgré le fait que la stabilité soit un terme couramment utilisé et associé à la performance, Ashby défend l'idée que la stabilité peut être indésirable dès lors qu'elle boucle sur un état indésirable (p81).

Ensemble de possibilités : En termes généraux, l'ensemble des possibilités représente l'ensemble des événements, des actions, des situations qui sont possibles compte tenu du problème, de l'objectif à atteindre et du contexte. Au sein de la matrice de transformations, toutes les cellules représentent les combinaisons totales et les cellules marquées d'un « + » représentent l'ensemble des possibilités en termes de transitions d'un état à un autre.

Contrainte : Dans les termes d'Ashby, au moins une contrainte existe lorsque les combinaisons possibles sont inférieures aux nombres de combinaisons totales. Autrement dit, lorsque le nombre de cellules marquées par un « + » au sein de la matrice de transformation est inférieur au nombre de combinaison totale (i.e. le nombre total de cellule). De cette façon, une contrainte est considérée comme un facteur limitant des possibilités d'actions, réduisant ainsi les degrés de liberté. L'absence de contrainte serait modélisée par une matrice de transformation où chaque cellule serait dotée d'un « + », autrement dit où toutes les transitions seraient possibles.

Exemple

Tentons d'appliquer les notions précédentes. Imaginons un feu tricolore composé de 3 états que nous nommerons V, O, R en relation à leurs couleurs respectives « Vert », « Orange », « Rouge ». De par la présence de ces 3 éléments clairement distinguables, la variété est ici de 3. Sur la base de ces 3 éléments, la matrice de transition identifie 9 combinaisons possibles. Néanmoins, dans les faits, seules trois

combinaisons sont utilisées et les transitions ne sont possibles que depuis l'état Vert vers l'état Orange, depuis l'état Orange vers l'état Rouge et depuis l'état Rouge vers l'état Vert. La figure 26 ci-dessous illustre, sous la forme d'une matrice de transformation, les combinaisons et transitions possibles lors du fonctionnement réel du feu tricolore.

↓	V	O	R
V	0	0	+
O	+	0	0
R	0	+	0

Figure 26 : Matrice de transformation d'un feu tricolore.

Cette matrice met en évidence l'ensemble des transitions autorisées. Le feu suit la trajectoire cyclique Vert → Orange → Rouge. Les transitions Orange → Vert ou Rouge → Orange étant impossibles.

Seules 3 combinaisons sont réellement utilisées sur les 9 possibilités disponibles. En termes cybernétiques, cette réduction des possibilités indique la présence de contraintes. Ces contraintes réduisent les degrés de liberté de 9 à 3 et forgent la seule trajectoire possible d'une couleur de feu à une autre, à savoir : Vert → Orange ; Orange → Rouge ; Rouge → Vert. Le mode de fonctionnement d'un feu tricolore est fortement contraint. Il n'existe pas d'alternatives possibles aux transitions entre couleurs que nous venons de décrire. Pour chaque état, un seul degré de liberté est disponible et en conséquence, une seule trajectoire est envisageable ; une situation qui correspond dans le monde du travail au suivi d'une procédure pas à pas. A l'inverse, un système faiblement couplé, comme le traitement d'une urgence médicale par une équipe de soignants, offre un nombre de degrés de liberté et donc de trajectoires alternatives particulièrement élevé.

Sur la base de ces concepts fondamentaux de la cybernétique, nous proposons de développer une méthode d'analyse destinée à modéliser les comportements des opérateurs sous forme de trajectoires dans un espace de travail contraint définissant un nombre plus ou moins important de degrés de liberté. L'objectif étant de représenter l'activité réelle observée lors des sessions de simulation en termes d'états, de transitions et de matrices de transformation. Via cet exercice de modélisation, nous souhaitons (i) rendre compte de la variabilité du système (i.e. l'ensemble des DDL disponibles pour faire face à complexité de la situation), (ii) comprendre comment les opérateurs contrôlent ces DDL et naviguent au sein de DSM et (iii) mettre en lumière des situations problématiques qui nécessiteraient le développement d'assistances destinées à améliorer la sécurité et la performance des systèmes.

III. Présentation de la méthode SSS

SSS : The State Space Sketch

La présence de nombreux degrés de liberté dans un système faiblement couplé entre le domaine de travail et l'organisation complexifie le contrôle d'une trajectoire dans l'espace de travail qui puisse être sûre. Dans ce contexte, les comportements planifiés ne peuvent être basés que sur des repères partiels, ces repères ayant la particularité d'être essentiels à la performance. En situation, des procédures strictes ne sont pas applicables à la lettre. Des états inattendus ou incertains émergeront des interactions in situ entre le domaine de travail et l'organisation. Ce phénomène a été démontré dans des études concernant la planification de missions dans une zone ennemie par des pilotes de chasse (Amalberti & Deblon 1992) et dans des études sur la planification de l'anesthésie où les points à considérer (états critiques) sont particulièrement mis en évidence par les anesthésistes comme des mesures préventives alors que de nombreux degrés de liberté restent ouverts dans la prévision du déroulement du travail (Xiao et al. 1997). Le défi est d'être en mesure de modéliser les degrés de liberté auxquels les opérateurs doivent faire face dans des systèmes de travail faiblement contraints (Morineau & Flach 2019). Dans ce contexte, nous proposons la méthode, appelée « *The State Space Sketch* » (SSS), destinée à modéliser les comportements comme des transitions dans un espace d'état. Les différentes étapes méthodologiques ont pour objectif de décrire les contraintes et l'ensemble des degrés de liberté que les opérateurs doivent considérer pour progresser de manière sûre et efficace dans l'espace de travail.

1. Le processus de modélisation

L'exercice de modélisation permet la construction d'une représentation abstraite d'une réalité concrète. Comme l'écrit Daniel Durand dans son ouvrage sur *La Systémique*, cette représentation doit être assez simplifiée pour être intelligible mais suffisamment fidèle pour être utile et fiable (p.60). Nous présenterons ici le processus de modélisation que nous mettons en œuvre, le but, les éléments du modèle ainsi que les différentes étapes méthodologiques à respecter afin d'aboutir à une compréhension approfondie du système étudié.

a) But de la modélisation

L'effort de modélisation repose ici sur le développement d'outils de modélisation permettant de comprendre comment les opérateurs contrôlent les contraintes et les nombreux degrés de libertés disponibles au sein des systèmes faiblement couplés. En effet, au sein de ces systèmes, l'espace des possibles est large et plusieurs solutions sont possibles pour atteindre un même objectif. Ainsi, en

localisant le point opératif au sein de DSM et en modélisant les comportements des opérateurs comme des trajectoires nous pourrions comprendre comment les opérateurs s'adaptent face aux nombreux degrés de libertés disponibles et assurent le contrôle des contraintes. L'objectif à long terme étant de développer des assistances qui soutiennent les comportements adaptatifs nécessaires pour assurer les exigences de sécurité et performance.

b) Les éléments du modèle

Les contraintes : Les contraintes identifiées sur la base du modèle DSM délimitent l'espace des opérations sûres au sein duquel les opérateurs peuvent naviguer. Cet espace représente l'ensemble des possibilités, autrement dit les degrés de liberté disponibles pour assurer le contrôle des contraintes. Les comportements orientés vers le contrôle des contraintes sont modélisés sous forme de trajectoire au sein de cet espace.

Les états : Les états représentent les étapes critiques dans la réalisation de la tâche (e.g. checkpoints) par lesquelles les opérateurs doivent transiter pour contrôler une situation d'urgence. Un état peut être atteint ou non atteint. Le passage d'un état à un autre représente une transition. Une succession de transition entre états forme une trajectoire. Les états sont représentés graphiquement par des cercles.

Les variables : Chaque état est caractérisé par une liste de variables. Ces variables représentent les opérations à réaliser pour atteindre l'état.

Les liens de dépendance fonctionnelle : Un lien de dépendance fonctionnelle entre deux états implique un prérequis dans la réalisation de l'action. Si deux états E_x et E_y partagent un lien de dépendance fonctionnelle, la réalisation de l'état E_y n'est possible que si l'état E_x a préalablement été réalisé. A l'inverse, si l'état E_x n'est pas atteint, alors des difficultés sont à prévoir dans la réalisation de l'état E_y . Un même état peut partager des liens de dépendances avec plusieurs états. Un état peut ne pas avoir de lien de dépendance fonctionnelle. On dit alors qu'il est volant et sa réalisation peut se faire à n'importe quel moment dans la tâche. Plus il y a de liens de dépendance, plus les degrés de libertés pour réaliser la tâche sont faibles. Moins il y a de lien de dépendance, plus les degrés de libertés pour réaliser la tâche sont nombreux. Les liens de dépendance sont représentés graphiquement par des flèches à sens unique dont la pointe indique l'état dont la réalisation est dépendante du précédent.

Les matrices de transformation : Deux types de matrices de transformations sont utilisées. Une première matrice dite « matrice calque » est développée lors de la phase de création du modèle. Une seconde matrice dite « matrice d'analyse » est issue de la phase d'analyse des comportements. Ces deux matrices réduisent le modèle SSS sous la forme d'une matrice carrée d'ordre n où n correspond au nombre d'états identifiés. Alors que la matrice calque représente l'ensemble des transitions possibles entre états et illustre l'espace au sein duquel les opérateurs humains peuvent naviguer pour assurer le contrôle de la situation, la matrice d'analyse met en évidence l'ensemble des transitions réelles

observées. La matrice d'analyse rend compte de l'effet des contraintes liées à la mise en œuvre effective, en contexte, des opérations comparativement à la matrice calque. Lors de la première phase pré-analytique destinée à la création du modèle, chaque cellule de la matrice calque est colorée (vert, orange ou rouge) en fonction du caractère normal, anormal ou interdit de la transition en question. Par exemple, si un lien de dépendance fonctionnelle existe entre les états E_1 et E_2 , cela signifie que l'état 2 ne peut être réalisé avant l'état 1. La cellule $E_1 \rightarrow E_2$ sera colorée en vert (i.e. la transition est normale et attendue) tandis que la cellule $E_2 \rightarrow E_1$ sera colorée en rouge (i.e. la transition est interdite d'un point de vue fonctionnel). En qualifiant chaque cellule, la matrice calque rend compte des zones à risques potentielles dans la navigation entre les états sur la base de l'analyse de la tâche. Lors de la seconde étape d'analyse des données, chaque cellule de la matrice d'analyse est caractérisée par un chiffre représentant la somme des transitions observées pour la cellule concernée. La probabilité de passage d'un état colonne à un état ligne est ensuite calculée. En superposant les deux matrices, la matrice de transformation finale met en lumière les comportements à risques qui nécessitent une analyse qualitative plus approfondie (i.e. ceux situés dans les zones qualifiées de zones à risques).

2. Les étapes méthodologiques

Deux grandes phases méthodologiques se distinguent : une première phase destinée à construire le modèle de la tâche ; une seconde phase destinée à analyser les données propres à l'étude. Nous rappelons que la méthodologie engage un processus cyclique où le modèle initial sert de grille de lecture pour comprendre et analyser les données réelles et les résultats issus de l'analyse permettent en retour, de spécifier certaines caractéristiques du modèle (Figure 27).

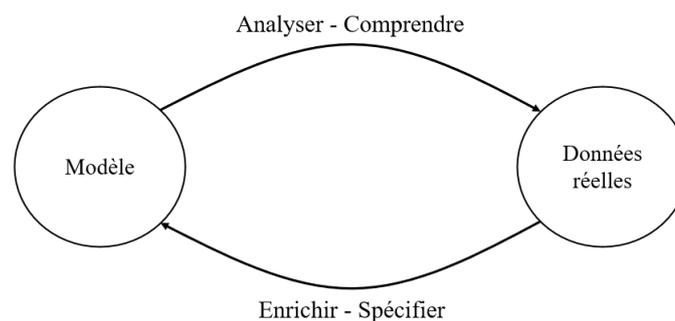


Figure 27 : Représentation du cycle propre au processus méthodologique.

Le modèle permet de comprendre les données issues du terrain. Les résultats issus de l'analyse permettent d'enrichir et spécifier le modèle.

Chaque phase méthodologique est caractérisée par une succession d'étapes que nous détaillerons ultérieurement (Figure 28) :

a) Création du modèle

- i. Identification des états critiques de la tâche et des variables propres à chaque état

- ii. Caractérisation des états au regard des contraintes
 - iii. Classification des états selon une dimension séquentielle de réalisation de la tâche
 - iv. Identification des liens de dépendances entre les états
 - v. Construction de la matrice calque et identification des zones de risques potentiels dans la navigation
- b) Analyse des données
- vi. Remplissage de la matrice d'analyse
 - vii. Analyse et interprétation des données

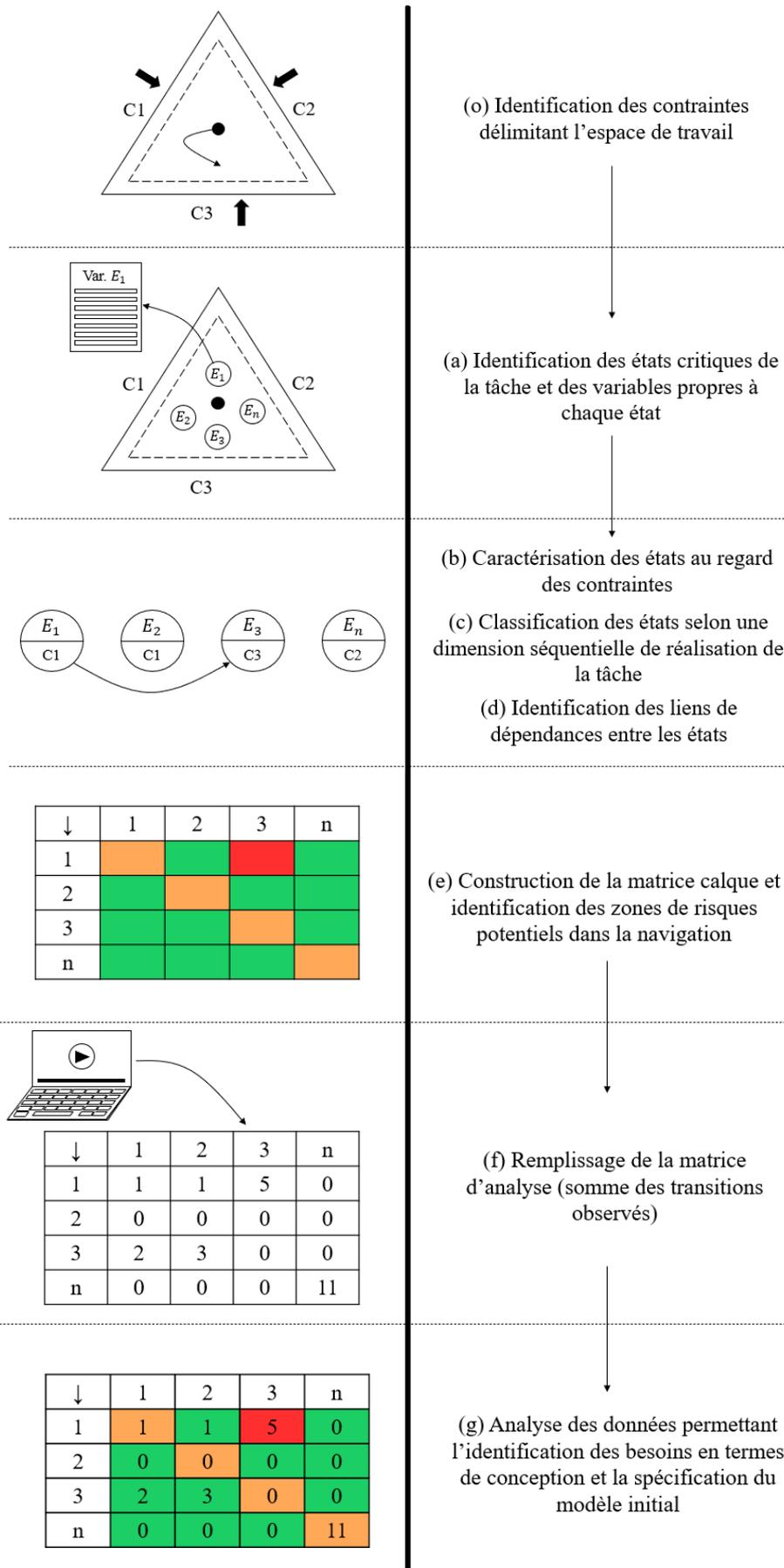


Figure 28 : Organigramme du processus de modélisation de la méthode SSS

a) Phase méthodologique 1 : Création du modèle

i. Identification des états critiques de la tâche et des variables propres à chaque état

Face au nombre important de degrés de liberté présents, les opérateurs utilisent la structure de la tâche comme un outil pour guider leurs trajectoires au sein de leur espace de travail. L'activité est structurée dans le temps par une séquence d'états à réaliser et cette structure permet aux opérateurs de geler les degrés de liberté qui ne semblent pas pertinents pour atteindre les objectifs de la tâche. Ces états peuvent être spécifiés à différents niveaux de granularité et un niveau plus ou moins fin de description peut être approprié. Nous considérerons que le bon niveau de description est celui qui met en évidence les états critiques qui doivent être contrôlés par un système d'assistance ou par les opérateurs eux-mêmes afin d'éviter les risques. L'analyse de documents techniques, les procédures, les connaissances d'experts et les observations peuvent être utilisées pour identifier l'ensemble des états critiques de la tâche. La sélection de ces états peut également dépendre du profil des opérateurs et des conditions de travail. Par exemple, le contrôle effectué par un opérateur novice ou fatigué nécessitera plus de points d'étape que pour un expert ou un opérateur éveillé (Sebillotte 1991). Le niveau de complexité et de criticité de la séquence des tâches nécessitera également plus ou moins de points de contrôle.

En tant que checkpoints, les états doivent, de préférence, être formulés sous la forme de verbes au participe passé. Ces états ne sont pas des actions ou des objectifs comme c'est généralement le cas dans les méthodes classiques d'analyse de la tâche, telles que l'analyse cognitive appliquée des tâches (ACTA) (Militello & Hutton 1998) ou l'analyse hiérarchique des tâches (HTA) (Shepherd 1998). Il s'agit ici d'états qui impliquent à la fois des opérations et des objectifs mais qui pourraient être identifiés par un observateur ou par des capteurs chargés de suivre l'activité. Cette focalisation sur les états de la tâche atteints ou non atteints facilite le développement potentiel de systèmes d'assistance impliquant, par exemple, le déclenchement d'alarmes ou la présence de checklists qui contrôlent l'état de l'environnement de travail.

Un état donné est considéré comme atteint si les opérations requises pour l'atteindre sont satisfaites. Comme l'indique Ashby dans son ouvrage, un état se définit en termes de variables essentielles. Ainsi chaque état est caractérisé par une liste de variables indiquant les opérations nécessaires à l'atteinte de l'état. À titre d'exemple, dans une situation d'urgence nécessitant un remplissage¹⁴ vasculaire, les variables nécessaires à l'atteinte de l'état seraient « Prescrire les drogues » ; « Calculer les dosages » ; « Remplir le patient ». La sélection des variables s'effectue également sur la base de documents techniques, de procédures, des connaissances d'experts et repose sur le même principe que l'identification des contraintes et des états. Le processus est dit récursif. Les contraintes sont les contraintes nécessaires et suffisantes au contrôle du système, les états sont les états nécessaires et

¹⁴ Le remplissage vasculaire est une technique médicale permettant un apport liquidien par voie veineuse. L'effet du remplissage est d'augmenter le retour veineux et donc d'augmenter le débit cardiaque. Le choix du soluté de remplissage se fait entre les cristalloïdes et les colloïdes (Rabechault & Bart 2015).

suffisants au contrôle des contraintes, les variables sont les variables nécessaires et suffisantes à l'atteinte des états. Notons qu'à nouveau, le niveau de granularité est dépendant des objectifs de l'analyse, des caractéristiques des soignants, du contexte. L'objectif étant de trouver le bon compromis « fidélité – pertinence ».

ii. Caractérisation des états au regard des contraintes

Afin de localiser l'état de la tâche dans l'espace de travail délimité par DSM, chaque état est caractérisé au regard de la contrainte principale que ce dernier permet de contrôler. Ainsi, un état caractérisé « SP » correspond à un point d'étape orienté vers le contrôle de la contrainte de soin au patient. Un état « TI » met en évidence un point d'étape orienté vers le contrôle de la contrainte de traitement de l'information. Un état caractérisé « GT » est un état dont la réalisation repose sur des comportements orientés vers le contrôle de la contrainte de gestion des tâches. Notons ici que chaque état possède une coordonnée sur chacune des dimensions du modèle mais que seule la contrainte principale est utilisée pour caractériser l'état. Dans une logique de sécurité, ce choix repose sur la notion de criticité. En effet, pour un état donné, si le risque de ne pas atteindre l'état est principalement lié à de l'information (e.g. mauvaise communication, perte d'information, incompréhension, erreur de traitement...) alors l'état sera caractérisé TI. S'il est lié à de la connaissance ou de la technique médicale (e.g. absence de soin approprié, non-respect des procédures, erreur d'injection, massage ou intubation non efficace...) alors il sera caractérisé SP. Pour finir, si le risque est lié au fonctionnement ou à la manipulation d'un outil alors cet état sera identifié GT (e.g. outil défaillant, outil non branché, outil non accessible...).

iii. Classification des états selon une dimension séquentielle de réalisation de la tâche

Une première dimension séquentielle permet d'ordonner les états selon l'ordre dans lequel ils sont censés être réalisés compte tenu de la tâche. Pour un état donné E_n , l'état E_{n-1} est réalisé avant, l'état E_{n+1} est réalisé après. La numérotation des états de E_1 à E_{fin} illustre cette dimension séquentielle. Graphiquement, un état situé à gauche d'un état cible est réalisé avant. Un état positionné à droite d'un état cible est réalisé après. Cet ordre est préétabli sur la base des procédures médicales et des avis des experts. Par exemple, pour une tâche quotidienne telle que « s'asseoir au bureau », trois états peuvent être identifiés : « E_1 : porte ouverte » ; « E_2 : manteau enlevé » ; « E_{fin} : assis sur la chaise ». Ces états suivent un ordre de progression logique dans la réalisation de la tâche. Toutefois, compte tenu du fait que nous étudions un système faiblement couplé, il s'agit d'appréhender une telle séquence procédurale comme un repère dans le suivi de l'activité et non comme une trajectoire à suivre par les opérateurs, de manière obligatoire.

iv. Identification des liens de dépendances entre les états

En plus de la dimension séquentielle, les états sont ordonnés sur la base des liens de dépendance fonctionnelle qu'ils partagent. Un lien de dépendance entre deux états indique que l'atteinte d'un état E_n est dépendante de l'atteinte d'un état précédent. Sur la base de l'exemple précédent, nous comprenons que l'opérateur ne peut s'asseoir à sa place sans avoir préalablement ouvert la porte. Si l'opérateur ne parvient pas à ouvrir la porte, cela aura un impact significatif sur la possibilité d'être assis sur la chaise. Il existe donc un lien de dépendance fonctionnelle entre ces deux états. À l'inverse, et même si l'état « E_2 : manteau enlevé » est positionné avant l'état « E_{fin} : assis sur la chaise » dans la séquence de réalisation de la tâche, l'opérateur peut, dans certaines situations, s'asseoir avec son blouson. Le fait de ne pas enlever le manteau n'a pas d'incidence sur la capacité de l'opérateur à s'asseoir au bureau. Ainsi, ces deux états ne partagent aucun lien de dépendance fonctionnelle. L'état E_2 étant considéré comme un état volant, autrement dit un état dont la réalisation est nécessaire mais peut s'effectuer à différents moments dans le processus de progression dans la tâche.

Ce type de dépendance peut être formellement décrit par l'implication logique inverse dans la logique propositionnelle (Tableau 10). Considérons deux états E_1 et E_2 . Si une dépendance fonctionnelle existe entre E_1 et E_2 , et que E_1 n'est pas atteint, alors E_2 ne peut pas être atteint correctement. Cependant, notons que E_2 peut ne pas être atteint en raison d'autres événements ou problèmes même si E_1 a préalablement été atteint.

Tableau 10 : Tableau de vérité de la relation de dépendance fonctionnelle entre deux états E1 et E2 sur la base de l'implication logique inverse.

État 1	État 2	Valeur de vérité	Interprétation
Atteint	Atteint	Vrai	Absence de problème, les états 1 et 2 sont correctement atteints.
Non atteint	Atteint	Faux	La situation est impossible. Du fait du lien de dépendance unissant les deux états, E2 ne peut être atteint si E1 n'a préalablement pas été atteint. L'échec en E1 impacte la réalisation de E2.
Atteint	Non atteint	Vrai	L'état 2 est non atteint malgré des actions correctes menées sur E1. Peut provenir d'un dysfonctionnement ou d'actions incorrectes sur E2 et/ou sur d'autres états que E1.
Non atteint	Non atteint	Vrai	La « non atteinte » de l'état 1 se propage à l'état 2 du fait du lien de dépendance unissant ces deux états.

v. Construction de la matrice calque et identification des zones de risques potentiels dans la navigation

Sur la base des états et des liens de dépendances identifiés dans le modèle SSS, une matrice est construite. Le nombre de lignes et de colonnes est lié au nombre d'états critiques identifiés dans le modèle. À titre d'exemple, un modèle composé de 10 états critiques sera réduit sous la forme d'une matrice carrée d'ordre 10 (i.e. 10 colonnes et 10 lignes).

La lecture de la matrice s'effectue depuis les colonnes vers les lignes. Le sens de la flèche « ↓ » permet de caractériser le sens de la lecture. Les états initiaux sont classés en colonne tandis que les états finaux ou états cibles sont positionnés en ligne. Chaque cellule représente une transition d'un état à un autre, autrement dit le passage d'un état colonne à un état ligne. L'ordre de classification des états au sein de la matrice est le même pour les colonnes et les lignes. Il respecte la dimension séquentielle de la tâche établie préalablement.

La matrice vide représente l'ensemble des possibilités d'action, autrement dit l'ensemble des degrés de liberté disponibles pour faire face à la situation. Par exemple, pour le même modèle SSS composé de 10 états, la matrice sera composée de 100 cellules. Ces 100 cellules sont représentatives de l'ensemble des transitions possibles entre les différents états identifiés.

Plusieurs zones sont identifiables dans la matrice. Premièrement, la diagonale sépare la matrice en deux parties symétriques, une partie basse située en dessous de la diagonale et une partie haute située au-dessus. La partie basse représente des transitions qui suivent la séquence de la tâche préalablement établie, autrement dit une progression dans la tâche vers l'avant. À l'inverse, la partie haute illustre des transitions dans le sens inverse de la séquence de la tâche. Ces transitions sont considérées comme des retours en arrière dans la progression de la tâche. Ces retours en arrière peuvent être pertinents dans certains cas comme lors d'une action de vérification, ou signaler un problème nécessitant un retour en arrière du fait de la non réalisation d'un prérequis. Deuxièmement, les cellules constituant la diagonale sont caractéristiques des comportements qui bouclent sur un même état. Lors de cette transition, l'état cible reste identique à l'état initial. Ces comportements peuvent être le signe que l'opérateur vérifie chacune des variables essentielles de l'état de façon itérative, ou mettre en évidence un problème empêchant les opérateurs de progresser dans la tâche.

Afin de distinguer ce qui relève de la vérification ou du problème chaque cellule de la matrice est caractérisée par une couleur verte, orange ou rouge en fonction du risque potentiel que représente la transition concernée. Une cellule verte illustre une transition normale, attendue et non risquée. Une cellule orange représente une transition anormale, inattendue pouvant induire des risques. Une cellule rouge met en évidence une transition interdite, fonctionnellement impossible. La caractérisation des couleurs de la matrice se base sur le modèle SSS et les liens de dépendances fonctionnelles

préalablement identifiés. À titre d'exemple, et concernant la tâche quotidienne « s'asseoir au bureau », la figure 29 illustre la caractérisation des cellules de la matrice sur la base du modèle SSS.

Une fois complétée, la matrice calque sert de grille de lecture pour caractériser les comportements observés et identifier les transitions nécessitant une analyse/compréhension plus approfondie. Il est important de noter que plusieurs calques peuvent être mis en place en fonction des objectifs de l'analyse. Un premier calque « fonctionnel » met en évidence les contraintes fonctionnelles dans la réalisation des actions. La caractérisation des cellules illustre les possibilités d'actions, en termes de comportements moteurs. Un second calque « cognitif » met en évidence l'espace-problème au sein duquel les opérateurs naviguent. Apparaissent au sein de cette matrice les processus cognitifs de raisonnement ou de résolution de problème. À titre d'exemple, les comportements mettant en évidence un « retour en arrière » dans la progression de la tâche (i.e. partie haute située au-dessus de la diagonale) peuvent être problématiques au sein de la matrice fonctionnelle tandis qu'ils représentent des processus mentaux de vérification ou de surveillance au sein de la matrice cognitive.

↓	E_1 (Porte ouverte)	E_2 (Blouson enlevé)	E_3 (Assis)
E_1 (Porte ouverte)	Boucle sur le même état. (Risque potentiel lié à l'ouverture (e.g. pas de clés, serrure cassée...)).	Retour en arrière. (L'opérateur enlève son blouson avant d'ouvrir la porte).	Transition impossible. (L'opérateur ne peut s'asseoir sans avoir ouvert la porte).
E_2 (Blouson enlevé)	Progression normale dans la tâche.	Boucle sur le même état. (Risque potentiel lié au blouson (e.g. fermeture cassée...)).	Retour en arrière. (L'opérateur enlève son blouson une fois assis).
E_3 (Assis)	Progression normale dans la tâche.	Progression normale dans la tâche.	Boucle sur le même état. (Problème lié à la chaise (e.g. chaise cassée, inaccessible...)).

Figure 29 : Exemple de caractérisation de la matrice fonctionnelle et identification des zones de risques potentielles.

La tâche « s'asseoir au bureau » est composée de 3 états. Chaque cellule illustre une transition depuis l'état en colonne vers l'état en ligne. La caractérisation de la matrice dépend du modèle SSS préalablement construit. Les transitions normales et attendues sont en vert, les transitions anormales et inattendues sont en orange, les transitions interdites ou fonctionnellement impossibles sont en rouge. La flèche « ↓ » indique le sens de la transition. Ici, la transitions $E_3 \rightarrow E_1$ est rouge du fait du lien de dépendance fonctionnelle existant entre $E_1 \rightarrow E_3$, rendant impossible la trajectoire inverse.

Sur la base des travaux d'Ashby, qui stipulent que la stabilité n'est pas toujours associée à la performance, la diagonale est caractérisée en orange.

b) Phase méthodologique 2 : Analyse des données

vi. Remplissage de la matrice d'analyse

Un second type de matrice, dite matrice d'analyse, permet de quantifier les comportements des opérateurs lors de l'analyse des données réelles et de comptabiliser les transitions observées. Une fois remplie, la matrice représente la trajectoire des opérateurs au sein de DSM. Notons que le premier type de matrice, dite matrice calque, est ensuite utilisée pour mettre en relief les comportements risqués observés lors de l'analyse. Chaque cellule de la matrice d'analyse est caractérisée par un chiffre représentant la somme des transitions observées pour chacune des transitions. Sur la base de ces fréquences observées, la probabilité de passage d'un état initial (i.e. un état colonne) à un état final (i.e. un état ligne) est calculée. Pour chaque état colonne, le calcul de la probabilité de passage de l'état colonne à chacun des états ligne repose sur, la fréquence observée de chacune des transitions, divisée par, la somme des transitions observées pour l'état concerné.

Le remplissage de la matrice d'analyse nécessite une phase d'observation et de codage des comportements. Cette phase est possible via l'enregistrement des situations de travail puis l'analyse, a posteriori, des comportements des opérateurs.

Nous détaillerons ici la méthodologie de codage des comportements composée des 5 étapes suivantes : retranscription des vidéos, identification des variables, identification de l'état, identification de la contrainte, remplissage de la matrice d'analyse.

➤ Retranscription des vidéos

La première étape consiste à retranscrire les vidéos mettant en scène un ou plusieurs opérateurs devant contrôler une situation de travail précise. Chaque opérateur est, dans un premier temps, associé à un code permettant d'identifier clairement sa spécialité professionnelle et son genre. Dès lors que deux opérateurs partagent la même spécialité, une numérotation est ajoutée pour éviter toute confusion. Ainsi, TECH1_H ; ART3_F ; ING-Cal_F sont des exemples de dénominations pouvant illustrer respectivement un technicien de maintenance, un artisan ou encore une ingénieure calcul.

Selon les objectifs de l'analyse, plusieurs types de comportements peuvent être observés : ce que disent les opérateurs et/ou ce que font les opérateurs. Tandis que le premier codage retranscrit mot pour mot le discours des opérateurs, le second met en évidence leurs comportements moteurs (e.g. manipulation d'objet, déplacements, actions sur un dispositif...). L'étape de retranscription des vidéos se réalise individuellement, un opérateur à la fois. Dès lors que l'opérateur en question dit quelque chose, la phrase est codée, depuis la majuscule jusqu'à la ponctuation indiquant la fin de la phrase. À chaque nouvelle phrase correspond une nouvelle ligne de code. Dès lors que l'opérateur réalise une action motrice, cette dernière est codée depuis le début de l'action jusqu'à son interruption ou la fin de sa réalisation. À chaque fois, le temps associé au comportement est relevé dans la vidéo.

Ainsi, une ligne de code se compose des éléments suivants : « Code_Opérateur ; Temps ; Discours ou Action ». Une fois retranscrit, les discours et les actions motrices de chaque opérateur sont regroupés dans un seul et même tableau dont les lignes sont classées en fonction du temps.

➤ Identification des variables

Comme évoqué précédemment, la première étape de modélisation consiste à caractériser chaque état par une liste de variables essentielles à l'atteinte de l'état. Sur la base de cette liste, cette seconde phase de codage consiste à attribuer une variable à chaque comportement précédemment retranscrit. L'objectif étant d'identifier à quelle variable de cette liste se réfère le comportement observé. La ligne de code est alors dotée d'un élément supplémentaire (i.e. la variable) et devient « Code_Opérateur ; Temps ; Discours ou Action ; Variable ». Si un comportement ne relève d'aucune variable, ce dernier est grisé et n'est pas codé.

➤ Identification de l'état

Une fois la variable identifiée, cette dernière est rattachée à l'état auquel elle appartient. Initialement, chaque état est caractérisé par une liste de variable. Ici le processus est inverse, à partir des variables il est possible d'identifier dans quel état l'opérateur se situe compte tenu de son discours et de ses actions motrices. Le codage est à nouveau doté d'un élément supplémentaire (i.e. l'état) et devient « Code_Opérateur ; Temps ; Discours ou Action ; Variable ; État ».

➤ Identification de la contrainte

Dans la même logique, une fois l'état identifié, ce dernier est rattaché à une contrainte. Le codage est à nouveau doté d'un élément supplémentaire (i.e. la contrainte) et devient « Code_Opérateur ; Temps ; Discours ou Action ; Variable ; État ; Contrainte ». Ainsi, depuis la retranscription des vidéos et en passant par différentes étapes de codage qui permettent d'identifier, pour chaque comportement, une variable, un état, puis une contrainte, nous sommes capables de mettre en évidence comment les opérateurs répartissent leurs actions de contrôle au regard des états et des contraintes constituant notre modèle. Chaque comportement étant perçu comme une transition dans un espace d'état.

➤ Remplissage de la matrice

Une fois toute la vidéo retranscrite et codée, les transitions entre états sont comptabilisées et stockées dans la matrice d'analyse. Chaque cellule de la matrice étant marquée par un chiffre indiquant la somme des transitions observées pour la transition concernée. Ces « scores » sont ensuite exprimés en termes de probabilité de passage d'un état à un autre. Notons que les matrices peuvent être développées à l'échelle d'une équipe tout opérateur confondu, de façon individuelle pour chaque opérateur ou pour des groupes d'individus ayant des caractéristiques communes.

vii. Analyse et interprétation des données

Une fois la matrice d'analyse remplie, les données obtenues permettent de modéliser les comportements observés comme une succession de transitions dans un espace d'état. Les transitions les plus probables sont identifiées et permettent de mettre en lumière les « chemins » privilégiés par les opérateurs. La matrice calque permet ensuite de faire ressortir les transitions risquées, situées dans les zones inattendues ou interdites préalablement définies, qui nécessitent une analyse qualitative plus approfondie.

Les objectifs étant de (i) mettre en évidence la variabilité du système, (ii) identifier les trajectoires les plus probables, (iii) mener une analyse qualitative approfondie permettant l'identification des besoins en termes de conception.

IV. Première application à la prise en charge d'une urgence pédiatrique

Sur la base de la première application de la méthode hCWA au domaine de l'urgence médicale et de nos travaux précédents, les trois contraintes délimitant l'espace de travail restent identiques à celles retenus dans nos travaux précédents : la contrainte de soin au patient (SP), la contrainte de gestion des tâches (GT), la contrainte de traitement de l'information (TI). L'objectif étant de tenter de modéliser les trajectoires des opérateurs au sein de cet espace.

Le processus de modélisation SSS sera ici appliqué à l'analyse d'une situation d'urgence pédiatrique en contexte de simulation. Les vidéos enregistrées lors des travaux menés dans le cadre du projet « Coordinateur » (Section 3 – Cas applicatif 1) constituent nos données d'analyse. Pour rappel, 52 praticiens (33 femmes et 19 hommes) répartis en huit équipes avaient participé à cette étude. Les 6 équipes ayant pris en charge un cas de choc septique constituent les données d'analyse.

a) Phase méthodologique 1 : Création du modèle

- i. Identification des états critiques de la tâche et des variables propres à chaque état

Sur la base de l'étude de documents médicaux propres à l'urgence médicale et à la prise en charge du choc septique ou sepsis, un modèle de la tâche est développé (AMLS 2013 ; Leclerc et al. 2002 ; Martin & Brun-Buisson 2007). L'objectif étant de mettre en évidence les états suffisants et nécessaires que les opérateurs doivent contrôler pour assurer la prise en charge d'un choc septique en pédiatrie. Une fois validé par un médecin expert en anesthésie, le modèle proposé se compose de 11 états, chacun pouvant être atteint ou non atteint. Chaque état est ensuite caractérisé en termes de variables essentielles, autrement dit les opérations nécessaires à l'atteinte de l'état (Tableau 11).

Tableau 11 : Présentation des 11 états et de la liste de variable associée à chacun des états.

États	Variables
État infectieux identifié	<ul style="list-style-type: none"> - Reconnaître la tachycardie (trouble cardiaque) - Fc (> 140 battements par min) - Reconnaître la tachypnée (trouble respiratoire) - Fr (> 22 cycles par min) - Identifier des troubles de la conscience, des comportements anormaux - Vérifier la coloration capillaire - Rechercher des marbrures, tâches, rougeur - Vérifier les urines (oligurie – couche sèche) - Recueillir les impressions des parents - Recueillir les antécédents du patient
État infectieux compris	<ul style="list-style-type: none"> - Rechercher un contexte de diarrhée, vomissement, douleur - Contrôler la température - Fièvre (>38) ou Hypothermie (<36) - Réaliser un bilan biologique (NFS, Plaquette, Globules rouge et blancs) - Contrôler le lactate - Contrôler la glycémie (Dextro) - Rechercher un foyer infectieux urinaire (poser une sonde urinaire, ECBU)

	<ul style="list-style-type: none"> - Rechercher un foyer infectieux pulmonaire, abdominal, vésiculaire (radiologie ou échographie) - Rechercher systématiquement un purpura - Questionner les collègues sur les soins passés
Procédure d'urgence déclenchée	<ul style="list-style-type: none"> - Appeler à l'aide - Déclencher le bip urgence
Conditionnement technique réalisé	<ul style="list-style-type: none"> - Organiser l'espace (hauteur du lit, position du patient...) - Libérer les Voies Aériennes Supérieures (VAS) - Poser une voie veineuse périphérique 1 - Poser une seconde voie veineuse périphérique
Oxygénothérapie assurée	<ul style="list-style-type: none"> - Assurer une ventilation à 100% d'O₂ - Installer un masque haute concentration ou des lunettes
Réponse thérapeutique surveillée	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôler l'hypotension réfractaire au remplissage vasculaire - Surveiller les constantes <ul style="list-style-type: none"> Tension Pouls Fréquence cardiaque (Fc) Fréquence respiratoire (Fr) Saturation (SpO₂) Pression artérielle moyenne (PAM) Pression artérielle systolique (PAS) - Contrôler le temps - Assurer le remplissage de la feuille de surveillance
Remplissage injecté	<ul style="list-style-type: none"> - Prescrire le remplissage - Calculer les doses nécessaires au remplissage - Remplir le patient (sérum physiologique - cristalloïdes)
Soutien anti-infectieux injecté	<ul style="list-style-type: none"> - Prescrire les antibiotiques (Claforan – Rocéphine) - Calculer les doses - Purger avant injection
Soutien hémodynamique injecté	<ul style="list-style-type: none"> - Prescrire rapidement les catécholamines (adrénaline, noradrénaline, dopamine) - Injecter le traitement - Rincer après administration
Détresses associées (cardiaque et/ou respiratoire) contrôlées	<ul style="list-style-type: none"> - Intuber le patient si détresse respiratoire - Assurer la ventilation post-intubation - Réaliser le massage cardiaque en cas d'Arrêt Cardio Respiratoire (ACR)
Soutien logistique et transfert en réa assuré	<ul style="list-style-type: none"> - Appeler la réanimation - Organiser le transfert

ii. Caractérisation des états au regard des contraintes

Chaque état est ensuite caractérisé au regard des contraintes. Cette caractérisation repose sur un critère de criticité. En effet, comme évoqué précédemment, un état possède 3 coordonnées au sein de DSM, une sur chaque contrainte. Cependant, seule la contrainte la plus critique est utilisée pour caractériser l'état. Ainsi, pour chaque état, l'objectif est de répondre à la question suivante : pour quelles raisons les opérateurs ne seraient-ils pas en mesure d'atteindre l'état donné ? Du fait de problèmes liés à la gestion des informations (TI), du fait de problèmes liés à la répartition des tâches ou la manipulation des objets (GT) ou encore du fait de certaines lacunes de connaissances/compétences médicales (SP) ?

Au sein de notre modèle, l'atteinte des états « état infectieux identifié », « état infectieux compris », « réponse thérapeutique surveillée », et « soutien logistique et transfert en réanimation assuré » dépend

essentiellement de la qualité et la quantité des informations recueillies. En effet, si l'opérateur n'est pas en mesure de recueillir les données physiologiques du patient, de questionner les parents, de communiquer avec ses collègues quant à la situation et/ou la mise en place d'examen supplémentaires, ou encore, s'il ne parvient pas à établir un tableau clinique précis sur la base des informations dont il dispose, alors il lui sera difficile d'atteindre ces états. Des problèmes de communication ou des informations manquantes constituent donc le principal risque pouvant compromettre l'atteinte de ces états alors caractérisés « TI : Traitement de l'information ».

Concernant les états « procédure d'urgence déclenchée » et « conditionnement technique réalisé », le risque repose essentiellement sur une incapacité à manipuler le téléphone permettant l'envoi du code d'urgence, des difficultés techniques à organiser l'espace, à adapter le lit du patient ou encore à manipuler les outils permettant la pose du cathéter intra-osseux (KTO). Ainsi, ces états sont caractérisés « GT : Gestion des tâches ».

Pour finir, l'atteinte des états « oxygénothérapie assurée », « remplissage injecté », « soutien anti-infectieux injecté », « soutien hémodynamique injecté », et « détresses associées (cardiaque et/ou respiratoire) contrôlées » relève essentiellement de la connaissance médicale pure concernant le choix des drogues au regard des symptômes, leurs dilutions respectives ou la réalisation des gestes techniques tels que l'intubation ou le massage cardiaque. Ces états constituent des actions de soins directs réalisées sur le patient. Le risque principal est donc lié à des oublis, des compétences médicales limitées, à certaines lacunes de connaissances spécifiques ou au non-respect des procédures de soin (e.g. procédure ACR). Ces états sont donc caractérisés « SP : Soins au patient ».

iii & iv. Classification des états selon une dimension séquentielle de réalisation de la tâche et identification des liens de dépendances entre les états

Après avoir identifiés les états critiques nécessaires à la réalisation de la tâche et les avoir caractérisés au regard des contraintes, l'objectif est de les classer selon une dimension séquentielle puis d'identifier les liens de dépendances qu'ils partagent. Les formes graphiques utilisées pour modéliser ces éléments sont les cercles et les flèches à sens unique. Chaque cercle est un état numéroté en fonction de sa position dans la séquence de réalisation de la tâche. Chaque flèche met en évidence un lien de dépendance entre deux états. Rappelons que le lien de dépendance entre deux états indique un prérequis dans la réalisation des actions où l'atteinte d'un état donné est dépendante de la bonne réalisation d'un état précédent. La figure 30 illustre le modèle que nous proposons pour la prise en charge d'un choc septique en pédiatrie.

Les états 1 et 2 partagent un lien de dépendance. En effet, l'état infectieux ne peut être compris s'il n'est préalablement pas identifié. Les opérateurs doivent avant tout identifier l'état infectieux et orienter ensuite les examens ou la recherche d'information vers une compréhension plus approfondie de la situation. Ainsi, si l'état infectieux n'est initialement pas détecté (i.e. E_1 non atteint), alors l'état concernant la compréhension de la situation ne pourra être atteint (i.e. E_2 non atteint). Le lien de

dépendance entre les états E_1 et E_3 indique que l'état 3 « Procédure d'urgence déclenchée » ne peut être atteint si l'état infectieux n'est préalablement pas identifié. En effet, le déclenchement des procédures d'urgence (i.e. appel à l'aide) n'est pertinent que si la situation critique est rapidement identifiée et que les opérateurs anticipent des besoins supplémentaires en termes de ressources humaines et matérielles. Ainsi, si l'état d'urgence n'est pas identifié, les procédures qui en découlent ne seront pas déclenchées. Pour finir, les liens de dépendances entre les états E_4 ; E_7 ; E_8 ; E_9 indiquent que l'état 4 est un prérequis dans la réalisation des autres états. En effet, avant de pouvoir perfuser des médicaments ou des solutés de perfusion (i.e. remplissage, antibiotiques, catécholamines), il est nécessaire que le patient soit équipé de voies veineuses périphériques. Sans ces accès veineux, l'injection des médicaments est impossible.

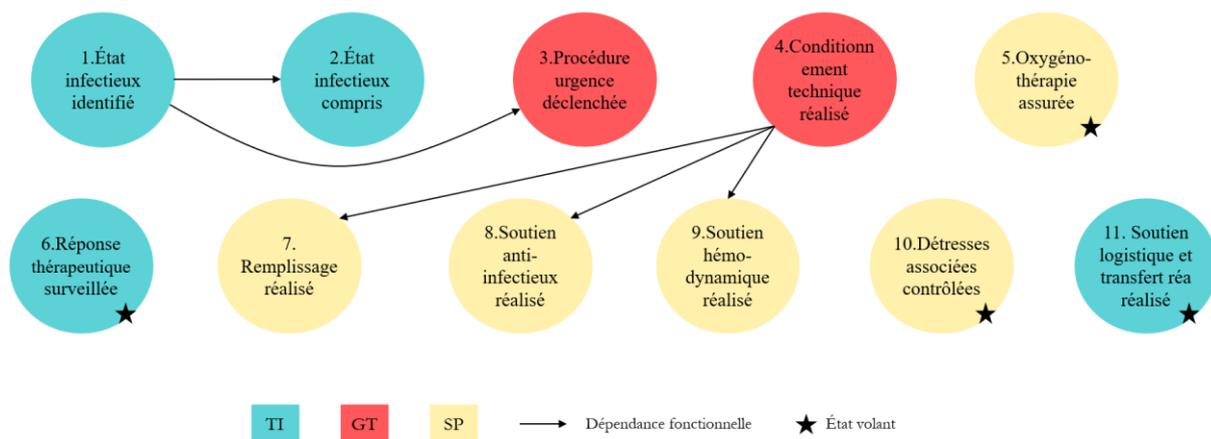


Figure 30 : Modèle SSS de la prise en charge d'un choc septique en pédiatrie.

Les états numérotés de 1 à 11 sont ordonnés selon la séquence de progression dans la tâche et caractérisés au regard des contraintes. Des liens de dépendances entre les états $1 \rightarrow 2$; $1 \rightarrow 3$; $4 \rightarrow 7$; $4 \rightarrow 8$; $4 \rightarrow 9$ sont identifiés. Les états ne possédant aucun lien de dépendance sont caractérisés d'états volants.

Les états E_5 ; E_6 ; E_{10} et E_{11} ne partagent pas de liens de dépendances avec les autres états et sont considérés comme des états volants. En effet, leur position dans le modèle indique que leur réalisation est nécessaire à la prise en charge du choc septique et que l'on s'attend à ce que l'état 5, par exemple, soit réalisé après l'état 4 et avant l'état 6. Cependant, du fait de l'absence de contrainte fonctionnelle, ces états « volants » peuvent être atteints à d'autres moments dans la séquence de progression de la tâche. Une attention toute particulière doit être accordée à ces états. En effet, leur réalisation peut venir interférer avec la réalisation d'un autre état et générer des conflits ou des difficultés impactant la bonne prise en charge.

v. Construction de la matrice calque et identification des zones de risques potentiels dans la navigation

Sur la base des états composant le modèle SSS, une matrice d'ordre 11 est construite (i.e. 11 colonnes ; 11 lignes). Les 121 cases qui composent cette matrice représentent l'ensemble des transitions possibles entre les états, autrement dit les degrés de libertés disponibles pour contrôler les contraintes.

Deux calques sont ici proposés. Un premier calque fonctionnel (Figure 31) indique ce qui est « normal », « anormal » ou « impossible » d'un point de vue fonctionnel dans la réalisation des actions. Nous considérons les cellules de la diagonale comme des comportements où les opérateurs bouclent sur le même état. Même si ces comportements sont synonymes de stabilité, les cases sont caractérisées en orange dans le but d'identifier rapidement des comportements suspects qui pourraient être risqués. La partie haute de la diagonale est également caractérisée en orange. En effet, d'un point de vue fonctionnel, la progression dans la tâche se fait au regard de la dimension séquentielle ayant permis de classer les états, depuis l'état E_1 vers l'état E_{11} . Tout retour en arrière peut mettre en évidence un potentiel problème et nécessite une analyse supplémentaire. À titre d'exemple, un retour en arrière depuis l'état E_{11} vers l'état E_4 peut indiquer que le transfert en réanimation n'a pas été anticipé/préparé et nécessite la mise en place d'une nouvelle voie veineuse périphérique pour assurer le transport. Quant aux transitions $E_1 \rightarrow E_{11}$; $E_2 \rightarrow E_{11}$ et $E_3 \rightarrow E_{11}$, nous considérons qu'elles sont inattendues. En effet, les 3 premiers états sont des états complexes où l'équipe soignante est souvent en faible nombre, où l'état du patient se détériore et où une compréhension rapide de la situation est nécessaire pour mettre en place des thérapeutiques appropriées et faire appel à du soutien. Une transition vers l'état relatif au transfert en réanimation ne serait pas appropriée. Sur la base des liens de dépendances identifiés dans le modèle, les transitions inverses aux liens de dépendance sont jugées impossibles et sont caractérisées en rouge. Par exemple, si la voie veineuse doit être posée avant d'injecter les médicaments, un retour en arrière depuis l'étape d'injection vers l'étape d'installation de la voie indique un problème. En effet, soit le prérequis n'a pas été réalisé et cet oubli oblige les opérateurs à retourner en arrière dans la progression de la tâche, soit la voie posée n'est pas fonctionnelle ou défectueuse.

↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Boucle sur le même état	Impossible	Impossible	Retour en arrière	Retour en arrière	Cycle de surveillance	Retour en arrière				
2	Lien de DF	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Retour en arrière	Retour en arrière	Cycle de surveillance	Retour en arrière				
3	Lien de DF	Normal	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Retour en arrière	Cycle de surveillance	Retour en arrière				
4	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Cycle de surveillance	Impossible	Impossible	Impossible	Retour en arrière	Retour en arrière
5	Normal	Normal	Normal	Normal	Boucle sur le même état	Cycle de surveillance	Retour en arrière				
6	Cycle de surveillance	Cycle de surveillance	Cycle de surveillance	Cycle de surveillance	Cycle de surveillance	Cycle de surveillance	Cycle de surveillance				
7	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Lien de DF	Normal	Cycle de surveillance	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Retour en arrière	Retour en arrière	Retour en arrière
8	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Lien de DF	Normal	Cycle de surveillance	Normal	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Retour en arrière	Retour en arrière
9	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Lien de DF	Normal	Cycle de surveillance	Normal	Normal	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Retour en arrière
10	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Cycle de surveillance	Normal	Normal	Normal	Boucle sur le même état	Retour en arrière
11	Inattendu	Inattendu	Inattendu	Anticipation	Anticipation	Cycle de surveillance	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Normal	Boucle sur le même état

Figure 31 : Calque fonctionnel.

Le calque fonctionnel proposé identifie les transitions normales (vert), anormales (orange) et impossibles (rouge). Ce calque sert ensuite de grille de lecture pour comprendre les comportements observés.

Pour finir, toutes les cellules restantes de la matrice mettent en évidence des comportements normaux de progression dans la tâche. Nous considérons que les comportements propres à l'état E_6 illustrent un cycle de surveillance continu des constantes physiologiques et relèvent de comportements normaux et nécessaires pour un suivi précis de l'évolution du patient. Les transitions imposées par la présence des liens de dépendances fonctionnelles ainsi que les comportements d'anticipation sont identifiées. À titre d'exemple, une transition depuis E_1 vers E_4 met en évidence des comportements d'anticipation. Compte tenu des informations disponibles, le médecin anticipe le besoin de traitement rapide et lourds et demande que les voies veineuses soient immédiatement posées. Pendant que l'équipe paramédicale se charge d'équiper le patient, le médecin poursuit son cheminement diagnostique.

Un second calque cognitif (Figure 32) mettant en évidence ce qui relève de situation « normale », « anormale » ou « impossible » en termes de processus cognitifs de raisonnement et de résolution de problème est également proposé. À l'inverse du calque fonctionnel où les retours en arrière sont problématiques et peuvent indiquer des problèmes dans la réalisation de la tâche, le calque cognitif considère ces comportements comme normaux. En effet, ces comportements relèvent de processus de vérification, de rappel des événements ou de soins passés et sont importants pour la compréhension de la situation actuelle. Seule la diagonale est caractérisée en orange. Nous considérons que ces transitions peuvent mettre en évidence un effet tunnel, autrement dit un processus où l'opérateur se focalise sur un seul élément de la situation et néglige les autres événements, les autres alternatives ou la nécessité de réaliser d'autres tâches.

↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Boucle sur le même état	Vérification	Vérification	Retour en arrière	Retour en arrière	Cycle de surveillance	Retour en arrière				
2	Lien de DF	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Retour en arrière	Retour en arrière	Cycle de surveillance	Retour en arrière				
3	Lien de DF	Normal	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Retour en arrière	Cycle de surveillance	Retour en arrière				
4	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Cycle de surveillance	Vérification	Vérification	Vérification	Retour en arrière	Retour en arrière
5	Normal	Normal	Normal	Normal	Boucle sur le même état	Cycle de surveillance	Retour en arrière				
6	Cycle de surveillance	Boucle sur le même état	Cycle de surveillance								
7	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Lien de DF	Normal	Cycle de surveillance	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Retour en arrière	Retour en arrière	Retour en arrière
8	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Lien de DF	Normal	Cycle de surveillance	Normal	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Retour en arrière	Retour en arrière
9	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Lien de DF	Normal	Cycle de surveillance	Normal	Normal	Boucle sur le même état	Retour en arrière	Retour en arrière
10	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Cycle de surveillance	Normal	Normal	Normal	Boucle sur le même état	Retour en arrière
11	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Cycle de surveillance	Anticipation	Anticipation	Anticipation	Normal	Boucle sur le même état

Figure 32 : Calque cognitif.

Le calque cognitif proposé identifie les transitions normales (vert) et anormales (orange). Ce calque sert ensuite de grille de lecture pour comprendre les comportements observés.

b) Phase méthodologique 2 : Analyse des données

vi. Remplissage de la matrice d'analyse

Six vidéos ont été utilisées pour illustrer cette première application de la méthode SSS. Ces vidéos sont issues des enregistrements réalisés dans le cadre de l'expérimentation « coordinateur » (Section 3 – Cas applicatif 1).

En accord avec le modèle proposé, à savoir un modèle propre à la prise en charge d'un choc septique, seules les équipes 1 à 6 devant contrôler un scénario de choc septique sont analysées. Ce scénario impliquait un jeune garçon, âgé de 3 ans, présentant une forte fièvre et des vomissements. Amené aux urgences par sa nounou, l'enfant présentait des comportements inhabituels. Le déroulement des scénarios était toujours le même. Dans un premier temps, deux soignants étaient désignés pour pénétrer dans la salle d'urgence et débiter le traitement médical (première vague). Suite à une dégradation rapide et brutale du patient, ce premier binôme déclenchait l'appel d'urgence destiné à faire venir une équipe de soutien. Cette seconde équipe entrait en action (deuxième vague), suivie d'une troisième équipe de soutien quelques minutes plus tard (troisième vague). Chaque vague de soignant impliquait toujours des paires de mêmes spécialités : pédiatre avec infirmière pédiatrique ; médecin urgentiste avec infirmière ; anesthésiste avec infirmière anesthésiste. Les médecins réanimateurs arrivaient seuls lors de l'appel à l'aide pour les équipes 1, 2, 3 et 4.

Sur la base de la méthodologie proposée, ces vidéos ont été entièrement retranscrites (i.e. discours et actions motrices de chaque soignant) puis codées dans le but d'obtenir pour chacune d'elle, une matrice

comptabilisant les transitions observées et les probabilités de passage d'un état à un autre. Une fois analysées et superposées aux matrices calques, ces matrices d'analyse permettent de fournir des indicateurs concernant la façon dont les opérateurs gèrent les degrés de liberté et la variabilité du système et de mettre en lumière des situations potentiellement risquées qui nécessitent une analyse qualitative plus approfondie.

➤ Retranscription des vidéos

Après avoir identifié l'ensemble des soignants impliqués dans la prise en charge du choc septique, un code est attribué à chacun des opérateurs en fonction de sa spécialité médicale et de son genre. Le tableau 12 ci-dessous liste, par ordre d'arrivée dans chacune des 6 vidéos, les soignants impliqués ainsi que leur code.

Les discours des soignants et leurs actions motrices orientées, par exemple, vers la manipulation d'un objet ou la réalisation d'un geste médical technique sont codés de façon individuelle, soignant par soignant. Ainsi, pour les vidéos 1 à 4 composées de 7 soignants, 14 visionnages par vidéo ont été nécessaires pour retranscrire les discours puis les actions motrices de chaque opérateur. Pour les vidéos 5 et 6 composées de 6 soignants, 12 visionnages par vidéo ont été réalisés pour retranscrire les discours puis les actions motrices de chaque opérateur. Pour chaque vidéo, un tableau final retranscrit, en fonction du temps, l'ensemble des comportements observés à l'échelle de l'équipe médicale. Seule les premières minutes de la vidéo 1 serviront ensuite d'exemple et feront l'objet d'une présentation détaillée.

Tableau 12 : Composition des 6 équipes impliquées dans la prise en charge du choc septique en simulation ainsi que le code associé à chaque soignant.

Vidéo	Équipe médicale	Code
Vidéo 1 Scénario - Choc Septique	Infirmière	IDE1 F
	Médecin Pédiatre	Med Ped H
	Médecin Urgentiste	Med Urg H
	Infirmière	IDE2 F
	Médecin Anesthésiste	Med Anes F
	Infirmier Anesthésiste	IADE H
	Médecin Réanimateur	Med Rea H
Vidéo 2 Scénario - Choc Septique	Infirmière	IDE1 F
	Médecin Pédiatre	Med Ped F
	Infirmière	IDE2 F
	Médecin Urgentiste	Med Urg H
	Médecin Anesthésiste	Anes H
	Infirmière Anesthésiste	IADE F
	Médecin Réanimateur	Med Rea H
Vidéo 3 Scénario - Choc Septique	Infirmière	IDE1 F
	Médecin Pédiatre	Med Ped F
	Médecin Urgentiste	Med Urg H
	Infirmier	IDE2 H
	Médecin Anesthésiste	Anes F
	Infirmière Anesthésiste	IADE F
	Médecin Réanimateur	Med Rea F
	Médecin Pédiatre	Med Ped F

Vidéo 4 Scénario – Choc Septique	Infirmière	IDE1 F
	Médecin Urgentiste	Med Urg F
	Infirmière	IDE2 F
	Médecin Anesthésiste	Anes F
	Infirmière Anesthésiste	IADE F
	Médecin Réanimateur	Med Rea H
Vidéo 5 Scénario – Choc Septique	Infirmière	IDE1 F
	Médecin Pédiatre	Med Ped H
	Médecin Urgentiste	Med Urg H
	Infirmière	IDE2 F
	Médecin Anesthésiste	Anes H
	Infirmière Anesthésiste	IADE F
Vidéo 6 Scénario – Choc Septique	Médecin Urgentiste	Med Urg H
	Infirmière	IDE1 F
	Infirmière	IDE2 F
	Médecin Pédiatre	Med Ped H
	Médecin Anesthésiste	Anes F
	Infirmier Anesthésiste	IADE H

➤ Identification des variables

Sur la base de la liste des variables et états du modèle SSS (Tableau 11), et du tableau de retranscription de la vidéo 1 (Tableau 13), chaque ligne du tableau est associée à une variable. Par exemple, la ligne de code « Med_Ped_F ; 2'13 ; *Il est bleu ...* » est associée la variable « Vérifier la coloration capillaire ». La ligne de code « IDE1_F ; 3'02 ; *Je vais regarder si je peux lui mettre une voie* » est associée à la variable « Poser une voie veineuse périphérique 1 ». En ce qui concerne les actions motrices le processus est le même. La ligne de code « Med_Ped_F ; 2'41 ; Action : Ventilation » est associée la variable « Assurer une ventilation à 100% d'O₂ ».

➤ Identification des états

Après avoir identifié les variables, chaque ligne de code est rattachée à un état (Tableau 13). Sur la base des mêmes exemples que précédemment, la ligne de code « Med_Ped_F ; 2'13 ; *Il est bleu ...* ; Vérifier la coloration capillaire » est alors associée à l'état n°1 « État infectieux identifié ». La ligne de code « IDE1_F ; 3'02 ; *Je vais regarder si je peux lui mettre une voie* ; Poser une voie veineuse périphérique 1 » est alors associée à l'état n°4 « Conditionnement technique réalisé ». Pour finir, la ligne de code « Med_Ped_F ; 2'41 ; Action : Ventilation ; Assurer une ventilation à 100% d'O₂ » est associée à l'état n°5 « Oxygénothérapie assurée ».

➤ Identification des contraintes

Dans la même logique et une fois les états identifiés, chaque ligne de code est rattachée à la contrainte propre à l'état concerné. Ainsi, la ligne de code « Med_Ped_F ; 2'13 ; *Il est bleu ...* ; Vérifier la coloration capillaire ; 1.État infectieux identifié » est associée à la contrainte « TI ». La ligne de code « IDE1_F ; 3'02 ; *Je vais regarder si je peux lui mettre une voie* ; Poser une voie veineuse périphérique 1 ; 4.Conditionnement technique réalisé » est caractérisée au regard de la contrainte « TI ». Pour finir, la ligne de code « Med_Ped_F ; 2'41 ; Action : Ventilation ; Assurer une ventilation à 100% d'O₂ ;

Oxygénothérapie assurée » est associée à la contrainte « SP ». Une fois les variables, les états et les contraintes identifiées, le tableau final (Tableau 13) sert de base au remplissage de la matrice d'analyse.

➤ Remplissage de la matrice

Une fois toute la vidéo retranscrite et codée (Tableau 13), les transitions entre états sont comptabilisées en termes de fréquences et stockées dans la matrice d'analyse. Les probabilités de passage, d'un état à un autre, sont ensuite calculées (Figure 33). Afin d'illustrer l'étape de remplissage de la matrice d'analyse, basons-nous sur les comportements présentés dans le Tableau 13. Ce tableau montre les 17 premières lignes de code de la vidéo 1, chacune étant caractérisée au regard des variables, des états et des contraintes constituant notre modèle SSS. Sur la base du tableau de retranscription, nous considérons qu'une transition correspond au passage d'une ligne à une autre. Ainsi, dans cet exemple, 16 transitions sont identifiées : $1 \rightarrow 1$; $1 \rightarrow 5$; $5 \rightarrow 6$; $6 \rightarrow 6$; $6 \rightarrow 2$; $2 \rightarrow 5$; $5 \rightarrow 2$; $2 \rightarrow 6$; $6 \rightarrow 4$; $4 \rightarrow 6$; $6 \rightarrow 1$; $1 \rightarrow 2$; $2 \rightarrow 6$; $6 \rightarrow 6$; $6 \rightarrow 6$; $6 \rightarrow 2$.

Somme des transitions observées												Probabilité de passage d'un état à un autre											
↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0,25	0,00	-	0,00	0,00	0,14	-	-	-	-	-
2	1	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	2	0,25	0,00	-	0,00	0,50	0,29	-	-	-	-	-
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,14	-	-	-	-	-
5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0,25	0,50	-	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
6	1	1	0	1	1	3	0	0	0	0	0	6	0,25	0,50	-	1,00	0,50	0,43	-	-	-	-	-
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-

Figure 33 : Matrice d'analyse remplie sur la base du codage issu de l'observation des deux premières minutes de la vidéo 1.

À partir de la somme des fréquences des transitions observées (matrice de gauche), la probabilité de passage d'un état à un autre est calculée pour chaque état (matrice de droite).

Tableau 13 : Retranscription et codage des comportements de la vidéo 1.

Seules les 2 premières minutes sont illustrées ici. Chaque ligne de code est composée d'un code opérateur, du temps auquel le comportement a lieu dans la vidéo et une retranscription du comportement observé. Chaque comportement est ensuite associé à une variable, puis un état, puis une contrainte.

Opérateur	Temps	Discours / Action	Variable	État		Contrainte
IDE1_F	1'56	Vous l'avez trouvé comment ?	Recueillir les impressions des parents	État infectieux identifié	1	TI
Med_Ped_F	2'13	Il est bleu ...	Vérifier la coloration capillaire	État infectieux identifié	1	TI
Med_Ped_F	2'18	Vous croyez qu'il faut que je le ventile ?	Assurer une ventilation à 100% d'O ₂	Oxygénothérapie assurée	5	SP
Med_Ped_F	2'21	Quelle SAT il a là ?	Surveiller les constantes	Réponse thérapeutique surveillée	6	TI
IDE1_F	2'27	SAT j'ai branché, on est bon, on est à 93.	Surveiller les constantes	Réponse thérapeutique surveillée	6	TI
IDE1_F	2'32	Action : Pique pour bilan	Réaliser un bilan biologique	État infectieux compris	2	TI
Med_Ped_F	2'41	Action : Ventilation	Assurer une ventilation à 100% d'O ₂	Oxygénothérapie assurée	5	SP
IDE1_F	2'43	On va lui faire un petit dextro.	Contrôler la glycémie (Dextro)	État infectieux compris	2	TI
Med_Ped_F	3'02	Mais là il a une bonne SAT ce n'est pas la peine ...	Surveiller les constantes	Réponse thérapeutique surveillée	6	TI
IDE1_F	3'02	Je vais regarder si je peux lui mettre une voie.	Poser une voie veineuse périphérique 1	Conditionnement technique réalisé	4	GT
IDE1_F	3'09	La respi je n'ai rien !	Surveiller les constantes	Réponse thérapeutique surveillée	6	TI
Med_Ped_F	3'26	Mais alors vous l'avez trouvé pâle, il a perdu connaissance ?	Recueillir les impressions des parents	État infectieux identifié	1	TI
Med_Ped_F	3'34	Il a de la fièvre ?	Contrôler la température	État infectieux compris	2	TI
Med_Ped_F	3'46	Et sa fréquence respiratoire elle est à combien ? 33 ?	Surveiller les constantes	Réponse thérapeutique surveillée	6	TI
IDE1_F	3'48	Oui 33 !	Surveiller les constantes	Réponse thérapeutique surveillée	6	TI
Med_Ped_F	3'50	Action : Auscultation	Surveiller les constantes	Réponse thérapeutique surveillée	6	TI
IDE1_F	3'58	Oui on va lui faire un petit bilan parce que ...	Réaliser un bilan biologique	État infectieux compris	2	TI
...

c) Résultats

Sur la base des transitions réalisées par chacune des équipes, la figure 34 présente la probabilité moyenne de passage d'un état colonne à un état ligne ainsi que l'intervalle de confiance à 95% mis en évidence entre crochet.

Les résultats montrent que pour les états 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 et 10, la transition la plus probable est la transition correspondant à une boucle sur le même état, autrement dit lorsque l'état initial est égal à l'état final. Concernant l'état 11, les transitions les plus probables se dirigent vers les états E_2 et E_9 .

↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,27 [0,15]	0,15 [0,09]	0,02 [0,05]	0,06 [0,08]	0,08 [0,10]	0,09 [0,03]	0,02 [0,04]	0,00 [0,00]	0,01 [0,02]	0,02 [0,03]	0,00 [0,00]
2	0,12 [0,13]	0,28 [0,16]	0,00 [0,00]	0,07 [0,06]	0,04 [0,08]	0,09 [0,04]	0,03 [0,05]	0,11 [0,18]	0,09 [0,11]	0,03 [0,04]	0,29 [0,50]
3	0,01 [0,02]	0,01 [0,02]	0,30 [0,28]	0,04 [0,05]	0,06 [0,08]	0,03 [0,01]	0,02 [0,04]	0,00 [0,00]	0,00 [0,00]	0,01 [0,02]	0,00 [0,00]
4	0,11 [0,10]	0,11 [0,08]	0,18 [0,21]	0,38 [0,08]	0,18 [0,25]	0,09 [0,06]	0,18 [0,14]	0,04 [0,07]	0,04 [0,06]	0,05 [0,04]	0,16 [0,25]
5	0,10 [0,10]	0,01 [0,02]	0,04 [0,07]	0,06 [0,03]	0,31 [0,17]	0,05 [0,04]	0,00 [0,00]	0,00 [0,00]	0,01 [0,02]	0,03 [0,04]	0,00 [0,00]
6	0,22 [0,08]	0,14 [0,09]	0,17 [0,20]	0,14 [0,04]	0,21 [0,15]	0,36 [0,07]	0,22 [0,15]	0,20 [0,13]	0,16 [0,12]	0,08 [0,08]	0,04 [0,07]
7	0,05 [0,06]	0,03 [0,05]	0,12 [0,15]	0,07 [0,09]	0,06 [0,08]	0,07 [0,07]	0,29 [0,14]	0,02 [0,06]	0,05 [0,10]	0,04 [0,04]	0,00 [0,00]
8	0,04 [0,07]	0,10 [0,08]	0,00 [0,00]	0,02 [0,04]	0,00 [0,00]	0,03 [0,02]	0,08 [0,11]	0,43 [0,18]	0,06 [0,07]	0,02 [0,03]	0,00 [0,00]
9	0,00 [0,00]	0,07 [0,07]	0,02 [0,05]	0,06 [0,08]	0,03 [0,06]	0,06 [0,04]	0,11 [0,09]	0,07 [0,10]	0,39 [0,14]	0,05 [0,05]	0,29 [0,50]
10	0,08 [0,08]	0,10 [0,09]	0,13 [0,28]	0,09 [0,08]	0,03 [0,08]	0,13 [0,08]	0,05 [0,06]	0,13 [0,09]	0,19 [0,10]	0,66 [0,12]	0,13 [0,26]
11	0,01 [0,02]	0,00 [0,00]	0,02 [0,05]	0,00 [0,00]	0,00 [0,00]	0,00 [0,00]	0,00 [0,00]	0,01 [0,02]	0,00 [0,00]	0,01 [0,01]	0,11 [0,22]

Figure 34 : Probabilité moyenne de passage d'un état colonne à un état ligne pour les 6 équipes accompagnée de leur intervalle de confiance crochet (95%).

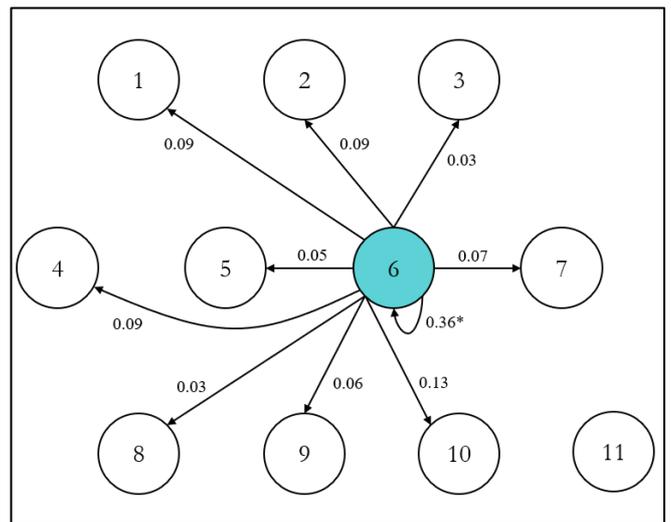
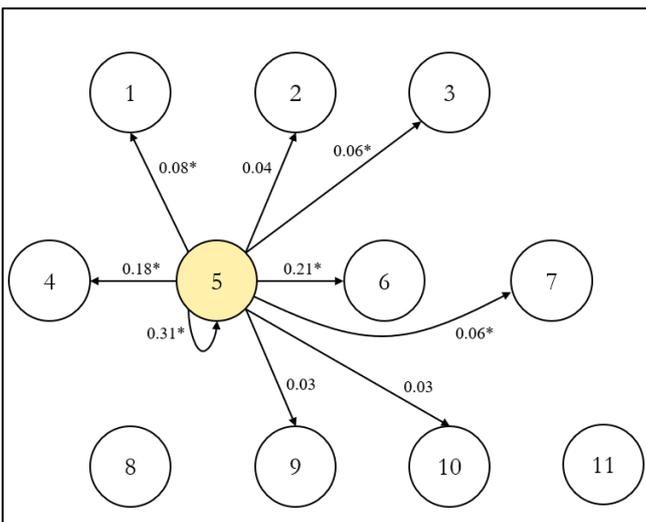
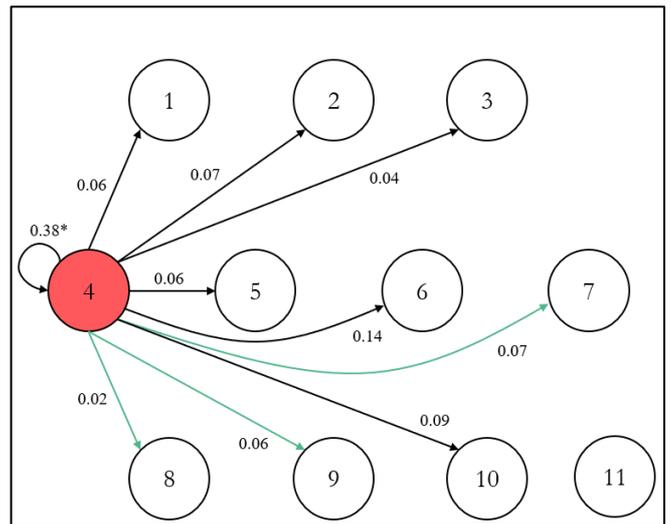
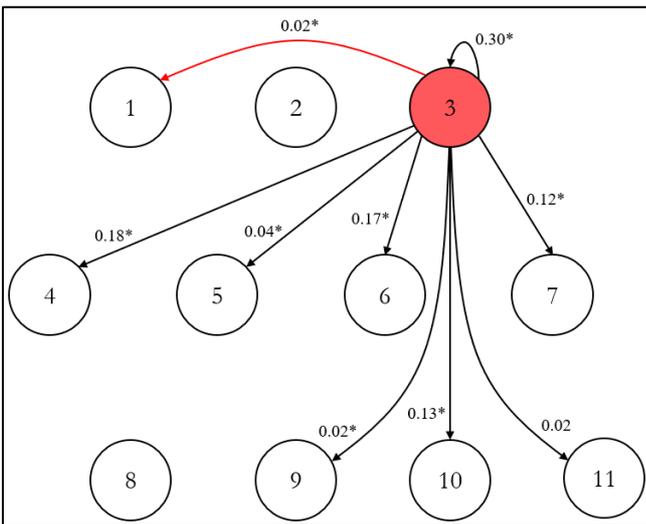
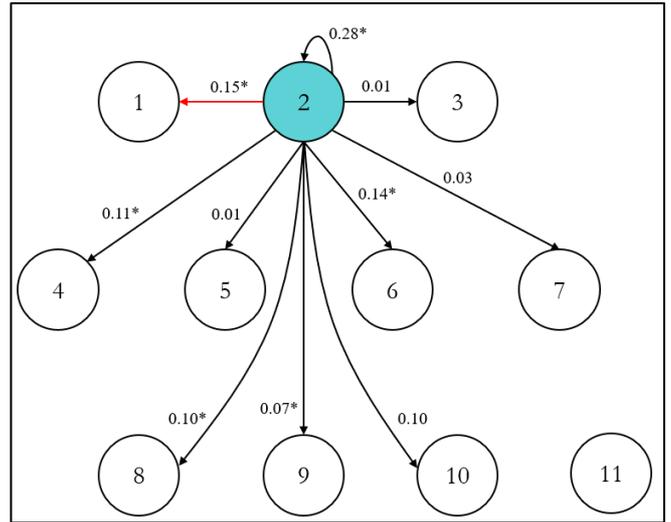
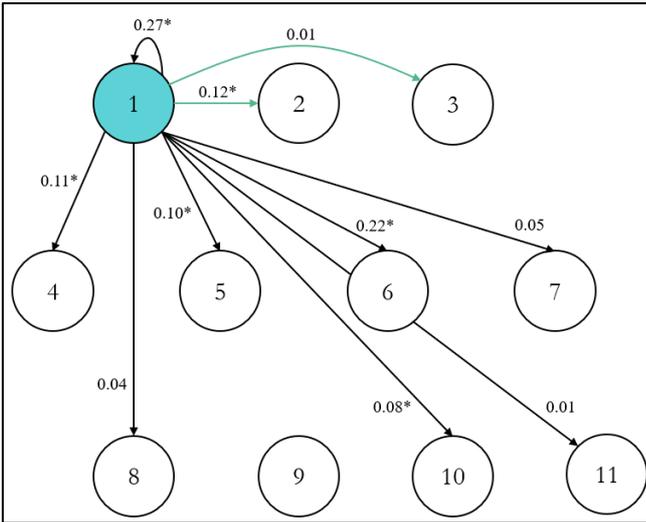
Les cellules colorées en gris foncé représentent les transitions les plus probables au départ de chaque état. Les cellules colorées en gris clair représentent les transitions étant significativement autant probable que la transition la plus probable.

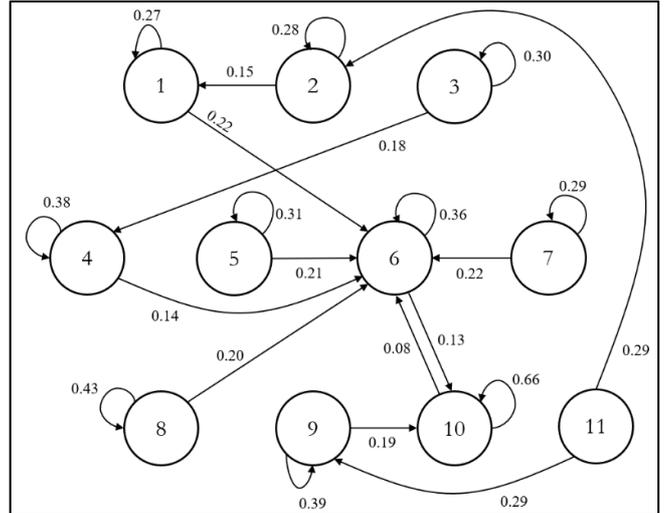
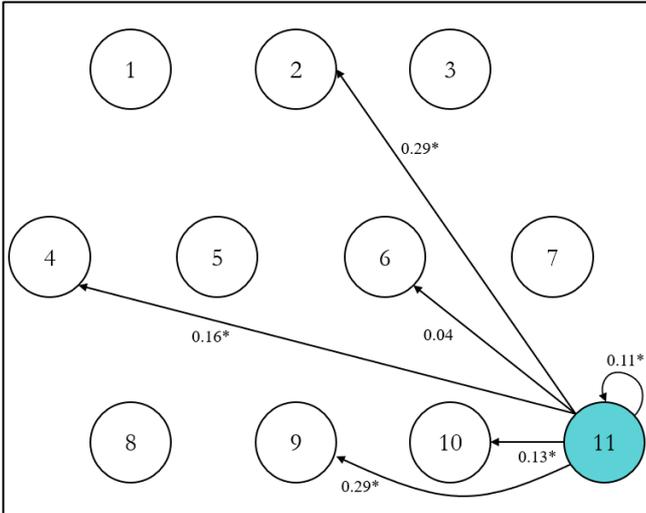
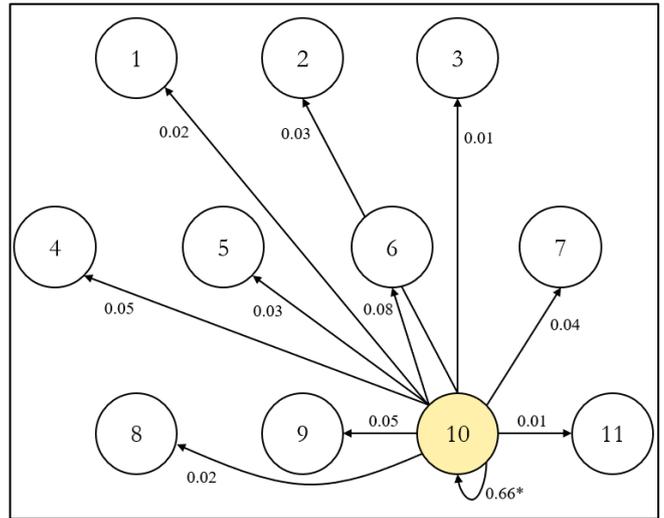
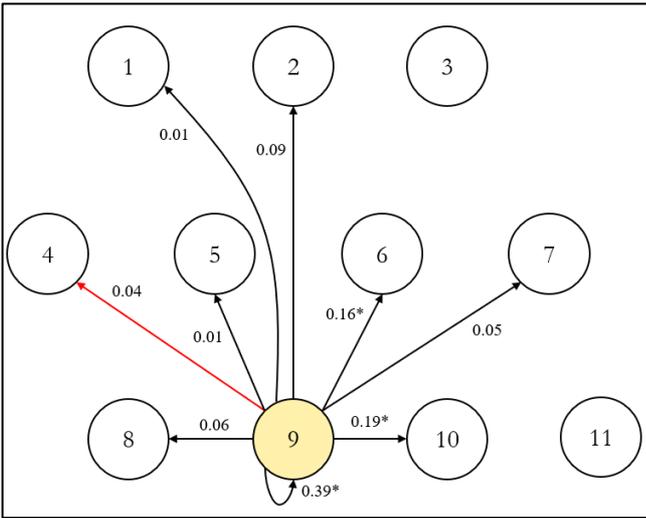
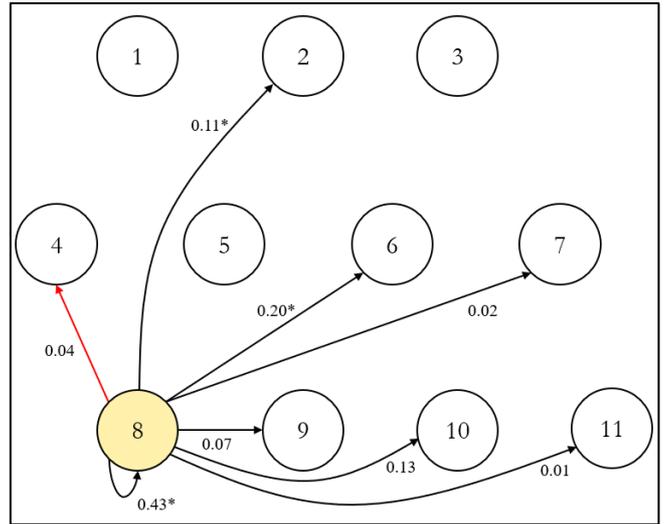
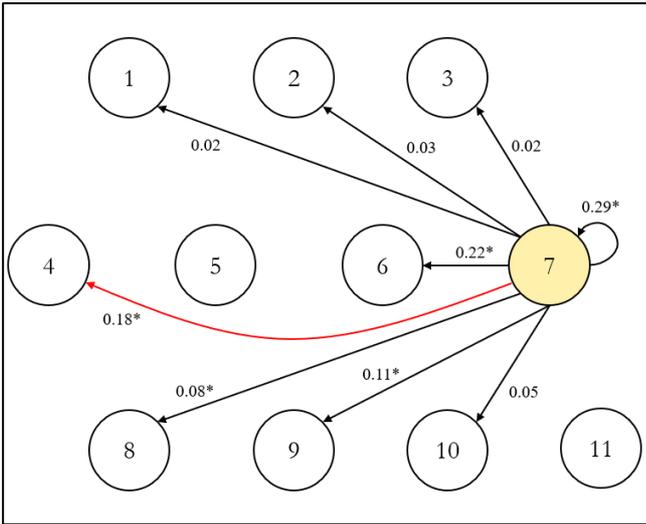
La mesure de l'intervalle de confiance permet d'estimer un ensemble d'états suivants potentiels. Ainsi :

- À partir de l'état 1, la transition la plus probable concerne une transition vers l'état 1 (P=0.27). La mesure de l'intervalle de confiance indique que les équipes ont également une probabilité significative de transiter vers les états E_6 , E_2 , E_4 , E_5 , et E_{10} .

- À partir de l'état 2, la transition la plus probable concerne une transition vers l'état 2 ($P=0.28$). La mesure de l'intervalle de confiance indique que les équipes ont également une probabilité significative de transiter vers les états $E_1, E_6, E_4, E_8, \text{ et } E_9$.
- À partir de l'état 3, la transition la plus probable concerne une transition vers l'état 3 ($P=0.30$). La mesure de l'intervalle de confiance indique que les équipes ont également une probabilité significative de transiter vers les états $E_4, E_6, E_{10}, E_7, E_5, E_1, \text{ et } E_9$.
- À partir de l'état 4, seule la transition vers l'état 4 ($P = 0.38$) possède une probabilité significative.
- À partir de l'état 5, la transition la plus probable concerne une transition vers l'état 5 ($P = 0.31$). La mesure de l'intervalle de confiance indique que les équipes ont également une probabilité significative de transiter vers les états E_6, E_4, E_1, E_3, E_7 .
- À partir de l'état 6, seule la transition vers l'état 6 ($P=0.36$) possède une probabilité significative.
- À partir de l'état 7, la transition la plus probable concerne une transition vers l'état 7 ($P=0.29$). La mesure de l'intervalle de confiance indique que les équipes ont également une probabilité significative de transiter vers les états E_6, E_4, E_9, E_8 .
- À partir de l'état 8, la transition la plus probable concerne une transition vers l'état 8 ($P=0.43$). La mesure de l'intervalle de confiance indique que les équipes ont également une probabilité significative de transiter vers les états E_6, E_2 .
- À partir de l'état 9, la transition la plus probable concerne une transition vers l'état 9 ($P = 0.39$). La mesure de l'intervalle de confiance indique que les équipes ont également une probabilité significative de transiter vers les états E_{10} et E_6 .
- À partir de l'état 10, seule la transition vers l'état 10 ($P=0.66$) possède une probabilité significative.
- À partir de l'état 11, la transition la plus probable concerne une transition vers l'état 2 et l'état 9 ($P=0.29$). La mesure de l'intervalle de confiance indique que les équipes ont également une probabilité significative de transiter vers les états E_4, E_{10} et E_{11} .

Ces premiers résultats montrent que la séquentialité initialement proposée sur la base des procédures médicales n'est pas respectée lors de l'activité réelle. En effet, les trajectoires utilisées par les équipes médicales pour prendre en charge un scénario de choc septique en contexte de simulation sont nombreuses et mettent en évidence une variabilité forte au sein du système. La figure 35 illustre, pour chaque état, l'ensemble des trajectoires possibles ainsi que leurs probabilités respectives.





En plus de mettre en évidence la variabilité dans les trajectoires des opérateurs et de fournir des indications concernant les probabilités de passage d'un état à un autre, la figure 34 montre également que les états 4, 6 et 10 se distinguent des autres états dans le sens où la transition la plus probable concerne uniquement le bouclage sur le même état. La mesure de l'intervalle de confiance indique qu'aucune autre transition est significativement autant probable que la transition en boucle. Ainsi, ces états peuvent être considérés comme stables car l'état initial reste inchangé. Cependant, ce phénomène peut être signe que les opérateurs vérifient chacune des variables essentielles de l'état de façon itérative, ou mettre en évidence un problème empêchant les opérateurs de progresser dans la tâche. Une analyse qualitative serait alors nécessaire pour comprendre comment les opérateurs contrôlent ces états potentiellement risqués respectivement intitulés « Conditionnement technique réalisé » ; « Réponse thérapeutique surveillée » ; « Détresses associées contrôlées ».

Pour finir, la figure 34 fournit des indications permettant de spécifier le modèle, notamment les états initialement jugés d'états volants. Compte tenu des plus fortes probabilités, les résultats indiquent que :

- L'état 5 vient après l'état 1 (P=0.10) et va vers l'état 6 (P=0.21)
- L'état 6 vient après l'état 1 ou 7 (P=0.22) et va vers l'état 10 (P=0.13)
- L'état 10 vient après l'état 9 (P=0.19) et va vers l'état 6 (P=0.08)
- L'état 11 vient après l'état 3 (P=0.02) va vers les états 2 ou 9 (P=0.29)

La figure 36 présente les résultats sous forme de deux matrices où chaque cellule est dotée d'un chiffre présentant la somme des transitions observées pour les 6 équipes. Au total, 1302 transitions ont été observées. La matrice de gauche présente les résultats au regard du calque cognitif. La matrice de droite présente les résultats au regard du calque fonctionnel.

↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	27	12	1	8	5	20	1	0	2	4	0
2	9	39	0	12	3	21	4	7	8	9	2
3	1	1	9	8	3	7	1	0	0	4	0
4	11	11	4	69	12	21	15	3	5	16	2
5	9	2	2	10	23	12	0	0	1	6	0
6	21	15	4	26	14	86	18	16	17	21	1
7	4	5	3	9	3	17	29	3	7	9	0
8	3	10	0	3	0	8	8	31	5	8	0
9	0	7	1	14	3	14	8	5	41	16	2
10	6	7	3	17	3	30	4	9	18	218	1
11	1	0	1	0	0	0	0	1	0	3	3

↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	27	12	1	8	5	20	1	0	2	4	0
2	9	39	0	12	3	21	4	7	8	9	2
3	1	1	9	8	3	7	1	0	0	4	0
4	11	11	4	69	12	21	15	3	5	16	2
5	9	2	2	10	23	12	0	0	1	6	0
6	21	15	4	26	14	86	18	16	17	21	1
7	4	5	3	9	3	17	29	3	7	9	0
8	3	10	0	3	0	8	8	31	5	8	0
9	0	7	1	14	3	14	8	5	41	16	2
10	6	7	3	17	3	30	4	9	18	218	1
11	1	0	1	0	0	0	0	1	0	3	3

Figure 36 : Résultats au regard du calque cognitif (matrice de gauche) et du calque fonctionnel (matrice de droite).

Les cellules représentent la somme des transitions observées pour les 6 équipes.

Une étude approfondie des matrices calques est menée afin de calculer, pour chaque équipe et chaque calque, la répartition des proportions de transitions impossibles (i.e. transitions rouges), anormales (i.e. transitions oranges) et normales (i.e. transitions vertes) observées (Tableau 14).

Tableau 14 : Répartition des proportions des transitions normales (vert), anormales (orange), impossibles (rouge) pour chaque équipe et pour chaque calque.

Les fréquences totales observées entre crochets sont exprimées en pourcentage des actions totales pour chaque équipe et chaque calque.

	Calque Fonctionnel			Calque Cognitif	
	Rouge	Orange	Vert	Orange	Vert
Équipe 1	4.5% [9]	45% [90]	50.5% [101]	35.5% [71]	64.5% [129]
Équipe 2	1.5% [4]	56.7% [153]	41.9% [113]	51.5% [139]	48.5% [131]
Équipe 3	2.3% [4]	55% [94]	42.7% [73]	43.9% [75]	56.1% [96]
Équipe 4	3.9% [10]	54.3% [140]	41.9% [108]	43.4% [112]	56.6% [146]
Équipe 5	1% [2]	43.8% [84]	55.2% [106]	43.8% [84]	56.3% [108]
Équipe 6	3.3% [7]	46.9% [99]	49.8% [105]	44.5% [94]	55.5% [117]
Somme	2.8% [36]	50.7% [660]	46.5% [606]	44.2% [575]	55.8% [727]

Pour le calque fonctionnel, la proportion totale de transitions anormales (S=50,7%) est plus importante que la proportion totale de transitions normales (S=46,5%), elle-même supérieure à la proportion totale de transitions impossibles (S=2,8%). Concernant le calque cognitif, la proportion totale de transitions normales (S=55,8%) est supérieure à la proportion totale de transitions anormales (S=44,2%). Ces résultats révèlent que les transitions initialement jugées anormales ou impossibles par les matrices calques sont fortement utilisées par les opérateurs en situation réelle. Une analyse qualitative approfondie serait alors nécessaire pour comprendre les comportements des opérateurs, notamment en ce qui concerne les transitions rouges et oranges qui sortent du modèle initial attendu. L'objectif étant de faire émerger des solutions techniques ou organisationnelles destinés à soutenir les opérateurs dans la mise en place de ces comportements adaptatifs indispensables pour l'exploration des degrés de liberté et la gestion des situations complexes.

Concernant les liens de dépendances fonctionnelles, le tableau 15 met en évidence la proportion de transition observée pour les transitions dites interdites, à savoir celles qui sont à l'envers du lien de dépendance fonctionnelle, et les transitions obligatoires, à savoir celles caractérisées par un lien de dépendance fonctionnelle. Les résultats indiquent que la proportion de transitions interdites est égale à la proportion de transitions obligatoires. En effet, au total 36 transitions interdites et 36 transitions obligatoires ont été observées pour les 6 équipes. Les transitions interdites et les transitions totales représentent 2,76% des transitions totales des équipes. L'observation des comportements des opérateurs montrent que les liens de dépendances fonctionnelles ne semblent pas être respectés et que des comportements jugés impossibles sont autant observés en situation. À nouveau, une analyse qualitative

serait nécessaire ici pour identifier, dans les vidéos, les comportements associés à ces « retours en arrière interdits » et les raisons de leurs présences.

Tableau 15 : Proportion de transitions obligatoires (i.e. lien de dépendance fonctionnelle) et proportion de transitions interdites (i.e. sens inverse du lien de dépendance fonctionnelle) pour chaque équipe.

Les fréquences totales observées entre crochet sont exprimées en pourcentage des actions totales.

	Total transitions interdites	Total transitions obligatoires (i.e. liens fonctionnels)
Équipe 1	4.50% [9]	4.00% [8]
Équipe 2	1.48% [4]	2.22% [6]
Équipe 3	2.35% [4]	1.76% [3]
Équipe 4	3.88% [10]	2.33% [6]
Équipe 5	1.04% [2]	3.14% [6]
Équipe 6	3.32% [7]	3.32% [7]
Moyenne	2.76% [36]	2.76% [36]

Sur la base des résultats précédents, une analyse qualitative a été menée pour (i) comprendre les comportements des opérateurs lors des transitions interdites et (ii) identifier si les transitions en boucle sur les états 4, 6 et 10 relèvent de situations problématiques ou d'un processus itératif de vérification des variables. Pour chaque équipe, l'ensemble des transitions $E_2 \rightarrow E_1$; $E_3 \rightarrow E_1$; $E_7 \rightarrow E_4$; $E_8 \rightarrow E_4$; $E_9 \rightarrow E_4$ ainsi que les transitions $E_4 \rightarrow E_4$; $E_6 \rightarrow E_6$ et $E_{10} \rightarrow E_{10}$ sont identifiées dans la vidéo et analysées. Les tableaux suivants présentent l'analyse qualitative pour chacune des 6 équipes.

Équipe 1**Description de la situation**

Transition concernée	Moment	Situation
$E_6 \rightarrow E_6$	3'09 – 3'50	Med_Ped_F contrôle la fréquence respiratoire affichée sur le scope et réalise l'auscultation pulmonaire.
$E_6 \rightarrow E_6$	4'07 – 4'11	Med_Ped_F demande à IDE1_F de prendre la tension deux fois car le brassard n'a pas été branché et la tension n'est pas accessible sur le scope.
$E_6 \rightarrow E_6$	4'32 – 4'41	Med_Ped_F annonce à haute voix que le patient s'accélère et souhaite débiter le chronomètre. En même temps elle appuie sur le bouton du scope.
$E_2 \rightarrow E_1$	3'34 – 3'37	Alors que IDE1_F a débuté la prise de sang et le contrôle de la glycémie, Med_Ped_F questionne à nouveau la nounou sur ses impressions et les antécédents du patient. Elle émet à ce moment l'hypothèse du choc septique.
$E_2 \rightarrow E_1$	10'21 – 10'28	Med_Rea_H arrive plus tardivement et vérifie à nouveau les premières variables notamment la présence de tâches cutanées.
$E_7 \rightarrow E_4$	9'41 – 10'16	Alors que IDE1_F et IDE2_F ont fini de préparer le remplissage, elles doivent assister Med_Urg_H dans la pose du KTO avant de pouvoir injecter les doses prescrites.
$E_7 \rightarrow E_4$	11'14 – 11'34	IADE_H demande à ce qu'on baisse la tête de lit pour faciliter la ventilation post-intubation. À la suite de cette demande, Med_Urg_H qui était occupé à la pose du KTO interrompt sa tâche pour baisser la tête de lit.
$E_9 \rightarrow E_4$	8'17 – 8'41	Alors que les drogues se préparent, les soignants se posent la question de savoir si la voie veineuse est enfin posée ou non.
$E_9 \rightarrow E_4$	9'04 – 9'08	IDE2_F a terminé la préparation de l'adrénaline et vient assister Med_Urg_H pour la pose du KTO. Sans le KTO le traitement ne peut être injecté.

Analyse de la situation

Concernant la vidéo 1, les transitions interdites sont essentiellement liées à des difficultés concernant la pose du cathéter intra-osseux (KTO). En effet, alors que l'équipe soignante se situe dans les états 7, 8, 9 relatifs à la préparation et l'injection des drogues, elle ne parvient pas à poursuivre la prise en charge du fait de l'absence de seconde voie (non atteinte de l'état 4). Les difficultés liées à la pose du KTO empêchent les soignants, notamment les infirmières, d'injecter les drogues prêtes et retarde la prise en charge. Cet événement confirme le lien de dépendance existant entre l'état 4 et les états 7, 8, 9.

Suite au visionnage de la vidéo, plusieurs éléments peuvent expliquer le retard pris dans la pose du KTO.

1. Med_Urg_H demande quel âge a l'enfant pour déterminer la taille de l'aiguille KTO mais Med_Ped_F et IDE1_F ne savent pas répondre. Cette information n'a pas été relevée en début de scénario. Med_Ped_F décide alors de sortir pour retrouver la nounou et tenter d'obtenir cette information. Face à cette sollicitation, la nounou entre à nouveau dans la pièce sans y avoir été invitée et vient troubler Med_Urg_H qui débute une conversation avec elle. La pose du KTO est alors interrompue. Ce premier événement met en évidence un problème lié au traitement de l'information et plus précisément au recueil des informations en début de prise en charge. Un recueil d'information incomplet concernant le patient et ses spécificités peut impacter la pose du KTO et avoir des conséquences sur l'injection des drogues. Les informations relatives au patient, telles que son âge ou son poids sont indispensables à la prise en charge pour sélectionner les bons outils, les bonnes drogues en bonne quantité et doivent être recueillies rigoureusement et stockées le plus vite possible. Cet événement peut également être mis en

relation avec la transition $E_2 \rightarrow E_1$ observée entre 3'34 et 3'37 où Med_Ped_F doit revenir une seconde fois sur la variable « température » n'ayant pas été prise en compte initialement.

2. Med_Urg_H effectue les transmissions à l'équipe d'anesthésie qui arrive tout en tentant de poser le KTO. Les transmissions le contraignent à arrêter sa tâche pour se concentrer sur les informations qu'il transmet. Encore une fois, la pose du KTO est mise en attente au profit des transmissions. Ce second événement met en évidence un conflit entre « traitement de l'information » et « gestion des tâches » où Med_Urg_H priorise les transmissions au détriment de la pose du KTO.

3. Med_Urg_H surveille les constantes du patient sur le moniteur, se charge de répartir les tâches tout en ayant le KTO entre les mains. Nous pouvons souligner ici un conflit entre la gestion des compétences techniques (i.e. poser le KTO) et non-techniques (i.e. faire état à haute voix des constantes du patient, distribuer les tâches...). Med_Urg_H est ici impliqué dans le soin et dans la coordination des membres de l'équipe. Cet événement montre que la double gestion CT et CNT est délicate voire impossible. Une tâche se voit priorisée au détriment de l'autre. Ici, Med_Urg_H priorise la gestion de l'équipe, la coordination, l'aspect relationnel avec la nounou ce qui retarde considérablement la pose du KTO et l'injection des drogues.

4. À 9'20, Med_Urg_H parvient à installer le KTO mais ce dernier n'est pas fonctionnel. Le problème est ici purement technique. Med_Urg_H ne sélectionne pas la bonne taille d'aiguille. Il faut attendre que IDE1_F et IDE2_F viennent, de leur propre initiative, aider Med_Urg_H pour que le KTO soit posé. Alors qu'il était en difficulté, Med_Urg_H n'a jamais demandé de l'aide. Cet événement met en évidence un problème de communication. Med_Urg_H aurait pu solliciter de l'aide avant.

Propositions ergonomiques

À la suite de cette analyse, plusieurs recommandations peuvent être effectuées. Dans un premier temps il s'agit de stocker les informations dès qu'elles sont recueillies (e.g. poids, taille, âge, antécédents...). Le stockage des informations permet d'éviter de boucler plusieurs fois sur une même variable, évite également de questionner les parents ou l'entourage, permet de pouvoir sélectionner les bons outils, les bonnes drogues immédiatement sans être interrompu. De plus, il semble intéressant que ces données stockées soient accessibles à tous, limitant ainsi les questions entre collègues concernant des variables déjà vérifiées. Dans un second temps, il s'agit de ne pas laisser un même individu en charge des aspects techniques et non-techniques du soin. En effet, dès lors qu'un soignant prend en charge la coordination des membres de l'équipe, les transmissions, l'aspect relationnel avec les parents ou l'entourage, ce dernier ne doit pas être impliqué dans une action technique du soin. Les événements observés montrent bien qu'un risque existe, celui de prioriser un de ces aspects du soin au détriment de l'autre (i.e. technique et non-technique).

Cette première vidéo confirme donc : (i) la présence d'un lien fonctionnel entre les états 4 et les états 7, 8, 9 et (ii) l'intérêt du travail réalisé avec le coordinateur, à savoir la volonté de dissocier les aspects technique et non technique du soin ainsi que l'implémentation d'un tableau blanc permettant le stockage et le partage des informations nécessaires à la prise en charge.

Équipe 2**Description de la situation**

Transition concernée	Moment	Situation
$E_2 \rightarrow E_1$	4'46 – 4'55	Med_Ped_F donne des consignes à IDE1_F pour réaliser un dextro et vérifie en boucle la conscience du patient en le stimulant constamment. De nombreux retour en arrière vers l'état 1 sont identifiés
$E_{10} \rightarrow E_{10}$	9'16 – 9'20	Le patient se met en arrêt cardiaque. Med_Urg_H commence le massage tout en demandant à Med_Ped_F d'intuber.
$E_{10} \rightarrow E_{10}$	9'48 – 9'52	Med_Urg_H est encore au massage cardiaque, ANES_H ventile le patient dans l'attente de l'intubation. Il demande à nouveau de préparer le matériel pour intuber le patient (la demande précédente n'ayant pas été réalisée).
$E_{10} \rightarrow E_{10}$	10'54 – 20'02	Anes_H et Med_Rea_H font face à une intubation difficile. Six tentatives d'intubation sont nécessaires pour parvenir à intuber le patient. Pendant 10 minutes, l'équipe médicale boucle sur l'état 10.
$E_3 \rightarrow E_1$	9'33 – 10'32	Alors que Med_Ped_F demande de déclencher le bip urgence cardiaque, elle est sollicitée par ANES_H qui souhaite savoir si le patient présente des tâches cutanées ou non. Med_Ped_F répond par la négative dans un premier temps et s'aperçoit en soulevant le pantalon du patient que ce dernier présente des rougeurs.

Analyse de la situation

Concernant l'équipe 2, l'analyse de la matrice met en évidence des transitions interdites depuis les états 2 et 3 vers l'état 1 permettant d'identifier l'état infectieux. Ces transitions interdites soulignent des difficultés à identifier clairement le contexte infectieux auquel les soignants doivent faire face. Ces difficultés semblent avoir plusieurs origines. La première peut être liée aux limites de la simulation. En effet, on remarque que Med_Ped_F réalise très fréquemment des manipulations du mannequin dans le but d'estimer son tonus musculaire ou le stimule régulièrement afin d'estimer son niveau de conscience. L'absence de réaction du mannequin déstabilise Med_Ped_F qui ne semble pas en mesure de comprendre si cette absence de réaction est due à la simulation (« Je ne sais pas s'il répond... ») ou à une réelle défaillance physiologique. Cette incompréhension est accentuée lorsque IDE1_F ne parvient pas à recueillir la tension du patient (IDE1_F ne semble pas savoir qu'il est nécessaire d'appuyer sur le moniteur pour déclencher une prise de tension), affirme à tort qu'il est impossible de réaliser un dextro ou encore qu'une voie veineuse est déjà posée (il s'agit en réalité d'un câble permettant de relier le mannequin à une poche de sang). La seconde origine relève d'un oubli de Med_Ped_F. Les troubles cardiaques, respiratoires sont identifiés ainsi que les troubles de la conscience. Les antécédents du patient sont analysés et l'impression des parents est recueillie. Cependant, il faut attendre l'arrivée de Anes_H, qui, à la suite des transmissions, demande de vérifier la présence ou non de tâches. Ce n'est qu'à 10'28 que l'état 1 est atteint. A compté de ce moment, aucun autre retour en arrière est codé et les soins sont mis en place pour contrôler le purpura fulminans identifié.

Le purpura fulminans s'accompagne d'une défaillance respiratoire et d'une défaillance cardiaque qui nécessitent la réalisation de compressions thoraciques et d'une intubation. Les opérateurs bouclent sur l'état 10 destiné à prendre en charge les détresses associées et la matrice révèle que 38% des actions totales des opérateurs sont destinés au contrôle de l'état 10. Un codage plus précis nous montre que ces actions concernent aussi bien les paramédicaux que les médecins. Du fait de la double défaillance cardiaque et respiratoire ainsi que des difficultés

à intuber, toute l'équipe est impliquée dans le contrôle de l'état 10 (e.g. relai au massage cardiaque, assistance à l'intubation...) d'où les chiffres élevés pour la transition $E_{10} \rightarrow E_{10}$.

Les difficultés auxquelles font face Anes_H et Med_Rea_H pour intuber augmentent considérablement les transitions $E_{10} \rightarrow E_{10}$. En effet, sur les 76 transitions $E_{10} \rightarrow E_{10}$ identifiées, 58 sont consacrées à l'intubation difficile, 17 à la réalisation du massage cardiaque et 1 à l'injection de l'adrénaline.

Propositions ergonomiques

L'intubation difficile met en évidence que tant le patient n'est pas intubé, le transfert en réanimation ne peut être envisagé. Ainsi, il nous semble pertinent d'ajouter à notre modèle un lien de dépendance fonctionnelle depuis l'état 10 vers l'état 11. L'existence de ce lien met donc en évidence que les soins de suites ne peuvent être mis en place que lorsque le patient est intubé. Afin de réduire le nombre de tentatives nécessaires pour parvenir à intuber le patient, et ainsi permettre à l'équipe d'envisager rapidement le transfert en réanimation, il serait intéressant d'équiper les salles de déchocage d'un vidéolaryngoscope. Les vidéolaryngoscopes sont des dispositifs conçus pour retransmettre, via un écran, une image vidéo du plan de la glotte. En améliorant le champ de visualisation des différentes structures anatomiques, ces outils permettent au personnel d'être plus performants lors de l'intubation (Berg et al. 2009 ; Lewis et al. 2017 ; Wallace & Engelhardt 2015 ; Fiadjoe & Kovatsis 2014).

Cette seconde analyse nous permet donc d'envisager les vidéolaryngoscopes comme des outils capables de soutenir les opérateurs dans la prise en charge d'une intubation en pédiatrie. De plus, cette seconde vidéo permet de spécifier le modèle et d'ajouter, entre les états 10 et 11 un lien de dépendance fonctionnelle indiquant que tant que le patient n'est pas intubé, le transfert en réanimation ne peut être envisagé.

Équipe 3**Description de la situation**

Transition concernée	Moment	Situation
$E_4 \rightarrow E_4$	3'09 – 4'04	Med_Ped_F et IADE1_F se chargent d'équiper le patient (i.e. brassard à tension, capteur de saturation, voie veineuse). IADE1_F exprime à haute voix chaque action réalisée.
$E_6 \rightarrow E_6$	2'13 – 2'21	Med_Ped_F et IADE1_F vérifient différentes constantes physiologiques (fréquence respiratoire, fréquence cardiaque).
$E_6 \rightarrow E_6$	3'02 – 3'23	Med_Ped_F et IADE1_F vérifient à nouveau différentes constantes physiologiques (fréquence cardiaque, saturation, pouls).
$E_{10} \rightarrow E_{10}$	6'53 – 6'59	Med_Urg_H ventile le patient et anticipe le besoin d'intuber le patient. Il demande ainsi aux collègues d'utiliser le logiciel de prescription et commencer à calculer les doses. Il s'assure que tout le monde connaisse le poids du patient (19kg).
$E_{10} \rightarrow E_{10}$	8'07 – 9'52	À la suite de la demande de Med_Urg_H, toute l'équipe est impliquée dans le soin (Anes_F et IADE_H à l'intubation – Med_Ped_F et IDE1_F au calcul des drogues – Med_Rea_F et IDE2_F à la préparation des anesthésiants).
$E_{10} \rightarrow E_{10}$	11'19 – 12'30	Anes_F exprime un doute concernant la qualité de l'intubation et sollicite ses collègues. Tous identifient une ventilation sélective (i.e. seul le poumon gauche se soulève à la ventilation).
$E_2 \rightarrow E_1$	7'41 – 7'49	Alors que Med_Urg_H tente de comprendre le contexte infectieux, Med_Ped_F s'assure du partage des informations en évoquant à haute voix une fièvre mal tolérée et une rhinopharyngite.
$E_7 \rightarrow E_4$	6'37 – 7'21	Med_Ped_F installe le KTO pendant que IDE1_F prépare le remplissage. Med_Urg_H fait état à l'oral du besoin d'intuber le patient. Med_Ped_F se charge alors de calculer les doses pour l'intubation tandis que IDE1_F fini l'installation du KTO et lance le remplissage.

Analyse de la situation

Concernant l'équipe 3, les transitions analysées dans la matrice ne sont pas considérées comme problématiques. En effet, les transitions sont principalement des transitions permettant de vérifier, de façon itérative, différentes variables d'un même état ou encore des transitions de vérification permettant de partager les informations.

Équipe 4**Description de la situation**

Transition concernée	Moment	Situation
$E_4 \rightarrow E_4$	9'24 – 10'42	Med_Ped_F et IDE1_F discutent de la nécessité d'une voie et réalisent la pose de la première voie veineuse.
$E_{10} \rightarrow E_{10}$	15'14 – 15'16	Anes_F effectue des vérifications orales concernant la prise de poste de chacun et la préparation des drogues. Elle s'assure que Med_Urg_F s'occupe de la tête et que les drogues sont en cours de préparation.
$E_{10} \rightarrow E_{10}$	15'56 – 22'25	L'équipe médicale semble bloquée sur l'état 10 et l'intubation. Les soignants ne semblent pas d'accord sur la sélection des drogues et leurs dilutions respectives. Trois des soignants sont alors focalisés sur l'utilisation du logiciel offrant un soutien numérique au calcul des drogues.
$E_2 \rightarrow E_1$	13'57 – 14'14	Med_Urg_F contrôle la température du patient et questionne ensuite l'historique du patient, notamment la présence ou non de troubles de la conscience.
$E_7 \rightarrow E_4$	11'57 – 12'02	Med_Ped_F annonce à voix haute les doses pour le remplissage et vérifie ensuite que la voie ait bien été posée.
$E_7 \rightarrow E_4$	13'36 – 13'38	Alors que IDE1_F vient d'installer le remplissage sur une première voie veineuse située au niveau du coude du patient, elle se propose de poser une seconde voie, notamment un KTO.
$E_9 \rightarrow E_4$	16'01 – 16'35	Alors que Med_Urg_F et Med_Ped_F définissent ensemble les drogues et les doses nécessaires au soutien hémodynamique, Med_Urg_F s'assure que le KTO soit installé. Tout en préparant la Noradrénaline, IDE2_F annonce que le KTO n'a toujours pas été installé et demande à IDE1_F de s'en charger.
$E_9 \rightarrow E_4$	20'44 – 20'56	Alors que Anes_F tente d'intuber, Med_Ped_F monte le lit. Anes_F doit alors guider le montage du lit en même temps qu'elle intube.

Analyse de la situation

Concernant l'équipe 4, l'analyse de la matrice met en évidence deux problèmes : l'un lié à la pose du KTO et l'autre à la préparation et l'injection des drogues d'anesthésie. Les difficultés à installer le KTO ayant aussi des conséquences sur l'injection des drogues.

Les transitions interdites vers 4 révèlent des difficultés concernant la pose du cathéter intra-osseux. En effet, alors que l'équipe soignante se situe dans les états 7, 8 et 9 relatifs à la préparation et l'injection des médicaments, elle ne parvient pas à poursuivre la prise en charge du fait de l'absence d'une seconde voie (non atteinte de l'état 4). Les difficultés liées à la pose du KTO empêchent l'anesthésiste de réaliser l'intubation. L'intubation étant dépendante de l'injection des anesthésiants, elle-même dépendante de la présence d'une voie intra-osseuse fonctionnelle. Cet événement confirme à nouveau le lien de dépendance existant entre l'état 4 et les états 7, 8, 9 et soulève la question de l'ajout d'un lien de dépendance fonctionnelle entre les états 4 (i.e. « Conditionnement technique réalisé » dont la pose du KTO) et 10 (i.e. « Détresses associées contrôlées » dont l'intubation).

Plusieurs éléments peuvent expliquer le retard pris dans la pose du KTO :

1. À 11 minutes, Med_Ped_F anticipe la pose du KTO et sort le matériel pour le poser sur le lit. Elle se charge ensuite de déclencher la procédure d'urgence pour qu'une équipe de soutien vienne les aider. Le KTO n'est pas installé.
2. À 13'58, IDE1_F demande, après avoir posé une perfusion, s'il faut une seconde voie veineuse. Personne ne répond. Elle se charge ensuite de préparer la rocéphine. Le KTO n'est pas installé.

3. À 15'20, Anes_F vérifie que les drogues soient en cours de préparation, vérifie que Med_Urg_F soit au contrôle de la tête et se propose de poser le KTO : « Au niveau de la perfusion qu'est-ce qu'on fait... je pose un KTO ? ». Med_Ped_F acquiesce. Face à cette proposition, IDE2_F cesse de préparer la seconde perfusion qu'elle allait installer et laisse Med_Ped_F s'en charger.

4. À 15'41, Anes_F demande à nouveau s'il faut qu'elle pose un KTO ou s'il faut qu'elle s'occupe de la tête. IADE lui répond « Comme tu veux ». Anes_F décide alors de prendre le contrôle de la tête, abandonnant la pose du KTO. Le KTO n'est toujours pas installé.

5. À 15'48, IDE2_F remarque que Anes_F est maintenant à la tête et n'a pas installé le KTO. IDE2_F demande alors « TU poses le KTO ou JE pose une seconde voie (i.e. une perfusion) ? ». Anes_F répond « Pose un KTO ». IDE2_F lui rétorque « Je pose une seconde voie alors ». Il semblerait que ni Anes_F, ni IDE2_F ne souhaitent installer le KTO. Tous se renvoient la tâche sans que personne ne décide de la réaliser. IDE2_F est ensuite demandée à la préparation de la noradrénaline et n'installe pas la seconde voie.

6. À 16'26, Med_Urg_F demande si le KTO a été posé. IDE2_F répond « Non, on n'a pas mis de KTO mais j'ai mis une deuxième voie ». Néanmoins, cette information est fautive. IDE2_F avait, entre deux, délégué cette tâche à IDE1_F, tâche que IDE1_F n'est pas parvenu à réaliser. Ainsi, le KTO n'est toujours pas posé et les soignants pensent, à tort, qu'une seconde voie est fonctionnelle.

7. À 18'25, Anes_F remarque que cette seconde voie n'est pas fonctionnelle et demande à Med_Ped_F de poser le KTO. Med_Ped_F installe le KTO. Ce dernier est fonctionnel à 19'31.

Cette succession d'événements souligne que pendant 8 minutes 30, la pose du KTO est problématique. Les soignants se « rejettent » la tâche mais personne ne prend la décision d'installer le KTO. Chacun leur tour, les soignants expriment le besoin de poser un KTO mais s'investissent dans des tâches qu'ils jugent plus adaptées à leurs compétences ou des tâches avec lesquelles ils se sentent plus en confiance. Par exemple, l'Anesthésiste choisit de s'occuper de la tête plutôt que de poser le KTO, l'infirmière se charge de préparer les antibiotiques plutôt que d'installer le KTO... Néanmoins, les discussions relatives au KTO et les échanges concernant sa pose font croire aux autres soignants que le KTO est posé. Cette résistance à prendre en charge la pose du KTO peut être expliquée par un manque de compétence technique. En effet, le KTO consiste à faire pénétrer dans l'os, à l'aide d'une perceuse médicale, une petite aiguille permettant d'administrer rapidement tout type de médicaments. C'est une technique d'urgence que les soignants pratiquent peu. Même si la simulation a pour objectif d'entraîner les soignants à la pose du KTO en situation, il semblerait que l'équipe médicale ne soit pas à l'aise avec cette pratique. Une formation plus longue et spécifique au KTO serait à envisager dans la formation continue des soignants. De plus, des problèmes de communication et un manque de leadership accentuent les difficultés relatives à la pose du KTO et le retard que cela provoque dans la prise en charge. En effet, le visionnage de la vidéo donne l'impression que chaque soignant fait ce qu'il veut, les soignants se bousculent entre eux pour réaliser les tâches courantes, les demandes spécifiques ne sont pas écoutées et restent parfois sans réponse, les tâches ne sont pas réparties entre les membres de l'équipe.

Un second problème est mis en évidence dans cette vidéo, l'étape de sélection et de dilution des drogues anesthésiques (i.e. étomidate et célocurine). Afin de réaliser la prescription des drogues et sélectionner les dilutions, l'équipe utilise l'ordinateur et le logiciel de dilution mis à leur disposition dans le cadre de la simulation. Cependant, l'interaction avec le logiciel ne semble pas facile et nécessite l'intervention de plusieurs soignants. La

figure 37, ci-dessous, illustre une situation où, l'anesthésiste, positionnée à la tête, attend les drogues pour réaliser l'intubation tandis que 4 autres soignants lui tournent le dos et sont focalisés sur l'utilisation du logiciel. Des difficultés liées à la manipulation des dispositifs (i.e. attraction forte de la contrainte GT) éloignent les soignants du soin (i.e. éloignement de la contrainte SP). Dès 16'36, ANES_F assure le contrôle des voies aériennes supérieures et demande de l'étomidate et de la célocurine. L'injection des drogues n'est réalisée qu'à 20'18 et le patient est intubé à 21'10.



Figure 37 : Présentation d'une situation où 4 soignants sont focalisés sur l'utilisation du matériel informatique réduisant ainsi l'attention portée au patient.

Propositions ergonomiques

À la suite de cette analyse, plusieurs recommandations peuvent être effectuées. Dans un premier temps il s'agit de s'assurer qu'un soignant prenne en charge le rôle de leader. Si le leader n'émerge pas naturellement, un soignant doit alors prendre en charge le rôle de coordinateur. Ici, ce dernier aurait pu, par exemple, assurer la répartition des tâches entre les soignants et permettre une installation plus rapide du KTO, aider à la dilution des drogues et assurer un langage commun entre les différentes spécialités (e.g. certains parlent en mg par kilos tandis que d'autres expriment les dilutions en cc), aider à structurer la prise en charge... Cette vidéo confirme à nouveau l'intérêt du travail sur le coordinateur et la nécessité qu'un soignant, dès lors que la situation se complexifie, assure via différentes fonctions, la coordination des différents membres et des actions. Concernant le modèle, cette vidéo nous a montré que l'intubation était, dans certains cas, dépendante de la pose du KTO, lui-même indispensable à l'injection des anesthésiques. Dans les vidéos précédentes, les soignants avaient fait le choix d'intuber sans endormir le patient déjà inconscient. Ici, le temps pris pour poser le KTO couplé aux difficultés rencontrées pour diluer les drogues retarde l'intubation.

Cette vidéo confirme donc : (i) l'intérêt du travail réalisé avec le coordinateur, à savoir la volonté de faire émerger en cas d'urgence un coordinateur destiné à assurer la coordination des équipes et des actions pour laisser le temps aux soignants de soigner le patient et (ii) soulève la question de l'ajout d'un lien fonctionnel entre les états 4 et 10 dans notre modèle initial.

Équipe 5**Description de la situation**

Transition concernée	Moment	Situation
$E_6 \rightarrow E_6$	1'40 – 2'41	Med_Ped_H énonce à haute voix les différentes variables physiologiques à contrôler (tension, fréquence respiratoire, saturation).
$E_6 \rightarrow E_6$	4'09 – 4'18	Med_Ped_H ausculte le patient au niveau du thorax et en même temps surveille le moniteur. En faisant correspondre les informations issues du stéthoscope et du moniteur il annonce à haute-voix que le patient est en train de se mettre en arrêt.
$E_6 \rightarrow E_6$	7'58 – 8'33	Alors que IADE_F réalise le massage cardiaque, Anes_H signale que le pouls est revenu et que le patient a retrouvé une activité cardiaque. Après vérification, IADE_F cesse le massage.
$E_6 \rightarrow E_6$	8'51 – 12'32	Entre 8'51 et 12'32, l'équipe ne parvient pas à mesurer la saturation en oxygène. L'absence de SAT inquiète les soignants. 12 fois de suite, les soignants signalent « On n'a pas de SAT ; la SAT ne marche pas ». IADE_F se charge alors trouver la défaillance technique pouvant expliquer que la SAT ne s'affiche pas sur le moniteur. À 12'08 Med_Urg_H annonce que la SAT est en réalité de 94%. Le capteur fonctionnait correctement et le problème recherché était inexistant.
$E_{10} \rightarrow E_{10}$	4'28 – 14'40	Toute l'équipe est impliquée dans le soin. Anes_H et Med_Rea_H à la tête gèrent la ventilation et l'intubation. Med_Ped_H et IADE_F se relaient au massage cardiaque. IDE1_F et IDE2_F se chargent de la préparation des drogues.
$E_2 \rightarrow E_1$	9'32 – 9'39	Med_Ped_H recherche un purpura fulminans. Il quitte la pièce pour questionner à nouveau la nounou sur les antécédents du patient.
$E_7 \rightarrow E_4$	5'58 – 6'03	IDE1_F et IDE2_F se demandent mutuellement qui se charge de préparer le remplissage et qui installe le KTO. Elles se répartissent les tâches entre elles.

Analyse de la situation

Concernant l'équipe 5, l'analyse de la matrice met en évidence des transitions interdites et des boucles nombreuses notamment sur les états 6, et 10. Néanmoins, l'analyse qualitative de la vidéo révèle que ces transitions ne sont pas problématiques. Seule la transition $E_2 \rightarrow E_1$ identifiée entre 9'32 et 9'39 met en évidence un problème. En effet, le soignant coordinateur se voit dans l'obligation de quitter la pièce pour questionner la nounou à nouveau. En quittant la pièce, le médecin perd le contrôle des événements qui se mettent en place autour du patient.

Propositions ergonomiques

Pour éviter ce genre de situation, nous pourrions envisager une méthode de recueil des informations auprès des proches qui soient structurée. Des travaux sont d'ailleurs en cours pour concevoir des programmes de formation et des outils ergonomiques adaptés, tels qu'un tableau structuré pour faciliter la recherche d'informations, sur la base d'une approche de conception participative.

Équipe 6**Description de la situation**

Transition concernée	Moment	Situation
$E_7 \rightarrow E_4$	7'45 – 8'24	Alors que IDE1_F installe une première voie, IDE2_F prépare le remplissage. IDE1_F exprime à haute voix un problème : « Ma voie n'est pas hyper fonctionnelle ». Med_Ped_H demande alors à IADE_H de finaliser la voie et à IDE1_F de préparer un KTO.
$E_7 \rightarrow E_4$	8'58 – 9'04	IDE1_F et IDE2_F échangent sur les choses à faire : remplissage, antibiotiques, et pose du KTO. IDE1_F explique le problème rencontré avec la voie et la nécessité de poser un KTO. L'une choisit de gérer le KTO quand l'autre décide de préparer les antibiotiques.
$E_7 \rightarrow E_4$	11'41 – 11'48	IADE et IDE reviennent sur le KTO qui avait été mis en attente dans la liste des tâches à réaliser. Ils décident ensemble de poser le KTO pour obtenir un meilleur débit de remplissage.
$E_8 \rightarrow E_4$	9'06 – 9'10	Le retour en arrière correspond ici au moment où, les infirmières s'échangent les tâches. Alors que IDE1_F devait poser le KTO, elle récupère la préparation des antibiotiques. IDE2_F qui préparait les antibiotiques, décide de poser le KTO.

Analyse de la situation

Concernant l'équipe 6, l'analyse de la matrice met en évidence des transitions interdites et des boucles nombreuses notamment sur les états 5, 6, et 10. Néanmoins, l'analyse qualitative de la vidéo révèle que ces transitions ne sont pas problématiques.

Ainsi, l'analyse qualitative des transitions problématiques a permis de confirmer l'intérêt du travail mené sur le coordinateur et la nécessité de dissocier les aspects techniques et non-techniques du soin lors des situations complexes. En effet, les observations montrent qu'en cas de conflit, l'un ou l'autre de ces aspects est priorisé au détriment de l'autre. De plus, sur la base des variables suffisantes et nécessaires, il semble pertinent de structurer la recherche et le partage des informations indispensables au diagnostic. Les travaux actuellement mené pour développer un tableau blanc structuré serait une solution envisageable. Finalement, l'analyse des données permet de questionner et/ou spécifier certains aspects du modèle initial. Ici, les vidéos confirment les liens fonctionnels entre les états 4 et les états 7, 8, 9, soulève la question de l'ajout d'un lien fonctionnel entre les états 10 et 11 et entre les états 4 et 10.

V. Perspectives

Vers une méthode capable de prédire les trajectoires des opérateurs

1. Les données disponibles

Sur la base du codage des vidéos mettant en scène des équipes médicales devant faire face à une situation d'urgence, la méthodologie SSS permet d'obtenir (i) une matrice de transformation présentant, dans chacune de ses cellules, la probabilité moyenne de passage d'un état colonne à un état ligne et (ii) la position des soignants au sein d'un espace d'états. Les figures 34 et 38 présentent respectivement la matrice de transformation obtenue à la suite du codage des 6 vidéos et l'évolution de la position des soignants au cours du temps. Notons que ces dernières correspondent aux 5 premières minutes de prise en charge de l'équipe 1, où seules IDE1_F et Med_Ped_F étaient présentes.

Sur la base de cet ensemble de probabilités, et des positions des soignants au sein de l'espace d'états, des prédictions peuvent alors être émises au regard des trajectoires les plus probables. En effet, le codage identifie la position du soignant dans l'espace d'état et la matrice de transformation permet de réaliser des prédictions concernant l'état vers lequel le soignant est le plus susceptible d'évoluer. Par exemple, sur la base des données exposées sur la figure 38 (points verts), nous savons qu'à $t = 418\text{sec}$, Med_Ped_F se situe dans l'état 1. Compte tenu des probabilités calculées au sein de la matrice de transformation (Figure 34), nous pouvons prédire que Med_Ped_F a la probabilité la plus élevée de rester dans l'état 1 (probabilité la plus forte ; $p = 0.27$) ou d'évoluer vers l'état 6 (seconde probabilité la plus forte ; $p = 0.22$). Or, l'observation réelle révèle que Med_Ped_F transite de l'état 1 à l'état 6 entre $t = 418\text{sec}$ et $t = 436\text{sec}$, soutenant la prédiction précédente.

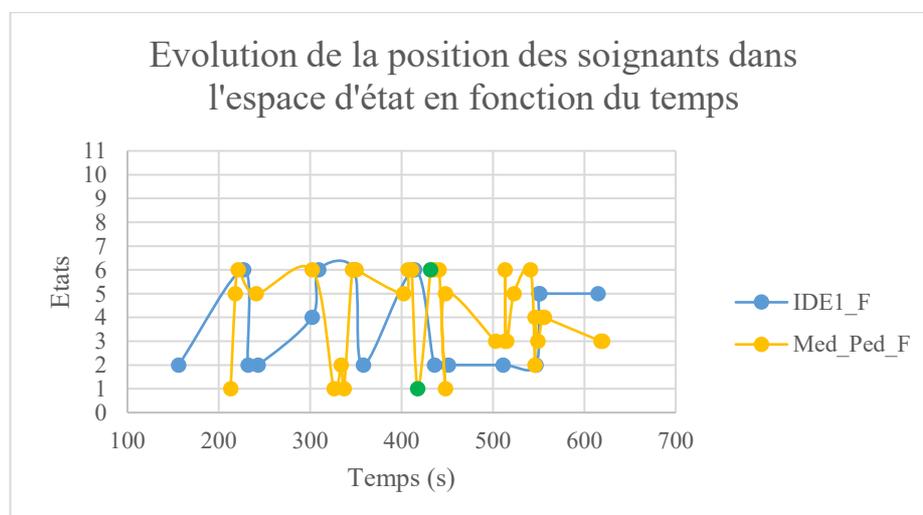


Figure 38 : Évolution de la position des soignants de l'équipe 1 au sein de l'espace d'état composé de 11 états lors des 5 premières minutes de prise en charge.

En mathématiques, un outil de modélisation, permet de caractériser l'évolution des individus au sein d'un espace d'état : les chaînes de Markov. Après avoir présenté succinctement les principes d'une chaîne de Markov, nous montrerons comment nous pourrions appliquer cet outil pour prédire l'évolution des comportements des soignants. À partir de leur position initiale, nous serions capables de prédire l'évolution de leur position dans le temps et détecter des trajectoires à risques nécessitant l'apport d'une assistance adaptée. L'objectif est ici de proposer une orientation potentielle que pourrait prendre ce travail à l'avenir.

2. Les chaînes de Markov

En mathématiques, une chaîne de Markov est un processus de prédiction qui modélise comment évolue un ensemble d'entité au sein d'un espace d'état. Une chaîne de Markov se compose d'états, de transitions et de probabilités de passage d'un état à un autre. Ces éléments sont contenus dans une matrice de transition où chaque cellule représente la probabilité de passage entre deux états donnés. Cette matrice est représentée graphiquement par un diagramme de transition entre états (Figure 39).

À titre d'exemple, les chaînes de Markov sont à la base du processus de prédiction utilisé par les claviers de nos smartphones (i.e. Typing Word Prediction). Sur la base d'une analyse des habitudes de frappes, la probabilité de passage d'un mot à un autre est calculée et intégrée dans une chaîne de Markov alors capable de prédire le mot suivant le plus probable. Ainsi, à partir d'un état donné, la chaîne de Markov est utilisée pour prédire l'évolution du processus d'un état à un autre et peut modéliser comment les individus évoluent au sein d'un espace d'état.

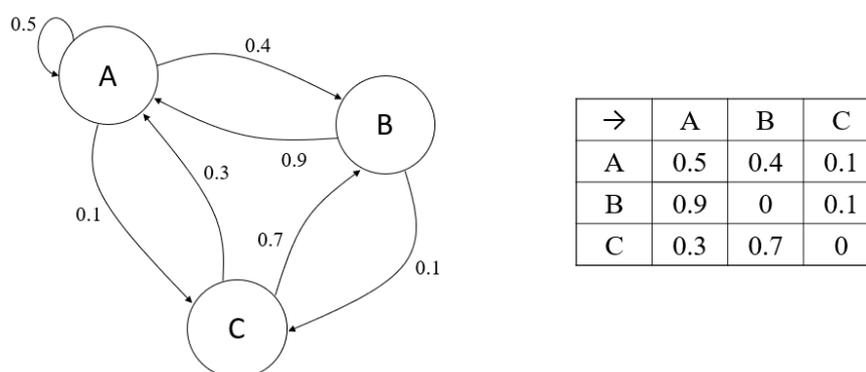


Figure 39 : Exemple d'une chaîne de Markov composée de 3 états aléatoires et sa matrice de transition.

À gauche : Les cercles sont les états et chaque flèche représente la probabilité de passage d'un état à un autre. À droite : La flèche (\rightarrow) indique le sens de lecture et indique une transition d'un état en ligne à un état colonne (à l'inverse du processus présenté précédemment). La somme des probabilités en ligne pour chaque état est égale à 1.

Considérons maintenant une équipe médicale composée de 10 soignants et un espace d'état composé de 3 états aléatoires. Imaginons que l'analyse et le codage des comportements, réalisés sur la base de la méthode SSS, révèle que : (i) à partir de l'état 1, l'équipe médicale a 70% de chance de rester sur l'état 1 et 30% de chance de transiter vers l'état 2 ; (ii) à partir de l'état 2, l'équipe médicale a 80% de chance de rester sur l'état 2, 10% de chance de transiter vers l'état 1 et 10% de chance de transiter vers l'état 3 ; (iii) à partir de l'état 3, l'équipe médicale a 10% de chance de transiter vers l'état 2 et 90% de chance de rester sur l'état 3. Sur la base de ces informations, le diagramme de transition entre les états peut être construite ainsi que la matrice de transition (Figure 40).

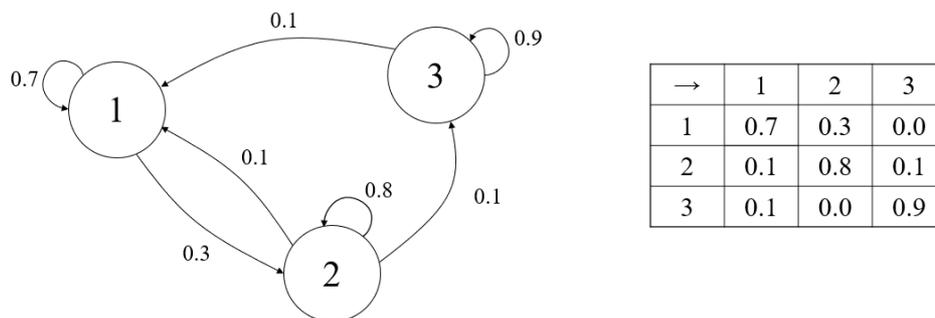


Figure 40 : Exemple d'un diagramme de transition entre états et matrice de transition associée.

Ces trois états pourraient faire référence à une prise en charge classique impliquant de 1. Scoper¹⁵ le patient, 2. Surveiller les constantes physiologiques, 3. Administrer les médicaments. Notons que la matrice de transition est ici horizontale (transition d'un état ligne à un état colonne) et nécessite une transposition de la matrice issue du codage SSS (transition d'un état colonne à un état ligne).

L'objectif étant maintenant de prédire dans quel état seront les soignants dans une période de temps donnée. Pour effectuer le calcul plusieurs éléments sont nécessaires :

1. Nous appellerons T la matrice de transition qui fournit les informations relatives aux probabilités de passage d'un état à un autre. Dans notre cas, elle s'écrit sous la forme suivante :

$$T = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.3 & 0.0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0.1 & 0.0 & 0.9 \end{pmatrix}$$

2. Nous nommerons P_0 le vecteur initial de probabilité qui permet de prédire l'évolution du système. Prenons ici une situation initiale aléatoire et considérons qu'au bout d'une minute de prise en charge, 2 soignants se situent dans l'état 1, 5 soignants se situent dans l'état 2 et 3

¹⁵ Équiper le patient des capteurs afin de pouvoir surveiller, sur le moniteur de surveillance, l'évolution des constantes physiologiques (e.g. fréquence cardiaque, fréquence respiratoire, saturation en oxygène...).

soignants se situent dans l'état 3. Ainsi, le vecteur initial de probabilité est le suivant : $P_0 = (2 \ 5 \ 3)$.

3. Pour prédire l'état du système après une période de temps, la formule mathématique permettant l'estimation du futur repose sur la multiplication du vecteur initial par la matrice de transition. Ainsi, après une période de temps donnée, l'état du système sera le suivant : $P_1 = P_0 \cdot T$. Dans la même logique, après deux périodes de temps données, l'état du système sera le suivant : $P_2 = P_1 \cdot T$. Cependant, nous savons que $P_1 = P_0 \cdot T$. Ainsi, $P_2 = P_1 \cdot T = (P_0 \cdot T) \cdot T = P_0 \cdot T^2$. La logique se répète pour chaque période. Si l'on nomme n le nombre de période voulu, alors l'état du système sera : $P_n = P_0 \cdot T^n$.

Dans le cadre de notre exemple, il est possible de prédire l'évolution des positions des soignants pendant les 5 premières minutes de prises en charge.

Ainsi,

$$P_1 = P_0 \cdot T$$

$$P_1 = (2 \ 5 \ 3) \cdot \begin{pmatrix} 0.7 & 0.3 & 0.0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0.1 & 0.0 & 0.9 \end{pmatrix}$$

$$P_1 = (2.2 \ 4.6 \ 3.2)$$

Après deux périodes de temps,

$$P_2 = P_0 \cdot T^2$$

$$P_2 = (2 \ 5 \ 3) \cdot \begin{pmatrix} 0.7 & 0.3 & 0.0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0.1 & 0.0 & 0.9 \end{pmatrix}^2$$

$$P_2 = (2 \ 5 \ 3) \cdot \begin{pmatrix} 0.52 & 0.45 & 0.03 \\ 0.16 & 0.67 & 0.17 \\ 0.16 & 0.03 & 0.81 \end{pmatrix}$$

$$P_2 = (2.32 \ 4.34 \ 3.34)$$

Après 5 périodes de temps est donc $P_5 = P_0 \cdot T^5$.

Ainsi,

$$P_5 = P_0 \cdot T^5$$

$$P_5 = (2 \ 5 \ 3) \cdot T^5$$

$$P_5 = (2 \ 5 \ 3) \cdot \begin{pmatrix} 0.7 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.8 & 0.0 \\ 0.0 & 0.1 & 0.9 \end{pmatrix}^5$$

$$P_5 = (2 \ 5 \ 3) \cdot \begin{pmatrix} 0.31 & 0.53 & 0.16 \\ 0.23 & 0.49 & 0.28 \\ 0.23 & 0.16 & 0.61 \end{pmatrix}$$

$$P_5 = (2.46 \ 3.99 \ 3.55)$$

Nous pouvons donc prédire qu'après 5 minutes, la position des soignants aura évolué. Sur la base des probabilités issues de la matrice de transformation, les 10 soignants se répartiront de la façon suivante : 2,46 « individus » dans l'état 1 ; 3,99 « individus » dans l'état 2 et 3.55 « individus » seront dans l'état 3.

En s'inspirant des principes fondamentaux de la cybernétique, la méthode SSS offre donc la possibilité de modéliser les comportements des opérateurs sous la forme de chaînes de Markov. En effet, les notions d'espace d'états, de transitions, de matrice de transition, et de probabilité de passage d'un état à un autre sont également les éléments principaux de notre méthode. Dans le cadre de notre travail, l'objectif serait alors de multiplier les analyses dans le but d'enrichir la matrice de transformation. Les probabilités issues de ces nombreuses observations serviraient de modèle de référence pour prédire les comportements des opérateurs. Via l'identification du discours des soignants et de leurs actions, leurs comportements peuvent être associés à une variable, elle-même rattachée à un état ayant une position précise au sein de l'espace d'état. La multiplication de cette position initiale par la matrice de transformation permettrait alors de prédire la position future du ou des soignants dans cet espace d'état. Un système d'assistance pourrait suivre les comportements des opérateurs et détecter des trajectoires à risque, autrement dit les trajectoires dont la probabilité de migrer vers les zones de risques est élevée. Des aides pourraient alors être proposées pour tenter de réguler ces trajectoires et contrer les migrations identifiées.

VI. Conclusion

À partir des principes fondamentaux de la cybernétique, cette section nous a permis de présenter la méthode SSS proposée dans le cadre de ce travail de thèse. Essentiellement basée sur les notions de contraintes, d'états, de variables, de liens de dépendances et de matrices de transformations, la méthode SSS a pour objectif de modéliser les comportements des opérateurs comme des trajectoires au sein de l'espace de travail délimité par DSM. La méthodologie repose sur un processus cyclique où le modèle initialement développé sert de grille de lecture pour analyser et comprendre les données réelles, qui elles-mêmes permettent de spécifier le modèle en retour.

Cette première application de la méthode SSS illustre les différentes étapes méthodologiques nécessaires à la création d'un modèle propre à la prise en charge d'un choc septique en pédiatrie. Ce premier exercice montre comment, sur la base d'un ensemble d'états critiques jugés suffisants et nécessaires, il est possible de mettre en lumière les degrés de liberté auxquels les opérateurs doivent faire face (i.e. l'ensemble des transitions possibles). Le codage des vidéos, permet ensuite de réduire les comportements observés sous la forme d'une matrice de transformation capable de modéliser les comportements comme des transitions au sein de l'espace d'état préalablement défini.

Sur la base de l'analyse de ces matrices, les premiers résultats révèlent que la méthode proposée permet de mettre en évidence la variabilité du système en modélisant, au sein des matrices de transformation, l'ensemble des transitions possibles et réalisées ainsi que leurs probabilités respectives. De cette manière, la méthode SSS s'inscrit dans une démarche formative qui vise, non pas à comprendre comment le système devrait se comporter, mais bien comment il pourrait se comporter. Ainsi, les matrices de transformation et les graphiques de transition entre les états montrent que l'activité réelle est bien plus complexe que la séquence ordonnée d'états identifiés sur la base des procédures. L'ensemble des actions observées est conséquent et les trajectoires possibles pour atteindre un même objectif sont nombreuses. Le calcul des probabilités permet d'estimer, compte tenu des transitions observées et de leurs fréquences, lequel de ces chemins est le plus probable. Cette modélisation fournit des informations concernant les comportements à soutenir via le développement d'assistances adaptées. De plus, la caractérisation des zones de la matrice en fonction du caractère normal, anormal ou interdit des transitions, permet de mettre en lumière les comportements adaptatifs nécessaires à la prise en charge. En effet, l'analyse des matrices a révélé que les comportements « anormaux ou inattendus », ceux qui sortent du modèle attendu, sont tout aussi fréquents que les comportements attendus. A l'inverse des méthodes classiques qui considèrent tout écart à la norme comme une erreur sanctionnable, notre modèle met en lumière ces comportements pour lesquels l'analyse qualitative est une source pour le développement d'outils ergonomiques innovants adaptés à la variabilité de l'activité réelle. L'analyse qualitative menée ici, sur les transitions interdites ainsi que sur les transitions dont la plus forte

probabilité concerne un bouclage sur le même (i.e. les états 4, 6 et 10), nous a en ce sens permis de mettre en évidence des situations problématiques, de commencer à réfléchir à des solutions adaptées et de spécifier certaines caractéristiques de notre modèle initial.

La méthode SSS proposée répond alors aux objectifs initialement fixés. En effet ce premier travail a montré que la méthode SSS permet de rendre compte de la variabilité du système via la mise en évidence de l'ensemble des DDL disponibles au sein des matrices, de modéliser les comportements comme un ensemble de transitions dans un espace d'état propre à la tâche, de comprendre les comportements des opérateurs lors de l'activité réelle pour obtenir des informations quant aux chemins les plus probables et également mettre en lumière les situations problématiques qui nécessitent une compréhension approfondie.

Cependant, certaines limites méthodologiques peuvent être discutées. Dans un premier temps, l'ensemble de l'analyse et les résultats qui en découlent reposent sur la pertinence du modèle initialement proposé, lui-même dépendant du jugement des experts. En effet, la sélection des contraintes, des états, des variables, la classification des états et l'identification de leurs liens de dépendances dépendent des objectifs de l'analyse, du niveau de granularité sélectionné. Il n'existe pas de critères explicites permettant d'indiquer à quel moment le nombre optimal d'état ou de variable est atteint dans la constitution du modèle. Cependant, il ne s'agit pas de fournir une description précise de toutes les choses à réaliser mais bien de mettre en évidence des points de repères identifiables qui permettent de suivre la trajectoire du point opératif au sein de l'espace de travail. Cohérence et rigueur doivent alors accompagner les experts dans la sélection des états et des variables avec l'idée que ces derniers doivent être les éléments critiques, suffisants et nécessaires au contrôle de la situation observée. Dans un second temps, il est important de souligner que chaque modèle développé est propre à une situation ou un diagnostic. L'analyse de l'ensemble des situations de travail rencontrées au quotidien serait difficilement réalisable, compte tenu du nombre conséquent de pathologies et/ou diagnostics potentiels existants. Néanmoins, et à l'image des efforts fournis autour de la « *Patient Safety Database* », plateforme basée sur le partage des expériences à des fins de sécurité du système de santé, la création d'une plateforme internet ouverte à tous pourraient permettre le développement des modèles par les experts. Les échanges, la discussion se construiraient alors autour de ces modèles dans le but d'entretenir une dynamique de développement des modèles, de leurs spécifications. Ces échanges permettraient également de faire émerger des besoins en termes d'analyses. Pour finir, la méthode SSS reste une méthode lourde à implémenter notamment lors de la retranscription et le codage des vidéos. La méthode nécessite un codage individuel, un opérateur à la fois et peut s'avérer non applicable pour les situations où le nombre d'opérateur impliqué est conséquent.

Malgré ces limites, la méthode SSS offre des perspectives prometteuses, notamment celle de réaliser des prédictions quant à l'évolution des trajectoires des opérateurs au sein de leur espace de travail. Ainsi, il serait possible d'imaginer des outils d'assistance qui, compte tenu de l'état actuel de la situation,

pourrait prédire les trajectoires futures. Les trajectoires à risques pourraient alors être identifiées et corrigées dans le but d'éviter les accidents et diminuer les risques pour les patients.

Section 5

Conclusion générale

Ce travail de thèse était guidé par un objectif méthodologique, à savoir le développement d'outils d'analyse destinés à comprendre et modéliser comment les opérateurs contrôlent les contraintes et les nombreux degrés de libertés disponibles au sein des systèmes faiblement couplés. Sur la base des travaux précédemment réalisés par Morineau et Flach (2019), deux axes de recherches se sont alors organisés. Dans un premier temps, il s'agissait de poursuivre le développement de la méthode hCWA et de tester, sur différents cas applicatifs liés à l'urgence médicale, comment la première étape de description des contraintes du système de travail, sur la base du modèle DSM, pouvait contribuer à la conception d'assistances adaptées aux exigences de l'activité réelle. Dans un second temps, l'objectif était d'apporter au cadre général de la hCWA, de nouveaux outils méthodologiques destinés à modéliser les comportements des opérateurs comme des trajectoires au sein de l'espace de travail délimité par DSM. Ces deux objectifs évoluaient vers une volonté commune de participer au développement d'environnements de soin ergonomiques et au maintien des exigences de sécurité et de performance au sein des systèmes faiblement couplés.

La première phase de ce travail nous a permis d'appliquer les concepts fondamentaux de la hCWA et de développer puis tester, dans un contexte de simulation, deux assistances ergonomiques. Via l'identification des contraintes et de leurs pressions respectives, la première étape de la hCWA a permis de modéliser la tendance du système à migrer vers des situations à risques lors de deux situations d'urgence différentes. En effet, à travers les pressions continues que les contraintes exercent sur le système de travail, le point opératif tend à migrer vers des zones critiques mettant en péril la stabilité du système. Sur la base de notre hypothèse générale qui propose qu'il existerait, au sein de l'espace de travail, un point d'équilibre permettant aux opérateurs d'assurer le contrôle des contraintes, les assistances étaient toutes deux conçues pour contrer la migration du point opératif vers les zones à risques et rééquilibrer le système. En effet, l'implémentation de ces assistances avait pour but d'orienter le point opératif vers ce point d'équilibre situé au centre du triangle dessiné par les 3 contraintes identifiées comme étant les limites de l'espace de travail propre à l'urgence médicale.

Concernant le premier cas applicatif, basé sur la question de la coordination lors de la prise en charge d'une situation d'urgence pédiatrique, la hCWA a permis de caractériser les risques associés au rôle de leader. Pour un expert médical endossant le rôle de leader, l'exercice de modélisation a mis en évidence le conflit existant entre la gestion des compétences techniques et non-techniques lors d'une situation d'urgence ainsi que la tendance du système à migrer vers le contrôle des aspects techniques du soin au détriment des aspects non-techniques. L'assistance organisationnelle proposée sous la forme d'un nouveau rôle médical nommé « coordinateur » avait alors pour buts de limiter la migration du point opératif vers la marge de risque propre à la contrainte de soin, réorienter le contrôle au regard des contraintes organisationnelles (i.e. la gestion des tâches et des informations) et apporter une solution permettant d'assurer un équilibre dans le contrôle des compétences techniques et non techniques lors de l'urgence. Après avoir listé les fonctions et les outils associés à ce nouveau rôle de « coordinateur »,

l'objectif était de tester, en contexte de simulation, l'effet de la présence d'un coordinateur sur la performance des équipes médicales. Face à des scores de performance très variables, les premiers résultats ont mis en évidence l'absence d'effet significatif de la présence d'un coordinateur sur la performance des équipes. Cependant, l'étude a identifié certains aspects de la coordination ayant un impact favorable sur la performance. En effet, il semble que la performance soit meilleure lorsque les actions de coordination sont nombreuses à l'échelle de l'équipe et lorsqu'elles sont centralisées auprès d'un seul soignant qui n'est pas l'anesthésiste. Plusieurs questions restent ouvertes à la suite de ce travail, notamment celles de la formation et la sélection des coordinateurs. Des travaux futurs sont envisagés pour tester l'effet de la formation sur l'appropriation du rôle du coordinateur, évaluer l'apport d'un coordinateur paramédical (i.e. infirmier/infirmière) et concevoir, sur la base d'une approche de conception participative, un tableau structuré pour faciliter la communication et la recherche d'informations.

Concernant le second cas applicatif, la hCWA a permis de modéliser le risque principal associé à la prise en charge d'un retard de réveil en anesthésie générale, à savoir la tendance du système à migrer vers la gestion des aspects organisationnels du soin au détriment de l'efficacité et l'efficience du processus diagnostic. L'assistance numérique proposée avait pour buts de limiter la migration du point opératif vers les contraintes organisationnelles, réorienter les ressources attentionnelles vers la contrainte de soin propre au domaine et donner la possibilité aux soignants de se focaliser sur la mise en place d'un diagnostic précis et rapide. Face à ces objectifs, une checklist numérique a été proposée et testée lors d'expérimentations menées dans un contexte de simulation. En développant des assistances techniques adaptées aux contraintes délimitant l'espace de travail ainsi qu'à leurs dynamiques sous-jacentes, nous supposons que les opérateurs seraient en mesure de réguler les migrations inévitables vers les zones de risques. Notons que la modélisation de l'espace de travail via DSM a également permis de définir les étapes de conception de la check-list numérique et les modalités d'évaluation de l'assistance au regard de chacune des contraintes. Les résultats ont principalement mis en évidence que l'implémentation de la check-list réduisait l'écart entre les médecins anesthésistes et les infirmiers anesthésistes concernant leur diagnostic et modifiait la stratégie de recueil d'information en une collecte « pilotée par la check-list ». À la suite de ce travail, il s'agirait maintenant de poursuivre le développement du prototype jusqu'à l'aboutissement d'un outil disponible et fonctionnel sur le terrain. Dans cette logique, une collaboration avec le comité d'analyse et maîtrise du risque (CAMR) de la SFAR est en cours.

Ainsi, cette première phase de travail a montré que la hCWA fournissait un cadre de modélisation et de réflexion propice à l'émergence d'innovations adaptées aux contraintes délimitant l'espace de travail et à leurs pressions respectives, que ce soit dans les domaines de l'ergonomie organisationnelle ou de l'ergonomie de conception.

La deuxième phase de ce travail, guidé par la volonté de développer de nouveaux outils méthodologiques destinés à modéliser les comportements des opérateurs comme des trajectoires au sein de l'espace de travail délimité par DSM, a permis d'aboutir à la méthode SSS : « The State Space Sketch ». Cette dernière avait pour objectif de modéliser comment les opérateurs gèrent, en termes de trajectoires, les nombreux degrés de liberté disponibles pour assurer le contrôle des contraintes au sein des systèmes faiblement couplés. En effet, comprendre comment les opérateurs s'adaptent et naviguent dans un champ de possibles aussi large que celui que l'on peut observer dans l'activité d'une équipe de soignants en situation d'urgence est indispensable pour construire des environnements de soin sûrs qui soutiennent les comportements adaptatifs. En s'inspirant des concepts fondamentaux de la cybernétique (Ashby 1957), les solutions méthodologiques apportées reposaient sur cinq éléments essentiels, à savoir les notions de contraintes, d'états, de variables, de matrice de transition et de trajectoires. Via une démarche modélisatrice, SSS proposait une solution permettant, à partir de l'observation de situations de travail réelles ou simulées, de modéliser les comportements des opérateurs sous forme de matrices de transformations rendant compte des degrés de libertés disponibles (i.e. ensemble des trajectoires possibles) et des stratégies de contrôle privilégiées par les opérateurs (i.e. ensemble des trajectoires utilisées et leurs fréquences d'observation). Cette première application de la méthode SSS nous a ainsi permis de mettre en évidence, sous la forme de matrices de transformations, la variabilité du système médical faisant face à une situation d'urgence pédiatrique. La démarche de retranscription et le codage des vidéos issues des sessions de formations professionnelles en simulation a permis de modéliser les comportements de 6 équipes médicales composées en moyenne de 7 soignants. Sur la base du modèle initial illustrant toutes les trajectoires possibles, l'exercice de modélisation a mis en lumière les nombreuses trajectoires utilisées en situation réelle, leurs probabilités d'occurrence et les dysfonctionnements potentiels pouvant relever de problèmes techniques et/ou organisationnels. Une analyse qualitative approfondie a ensuite permis la caractérisation des dysfonctionnements potentiels et la mise en place de solutions ergonomiques adaptées aux trajectoires comportementales observées. Malgré le fait que hCWA et SSS soient aux balbutiements de leurs développements, les perspectives sont encourageantes et pourraient évoluer vers la création d'un modèle prédictif des comportements sur la base des chaînes de Markov. À l'avenir, l'objectif serait alors de multiplier les applications et confronter la méthode à des situations de travail afin d'aboutir à des modèles généraux permettant de prédire les comportements des opérateurs et de détecter rapidement puis réguler les trajectoires susceptibles d'évoluer vers des situations risquées.

La méthodologie proposée et les résultats issus de ce travail présentent bien évidemment leurs propres limites. Nous sommes conscients que les résultats basés sur des protocoles quasi-expérimentaux ou des échantillons faibles sont critiquables. De plus, les analyses menées en simulation souffrent a fortiori des limites propres à ce contexte d'étude. En effet, et malgré des outils technologiques puissants et en développement constant, certains signes cliniques ne sont toujours pas simulables comme le tonus

musculaire. La simulation reste alors une approximation de la réalité mettant parfois les soignants en difficulté et affectant les comportements observés. Au-delà des limites propres à la simulation, nos capacités d'intervention étaient parfois limitées en raison du nombre restreint de soignants intéressés par la simulation, de leurs faibles disponibilités et des frais liés à l'occupation du centre de simulation. Une solution était alors de se greffer aux sessions de formations professionnelles obligatoires. Cependant, nos degrés de libertés se voyaient réduits et nos possibilités d'actions se limitaient à des interventions plus succinctes que celles envisageables dans le cadre d'un réel protocole expérimental contrôlé. Les données recueillies étaient elles aussi dépendantes des aléas organisationnels rendant l'analyse difficile du fait de scénarios différents ou d'équipes non homogènes. Cependant, cette variabilité dans les données recueillies reflète la complexité des situations réelles. En effet, et si l'on souhaite apporter des réponses méthodologiques qui soient adaptées à la complexité du monde réel, nos outils se doivent de prendre en compte les situations imprévues.

Pour finir, la dernière limite évoquée concerne l'absence de validation précise de la méthode proposée. En effet, la validation, la fiabilité et la généralisation des résultats se doivent d'être établis pour fournir un caractère véritablement opérationnel à la méthode. Sur la base des travaux de Sousa (2014), plusieurs critiques peuvent être émises. Premièrement, la méthode de codage des vidéos a été développée et testée par une seule personne ne permettant pas une mesure de la correspondance inter-juge pourtant nécessaire pour attester de la fiabilité des données. De plus, la méthode de codage a été développée pour l'analyse des données vidéos de haute qualité (i.e. image nette, son clair) dans un contexte de simulation médicale réduisant son application à ce type de données. La méthode ne serait pas applicable dans les centres de formation n'offrant pas cette qualité d'enregistrement et n'a pas été pensée pour des sources de données différentes (e.g. observations classiques, entretiens, interview...). Cependant, il est important de noter que ce travail respecte les critères de cohérence interne et externe. La cohérence interne se définit comme la capacité du chercheur à maintenir la logique entre la question de recherche, l'échantillon, la sélection des données et leur analyse. La cohérence externe se base, quant à elle, sur le lien entre la théorie et les concepts utilisés, la génération de théories et l'applicabilité des résultats (Sousa 2014). Dans notre travail, la question de recherche, inscrite dans un cadre conceptuel plus large appartenant à l'Ingénierie Cognitive des Systèmes, répond à des besoins méthodologiques précis, à savoir le développement de méthode d'analyse adaptée aux systèmes faiblement couplés et le besoin de caractériser précisément l'emplacement du point de fonctionnement du système et sa trajectoire au sein de l'espace de liberté défini par DSM (Cook & Rasmussen 2005). Malgré son faible nombre, l'échantillon analysé en contexte de simulation offre également de bonnes caractéristiques pour comprendre et clarifier l'expérience humaine en situation quasi réelle et la méthodologie proposée repose sur des étapes clairement identifiées permettant un suivi, étape par étape, du processus de modélisation. De plus, la méthode proposée répond à des besoins plus larges en Ergonomie pour caractériser la performance des opérateurs humains, notamment le besoin de disposer de méthodes de mesures dites objectives, quantitatives,

sensibles et fondées sur la théorie (Yu et al. 2002). En effet, SSS possède une dimension quantitative dans le sens où les résultats permettent de fournir des matrices de transformation avec des probabilités sur la base desquelles des modèles mathématiques prédictifs peuvent être envisagés. SSS est sensible car permet de fournir une nouvelle compréhension des comportements inaccessible par des méthodes classiques. SSS est fondée sur un modèle théorique, notamment des bases théoriques issues de la psychologie écologique, le modèle dynamique de sûreté, cybernétique, l'ingénierie des systèmes. Et pour finir SSS dispose d'un caractère objectif car basée sur les faits, les discours et les actions observables sur les enregistrements. Le codage s'effectue sur la base d'une liste de variables préalablement définie par les analystes et les spécialistes du domaine. Même si la validation méthodologique est nécessaire, SSS est développée pour faciliter la reproductibilité de la méthode et limiter la part laissée à l'interprétation.

Ainsi, le travail réalisé durant cette thèse, est la première étape d'un long processus permettant de développer, appliquer et valider la méthode hCWA comme un outil adapté à l'analyse des systèmes faiblement couplés. Les travaux futurs devront permettre la validation de la méthode et la multiplication des applications à des situations de travail variées. Nous souhaiterions également poursuivre les recherches dans le cadre de protocoles expérimentaux contrôlés avec un échantillon plus large de participants et donner ainsi aux résultats plus de validité. Quant à nos perspectives à longs termes, elles souhaiteraient faire de la méthode SSS un point de rencontre entre l'Ergonomie Hospitalière et la Recherche en Simulation. En effet, la formation médicale via la simulation (Naik & Brien 2013) et l'ergonomie (Cuvelier 2016) sont aujourd'hui deux disciplines qui œuvrent pour le maintien des exigences de performance et de sécurité au sein du système médical. Cependant, nos expériences personnelles au sein des structures de soins et nos discussions avec les principaux acteurs de la simulation en France (CoReSimS, SoFraSimS), nous montrent que les missions attribuées aux ergonomes hospitaliers n'incluent pas, de façon systématique et rigoureuse, l'utilisation de la simulation. Seule 4% des activités de la simulation concerne l'ergonomie selon le rapport réalisé par la Haute Autorité de Santé (2012). Un réel challenge existe, celui de proposer la méthode SSS comme une solution permettant de réunir la simulation et l'ergonomie autour d'objectifs communs de performance et sécurité des patients.

Bibliographie

- Ahlstrom, U. 2005. « Work Domain Analysis for Air Traffic Controller Weather Displays ». *Journal of Safety Research* 36 (2): 159-69. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2005.03.001>
- Amalberti, R, C Vincent, Y Auroy, et G de Saint Maurice. 2006. « Violations and Migrations in Health Care: A Framework for Understanding and Management ». *Quality and Safety in Health Care* 15 (suppl_1): i66-71. <https://doi.org/10.1136/qshc.2005.015982>
- Amalberti, R, et F Deblon. 1992. « Cognitive Modelling of Fighter Aircraft Process Control: A Step towards an Intelligent on-Board Assistance System ». *International Journal of Man-Machine Studies* 36 (5): 639-71. [https://doi.org/10.1016/0020-7373\(92\)90035-J](https://doi.org/10.1016/0020-7373(92)90035-J)
- Amalberti, R, Y Auroy, D Berwick, et P Barach. 2005. « Five System Barriers to Achieving Ultrasafe Health Care ». *Annals of Internal Medicine* 142 (9): 756. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-142-9-200505030-00012>
- Angel, S, et P Angel. 2016. Éviter les erreurs médicales grâce à la simulation. Paris : Odile Jacob.
- Anvarifar, F, MZ Voorendt, C Zevenbergen, et W Thissen. 2017. « An Application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to Risk Analysis of Multifunctional Flood Defences in the Netherlands ». *Reliability Engineering & System Safety* 158: 130-41. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.10.004>
- Ashby, WR. 1957. *An Introduction to Cybernetics*. London: Chapman & Hall.
- Ashby, WR. 1962. « Principles of the self-organizing system ». In *Principles of Self Organization : Transactions of the University of Illinois Symposium*. London, UK: Pergamon Press.
- Ashoori, M, C Burns, B d'Entremont, et K Momtahan. 2014. « Using Team Cognitive Work Analysis to Reveal Healthcare Team Interactions in a Birthing Unit ». *Ergonomics* 57 (7): 973-86. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.909949>
- Ashoori, M, C Burns, K Momtahan, et B d'Entremont. 2011. « Control Task Analysis in Action: Collaboration in the Operating Room ». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 55 (1): 272-76.
- Bainbridge, L. 1997. « The Change in Concepts Needed to Account for Human Behavior in Complex Dynamic Tasks ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 27 (3): 351-59. <https://doi.org/10.1109/3468.568743>
- Barthram, C, et W Mcclymont. 1992. « The Use of a Checklist for Anaesthetic Machines ». *Anaesthesia* 47 (12): 1066-69. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.1992.tb04206.x>
- Berg, B, R A. Walker, WB Murray, et BH Boedeker. 2009. « Airway Intubation in a Helicopter Cabin: Video vs. Direct Laryngoscopy in Manikins ». *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 80 (9): 820-23. <https://doi.org/10.3357/ASEM.2492.2009>
- Bernstein, NA. 1967. *The coordination and regulation of movements*. London : Pergamon Press.

- Bion, JF, T Abrusci, et P Hibbert. 2010. « Human Factors in the Management of the Critically Ill Patient ». *British Journal of Anaesthesia* 105 (1): 26-33. <https://doi.org/10.1093/bja/aeq126>
- Birrell, SA, MS Young, DP Jenkins, et NA Stanton. 2012. « Cognitive Work Analysis for safe and efficient driving ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 13: 430-49.
- Bisantz, AM, C Burns, et RJ Fairbanks. 2015. *Cognitive systems engineering in health care*. CRC Press.
- Bisantz, AM, et CM Burns. 2009. *Applications of Cognitive Work Analysis*. Boca Raton : CRC Press.
- Bisantz, AM, et N Mazaeva. 2009. « Work domain analysis using the abstraction hierarchy: two contrasting cases ». In *Applications of cognitive work analysis*, édité par A Bisantz et C Burns, 49–68. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Blanche, C, E Goubert, et T Morineau. 2006. « Une approche d'ingénierie cognitive pour la gestion intégrée de zones côtières : le cas d'un barrage sur un estuaire ». *VertigO* 7 (3).
- Bleetman, A, S Sanusi, T Dale, et S Brace. 2012. « Human Factors and Error Prevention in Emergency Medicine ». *Emergency Medicine Journal* 29 (5): 389-93. <https://doi.org/10.1136/emj.2010.107698>
- Böhmer, AB, F Wappler, T Tinschmann, P Kindermann, D Rixen, M Bellendir, U Schwanke, B Bouillon, et MU Gerbershagen. 2012. « The Implementation of a Perioperative Checklist Increases Patients' Perioperative Safety and Staff Satisfaction. » *Acta Anaesthesiologica Scandinavica* 56 (3): 332-38. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.2011.02590.x>.
- Brady, PW, J Zix, R Brill, DS Wheeler, K Griffith, MJ Giaccone, K Dressman, U Kotagal, S Muething, et K Tegtmeier. 2015. « Developing and Evaluating the Success of a Family Activated Medical Emergency Team: A Quality Improvement Report ». *BMJ Quality & Safety* 24 (3): 203-11. <https://doi.org/10.1136/bmjqs-2014-003001>
- Branford, K. 2011. « Seeing the Big Picture of Mishaps: Applying the AcciMap Approach to Analyze System Accidents ». *Aviation Psychology and Applied Human Factors* 1 (1): 31-37. <https://doi.org/10.1027/2192-0923/a00005>
- Brill, RJ, R Gibson, JW Luria, TA Wheeler, J Shaw, M Linam, J Kheir, et al. 2007. « Implementation of a Medical Emergency Team in a Large Pediatric Teaching Hospital Prevents Respiratory and Cardiopulmonary Arrests Outside the Intensive Care Unit. » *Pediatric Critical Care Medicine* 8 (3): 236-46. <https://doi.org/10.1097/01.PCC.0000262947.72442.EA>
- Broadbent, DE. 1958. *Perception and Communication*. London : Pergamon.
- Brooke, J. 1996. « SUS - A quick and dirty usability scale », 189-94.
- Bruder, N, et JJ Gallula. 2007. « Évaluation et prise en charge d'un retard de réveil après une anesthésie ». *Le Praticien en Anesthésie Réanimation* 11 (2): 122-29. [https://doi.org/10.1016/S1279-7960\(07\)91531-4](https://doi.org/10.1016/S1279-7960(07)91531-4)

- Bubb, H. 2006. « A Consideration of the Nature of Work and the Consequences for the Human-Oriented Design of Production and Products ». *Applied Ergonomics* 37 (4): 401-7. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.04.004>
- Burns, C, Y Enomoto, et K Momtahan. 2008. « A Cognitive Work Analysis of Cardiac Care Nurses Performing Teletriage ». In *Applications of Cognitive Work Analysis*, édité par A Bisantz et C Burns, 149-74. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420063059.ch7>
- Burns, C.M., D.J. Bryant, et B.A. Chalmers. 2005. « Boundary, Purpose, and Values in Work-Domain Models: Models of Naval Command and Control ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 35 (5): 603-16. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2005.851153>
- Burns, CM, DJ Bryant, et BA Chalmers. 2000. « A work domain model to support shipboard command and control ». In *Proceedings of the 2000 International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 3:2228-33. Piscataway, NJ: IEEE.
- Burns, CM, K Momtahan, et Y Enomoto. 2006. « Supporting the strategies of cardiac nurse coordinators using cognitive work analysis ». In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50:442–446. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.
- Burtscher, MJ, J Wacker, G Grote, et T Manser. 2010. « Managing Nonroutine Events in Anesthesia: The Role of Adaptive Coordination ». Édité par Jamie C. Gorman, Nancy J. Cooke, et Eduardo Salas. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 52 (2): 282-94. <https://doi.org/10.1177/0018720809359178>
- Cannon-Bowers, JA, E Salas, et S Converse. 1993. « Shared mental models in expert team decision making ». In N. J. Castellan (Ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Carne, B, M Kennedy, et T Gray. 2012. « Review Article: Crisis Resource Management in Emergency Medicine: Crisis Resource Management in Emergency Medicine ». *Emergency Medicine Australasia* 24 (1): 7-13. <https://doi.org/10.1111/j.1742-6723.2011.01495.x>
- Cassano-Piche, AL, KJ Vicente, et GA Jamieson. 2009. « A Test of Rasmussen’s Risk Management Framework in the Food Safety Domain: BSE in the UK ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 10 (4): 283-304. <https://doi.org/10.1080/14639220802059232>
- Chevalier, A, et J Cegarra. 2008. « Une Approche Psychologique de La Notion de Contrainte En Résolution de Problèmes ». *Le Travail Humain* 71 (2) : 173. <https://doi.org/10.3917/th.712.0173>.
- Chisholm, CD, EK Collison, DR Nelson, et WH Cordell. 2000. « Emergency Department Workplace Interruptions Are Emergency Physicians “Interrupt-Driven” and “Multitasking”? » *Academic Emergency Medicine* 7 (11): 1239-43. <https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2000.tb00469.x>

- Cook, R, et J Rasmussen. 2005. « “Going Solid”: A Model of System Dynamics and Consequences for Patient Safety ». *Quality and Safety in Health Care* 14 (2): 130-34. <https://doi.org/10.1136/qshc.2003.009530>
- Cooper GE, MD White, et JK Lauber. 1980. Resource management on the flightdeck. NASA-Industry Workshop, NASA CP-2120, NASA: USA.
- Cooper, S, R Cant, J Porter, K Sellick, G Somers, L Kinsman, et D Nestel. 2010. « Rating Medical Emergency Teamwork Performance: Development of the Team Emergency Assessment Measure (TEAM) ». *Resuscitation* 81 (4): 446-52. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2009.11.027>
- Cornelissen, M, PM Salmon, R McClure, et NA Stanton. 2013. « Using Cognitive Work Analysis and the Strategies Analysis Diagram to Understand Variability in Road User Behaviour at Intersections ». *Ergonomics* 56 (5): 764-80.
- Croskerry, P. 2005. « Diagnostic Failure: A Cognitive and Affective Approach. » American Psychological Association.
- Croskerry, P. 2009a. « Clinical Cognition and Diagnostic Error: Applications of a Dual Process Model of Reasoning ». *Advances in Health Sciences Education* 14 (S1): 27-35. <https://doi.org/10.1007/s10459-009-9182-2>
- Croskerry, P. 2009b. « A Universal Model of Diagnostic Reasoning ». *Academic Medicine* 84 (8): 1022-28. <https://doi.org/10.1097/ACM.0b013e3181ace703>
- Cuvelier, L. 2011. « De la gestion des risques à la gestion des ressources de l’activité : étude de la résilience en anesthésie pédiatrique ». *Ergonomie*, France : Conservatoire National des Arts et Métiers.
- Cuvelier, L. 2016. « Agir face aux risques, regard de l’ergonomie ». *Fondation pour une culture de sécurité industrielle, Les Regards sur la sécurité industrielle*, n° 2016-01.
- De Vries, EN. 2010. « Effect of a Comprehensive Surgical Safety System on Patient Outcomes ». *N Engl J Med*, 10.
- Delignieres, D. 2004. L'approche dynamique du comportement moteur. In J.La Rue & H. Ripoll (Eds.), *Manuel de Psychologie du Sport*, tome 1 (pp. 65-80). Paris: Editions Revue EPS.
- DeVita, MA, RS Braithwaite, R Mahidhara, S Stuart, M Foraida, et RL Simmons. 2004. « Use of Medical Emergency Team Responses to Reduce Hospital Cardiopulmonary Arrests ». *Quality and Safety in Health Care* 13 (4): 251-54. <https://doi.org/10.1136/qshc.2003.006585>
- Diedrich, FJ, et WH Warren. 1995. « Why Change Gaits? Dynamics of the Walk-Run Transition. » *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 21 (1): 183-202. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.21.1.183>
- Durand, D. 2010. *La systémique*. Presses Universitaires de France.

- Effken, J, R Loeb, K Johnson, S Johnson, et V Reyna. 2001. « Using cognitive work analysis to design clinical displays ». *Studies in health technology and informatics*, 1: 127–131.
- Effken, JA, BB Brewer, MD Logue, SM Gephart, et JA Verran. 2011. « Using Cognitive Work Analysis to Fit Decision Support Tools to Nurse Managers' Work Flow ». *International Journal of Medical Informatics* 80 (10): 698-707. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2011.07.003>
- Elix, B, et N Naikar. 2008. « Designing Safe and Effective Future Systems: A New Approach for Modelling Decisions in Future Systems with Cognitive Work Analysis ». In *Proceedings of the 8th International Symposium of the Australian Aviation Psychology Association*. Sydney, Australia.
- Ely, JW, ML Graber, et P Croskerry. 2011. « Checklists to Reduce Diagnostic Errors ». *Academic Medicine* 86 (3): 307-13. <https://doi.org/10.1097/ACM.0b013e31820824cd>
- Endsley, MR. 1995. « Toward a theory of situation awareness in dynamic system. » *Human Factors* 37: 32-64.
- Endsley, MR. 2000. *Situation Awareness*. London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Falzon, P. 2008. « Enabling Safety: Issues in Design and Continuous Design ». *Cognition, Technology & Work* 10 (1): 7-14. <https://doi.org/10.1007/s10111-007-0072-1>.
- Falzon, P. 2013. « Pour une ergonomie constructive ». Dans *Ergonomie constructive*, par P Falzon. Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2013.01.0001>.
- Fiadjoe, JE, et P Kovatsis. 2014. « Videolaryngoscopes in Pediatric Anesthesia: What's New? ». *Minerva Anesthesiologica*, 80 (1): 7.
- Fidel, R, et AM Pejtersen. 2004. « From information behaviour research to the design of information systems: The Cognitive Work Analysis framework. » *Information Research: an international electronic journal* 10 (1).
- Fitts, PM. 1954. « The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement », 11.
- Flach, JM, D Steele-Johnson, V Shalin, et G Hamilton. 2013. « Coordination and Control in Emergency Response ». In *Handbook of Emergency Response*, par A. Badiru et L. Racz, 20131758:531-46. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b15372-26>
- Flach, JM, et F Voorhorst. 2016. *What Matters?: Putting Common Sense to Work*. Dayton, Ohio: Wright State University Libraries.
- Flach, JM, MA Feufel, PL Reynolds, SH Parker, et KM Kellogg. 2017. « Decisionmaking in Practice: The Dynamics of Muddling Through ». *Applied Ergonomics* 63 : 133-41. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.03.017>

- Flach, JM, S Dekker, et PJ Stappers. 2008. « Playing Twenty Questions with Nature (the Surprise Version): Reflections on the Dynamics of Experience ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 9 (2): 125-54. <https://doi.org/10.1080/14639220601095353>
- Flach, JM. 2012. « Complexity: Learning to Muddle Through ». *Cognition, Technology & Work* 14 (3): 187-97. <https://doi.org/10.1007/s10111-011-0201-8>
- Fletcher, G.C.L., P. McGeorge, R.H. Flin, R.J. Glavin, et N.J. Maran. 2002. « The Role of Non-Technical Skills in Anaesthesia: A Review of Current Literature ». *British Journal of Anaesthesia* 88 (3): 418-29. <https://doi.org/10.1093/bja/88.3.418>
- Flin, R, et N Maran. 2015. « Basic Concepts for Crew Resource Management and Non-Technical Skills ». *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology* 29 (1): 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.bpa.2015.02.002>
- Flin, R, R Patey, R Glavin, et N Maran. 2010. « Anaesthetists' Non-Technical Skills ». *British Journal of Anaesthesia* 105 (1): 38-44. <https://doi.org/10.1093/bja/aeq134>
- Flin, R. 2004. « Identifying and Training Non-Technical Skills for Teams in Acute Medicine ». *Quality and Safety in Health Care* 13 (suppl_1): i80-84. <https://doi.org/10.1136/qshc.2004.009993>
- Gaba, DM, KJ Fish, et SK Howard. 1994. *Crisis Management in Anesthesiology*. New York: Churchill Livingstone.
- Gaba, DM, KJ Fish, SK Howard, et A Burden. 2015. *Crisis Management in Anesthesiology*. 2nd éd. Philadelphia, Pa.: Saunders.
- Gaba, DM, SK Howard, et SD Small. 1995. « Situation Awareness in Anesthesiology ». *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 37 (1): 20-31. <https://doi.org/10.1518/001872095779049435>
- Gaba, DM, SK Howard, KJ Fish, BE Smith, et YA Sowb. 2001. « Simulation-Based Training in Anesthesia Crisis Resource Management (ACRM): A Decade of Experience ». *Simulation & Gaming* 32 (2): 175-93. <https://doi.org/10.1177/104687810103200206>
- Gaba, DM. 2000. « Anaesthesiology as a Model for Patient Safety in Health Care ». *BMJ* 320 (7237): 785-88. <https://doi.org/10.1136/bmj.320.7237.785>
- Gaba, DM. 2004. « The Future Vision of Simulation in Health Care ». *Quality and Safety in Health Care* 13 (suppl_1): i2-10. <https://doi.org/10.1136/qshc.2004.009878>
- Gibson, JJ, LE Crooks. 1938. « A theoretical field-analysis of automobile-driving ». *American Journal of Psychology* 51 (3): 453–471.
- Gibson, JJ. 1979. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston, MA : Houghton-Mifflin.

- Glassman, RB. 1973. « Persistence and loose coupling in living systems ». *Behavioral Science* 18 : 83-98.
- Gorman, JC, M Demir, NJ Cooke, et DA Grimm. 2018. « Evaluating Sociotechnical Dynamics in a Simulated Remotely-Piloted Aircraft System: A Layered Dynamics Approach ». *Ergonomics*, 1-15. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1557750>
- Gorman, JC, NJ Cooke, HK Pederson, OC Olena, et JA DeJoode. 2005. « Coordinated Awareness of Situation by Teams (CAST): Measuring Team Situation Awareness of a Communication Glitch ». In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 49:274-77. Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society. <https://doi.org/10.1177/154193120504900313>
- Gorman, JC, PG Amazeen, et NJ Cooke. 2010. « Team Coordination Dynamics ». *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences* 14 (3): 265-89.
- Gorman, JC. 2014. « Team Coordination and Dynamics: Two Central Issues ». *Current Directions in Psychological Science* 23 (5): 355-60. <https://doi.org/10.1177/0963721414545215>
- Granry, JC, et MC Moll. 2012. « État de l'art (national et international) en matière de pratiques de simulation dans le domaine de la santé ». Rapport de mission. Haute Autorité de Santé.
- Griffiths, F, et D Byrne. 1998. « General Practice and the New Science Emerging from the Theories of 'Chaos' and Complexity ». *British Journal of General Practice*, 3.
- Grote, G, M Kolbe, E Zala-Mezo, B Kunzle, et J Wacker. 2009. « Measuring Coordination Behaviour in Anaesthesia Teams During Induction of General Anaesthetics », 20.
- Grote, G. 2015. « Promoting Safety by Increasing Uncertainty – Implications for Risk Management ». *Safety Science* 71 : 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.02.010>.
- Grote, G. 2016. « Rules Management as Source for Loose Coupling in High-Risk Systems ». In *Second Resilience Engineering Symposium*, 116-24.
- Grundgeiger, T, P Sanderson, HG MacDougall, et B Venkatesh. 2010. « Interruption Management in the Intensive Care Unit: Predicting Resumption Times and Assessing Distributed Support. » *Journal of Experimental Psychology: Applied* 16 (4): 317-34. <https://doi.org/10.1037/a0021912>
- Grundgeiger, T, PM Sanderson, et R Key Dismukes. 2014. « Prospective Memory in Complex Sociotechnical Systems ». *Zeitschrift Für Psychologie* 222 (2): 100-109. <https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000171>
- Guastello, SJ. 2017. « Nonlinear Dynamical Systems for Theory and Research in Ergonomics ». *Ergonomics* 60 (2): 167-93. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1162851>.
- Hajdukiewicz, JR, CM Burns, KJ Vicente, et RG Eggleston. 1999. « Work Domain Analysis for Intentional Systems ». In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 43:333-37. <https://doi.org/10.1177/154193129904300343>

- Hajdukiewicz, JR, DJ Doyle, P Milgram, KJ Vicente, et CM Burns. 1998. « A Work Domain Analysis of Patient Monitoring in the Operating Room ». Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 42 (14): 1038-42.
- Hales, BM, et PJ Pronovost. 2006. « The Checklist—a Tool for Error Management and Performance Improvement ». Journal of Critical Care 21 (3): 231-35. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2006.06.002>
- Hall, TJ, JW Rudolph, et CGL Cao. 2006. « Fixation and attention allocation in anesthesiology crisis management: an abstraction hierarchy perspective ». In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 50:1064–1067. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.
- Hardy, K, et F Guarnieri. 2011. « Modelling and Hazard Analysis for Contaminated Sediments Using STAMP Model ». Chemical Engineering Transactions 25 : 737-742.
- Haynes, AB, TG Weiser, WR Berry, SR Lipsitz, AHS Breizat, EP Dellinger, T Herbosa, et al. 2009. « A Surgical Safety Checklist to Reduce Morbidity and Mortality in a Global Population ». New England Journal of Medicine 360 (5): 491-99. <https://doi.org/10.1056/NEJMs0810119>
- Heinrich, HW. 1931. Industrial accident prevention; a scientific approach. New York: McGraw-Hill.
- Helmreich, RL, AC Merritt, et JA Wilhelm. 1999. « The Evolution of Crew Resource Management Training in Commercial Aviation ». International Journal of Aviation Psychology 9 (1): 19-32.
- Hicks, CM, GW Bandiera, et CJ Denny. 2008. « Building a Simulation-Based Crisis Resource Management Course for Emergency Medicine, Phase 1: Results from an Interdisciplinary Needs Assessment Survey ». Academic Emergency Medicine 15 (11): 1136-43. <https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2008.00185.x>
- Hollnagel, E, S Pruchnicki, R Woltjer, et S Etcher. 2011. « Analysis of Comair Flight 5191 with the Functional Resonance Accident Model ». In International Symposium of the Australian Aviation Psychology Association, 9. Sydney, Australia.
- Hollnagel, E. 2004. Barriers and accident prevention. Aldershot, UK: Ashgate.
- Hollnagel, E. 2008. « The Changing Nature Of Risks ». Ergonomics Australia 22 (1-2): 33-46.
- Hopkins, MM, DA O’Neil, et JK Stoller. 2015. « Distinguishing Competencies of Effective Physician Leaders ». Journal of Management Development 34 (5): 566-84. <https://doi.org/10.1108/JMD-02-2014-0021>
- Hssain, I. 2013. AMLS, Prise en charge des urgences médicales. Broché.
- Hulme, A, J Thompson, KL Plant, GJM Read, S Mclean, A Clacy, et PM Salmon. 2019. « Applying Systems Ergonomics Methods in Sport: A Systematic Review ». Applied Ergonomics 80 : 214-25. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.03.019>
- Hutchins E. 1995. Cognition in the wild. Cambridge: MIT Press.

- Hutchins, E. 2001. « Distributed cognition ». In *The international encyclopedia of the social and behavioral sciences*, 2068-72. Oxford: Pergamon Press.
- Ibrahim-Shire, M, GT Jun, et S Robinson. 2018. « The Application of System Dynamics Modelling to System Safety Improvement: Present Use and Future Potential ». *Safety Science* 106 (juillet): 104-20. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.03.010>
- Jenkins, B. 2014. « Cognitive Aids: Time for a Change? » *Anaesthesia* 69 (7): 660-64. <https://doi.org/10.1111/anae.12764>
- Jenkins, DP, NA Stanton, PM Salmon, GH Walker, et MS Young. 2008. « Using Cognitive Work Analysis to Explore Activity Allocation within Military Domains ». *Ergonomics* 51 (6): 798-815. <https://doi.org/10.1080/00140130801915246>
- Jenkins, DP, PM Salmon, NA Stanton, et GH Walker. 2010. « A New Approach for Designing Cognitive Artefacts to Support Disaster Management ». *Ergonomics* 53 (5): 617-35. <https://doi.org/10.1080/00140131003672007>
- Jiancaro, T, GA Jamieson, et A Mihailidis. 2014. « Twenty Years of Cognitive Work Analysis in Health Care: A Scoping Review ». *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 20.
- Jolemore, S. 2018. « Learning to Lead in Health Care: A Narrative Inquiry of Physician Leadership. » *Philosophy in Educational Studies*, Canada: Halifax, Nova Scotia.
- Kanagarajah, A, D Parker, et H Xu. 2010. « Health Care Supply Networks in Tightly and Loosely Coupled Structures: Exploration Using Agent-Based Modelling ». *International Journal of Systems Science* 41 (3): 261-70. <https://doi.org/10.1080/00207720903326852>
- Kazaras, K, K Kirytopoulos, et A Rentizelas. 2012. « Introducing the STAMP Method in Road Tunnel Safety Assessment ». *Safety Science* 50 (9): 1806-17.
- Kelso, S, KG Holt, P Rubin, et PN Kugler. 1981. « Patterns of Human Interlimb Coordination Emerge from the Properties of Non-Linear, Limit Cycle Oscillatory Processes: Theory and Data ». *Journal of Motor Behavior* 13 (4): 226-61. <https://doi.org/10.1080/00222895.1981.10735251>
- Kelso, S. 2013. « Coordination Dynamics ». In *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, ed. Robert A. Meyers, 1-41. New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_101-3
- Kemper, PF, I van Noord, M de Bruijne, DL Knol, C Wagner, et C van Dyck. 2013. « Development and Reliability of the Explicit Professional Oral Communication Observation Tool to Quantify the Use of Non-Technical Skills in Healthcare ». *BMJ Quality & Safety* 22 (7): 586-95. <https://doi.org/10.1136/bmjqs-2012-001451>

- Klein, G, et AA Armstrong. 2004. « Critical Decision method ». In Handbook of Human Factors and Ergonomics methods, ed. NA Stanton, A Hedge, E Salas, H Hendrick et K Brookhaus, Boca Raton, FL : CRC Press.
- Kohn, LT, JM Corrigan, et MS Donaldson. 2000. To Err Is Human: Building a Safer Health System. Committee on Quality of Health Care in America. Washington, DC: National Academy Press.
- Krombach, JW, WA Edwards, JD Marks, et OC Radke. 2015. « Checklists and Other Cognitive Aids For Emergency And Routine Anesthesia Care-A Survey on the Perception of Anesthesia Providers From a Large Academic US Institution ». *Anesthesiology and Pain Medicine* 5 (4). <https://doi.org/10.5812/aamp.26300v2>
- Künzle, B, M Kolbe, et G Grote. 2010. « Ensuring Patient Safety through Effective Leadership Behaviour: A Literature Review ». *Safety Science* 48 (1): 1-17.
- Leclerc, F, O Noizet, AE Dorkenoo, S Cremer, S Leteurtre, A Sadik, et C Fourier. 2002. « Purpura fulminans ». *Réanimation*, n° 11 : 222-30.
- Leveson, NG. 2004. « A New Accident Model for Engineering Safer Systems ». *Safety Science* 42 (4): 237-70. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00047-X)
- Leveson, NG. 2011. *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*. Engineering Systems. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Leveson, NG., Mirna Daouk, Nicolas Dulac, et Karen Marais. 2003. « Applying STAMP in Accident Analysis ». Working Paper Series ESD-WP-2003-02. Massachusetts Institute of Technology.
- Lewis, SR, AR Butler, J Adams, TM Cook, OJ Schofield-Robinson, et AF Smith. 2017. « Videolaryngoscopy versus Direct Laryngoscopy for Adult Patients Requiring Tracheal Intubation: A Cochrane Systematic Review ». *British Journal of Anaesthesia* 119 (3): 369-83. <https://doi.org/10.1093/bja/aex228>
- Lind, M. 1994. « Modeling Goals and Functions of Complex Plant ». *Applied Artificial Intelligence*, 259-83.
- Lind, M. 2003. « Making sense of the abstraction hierarchy in the power plant domain ». *Cognition, Technology & Work* 5 (2): 67-81. <https://doi.org/10.1007/s10111-002-0109-4>
- Lingard, L. 2008. « Evaluation of a Preoperative Checklist and Team Briefing Among Surgeons, Nurses, and Anesthesiologists to Reduce Failures in Communication ». *Archives of Surgery* 143 (1): 12. <https://doi.org/10.1001/archsurg.2007.21>
- Lintern, G. 2010. « A Comparison of the Decision Ladder and the Recognition-Primed Decision Model ». *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* 4 (4): 304-27. <https://doi.org/10.1177/155534341000400404>

- Lintern, G. 2013. « Cognitive work analysis » [online]. Available from: <http://www.cognitivesystemsdesign.net/Tutorials/CWA%20Tutorial.pdf>.
- Luyat, M, et T Regia-Corte. 2009. « Les Affordances : De James Jérôme Gibson Aux Formalisations Récentes Du Concept ». *L'Année Psychologique* 109 (02): 297. <https://doi.org/10.4074/S000350330900205X>
- Mackworth, NH. 1950. *Researches on the measurement of Human Performance*. London: His Majesty's Stationery Office.
- Makary, MA, A Mukherjee, JB Sexton, D Syin, E Goodrich, E Hartmann, L Rowen, DC Behrens, M Marohn, et PJ Pronovost. 2007. « Operating Room Briefings and Wrong-Site Surgery ». *Journal of the American College of Surgeons* 204 (2): 236-43. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2006.10.018>
- Manser, T, TK Harrison, DM Gaba, et SK Howard. 2009. « Coordination Patterns Related to High Clinical Performance in a Simulated Anesthetic Crisis »: *Anesthesia & Analgesia* 108 (5): 1606-15. <https://doi.org/10.1213/ane.0b013e3181981d36>
- Martin, C., et C. Brun-Buisson. 2007. « Prise en charge initiale des états septiques graves de l'adulte et de l'enfant ». *Annales Françaises d'Anesthésie et de Réanimation* 26 (1): 53-73. <https://doi.org/10.1016/j.annfar.2006.10.021>
- McIlroy, RC, et NA Stanton. 2011. « Getting Past First Base: Going All the Way with Cognitive Work Analysis ». *Applied Ergonomics* 42 (2): 358-70.
- McLean, S, PM Salmon, AD Gorman, GJM Read, et C Solomon. 2017. « What's in a Game? A Systems Approach to Enhancing Performance Analysis in Football ». *Plos One* 12 (2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172565>
- Militello, LG, et RJ Hutton. 1998. « Applied cognitive task analysis (ACTA): a practitioner's toolkit for understanding cognitive task demands ». *Ergonomics* 41 (11), 1618–1641.
- Miller, A, et P Sanderson. 2000. « Modeling “deranged” physiological systems for ICU information system design ». In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44:245–248. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.
- Miller, A, et Y Xiao. 2007. « Multi-Level Strategies to Achieve Resilience for an Organisation Operating at Capacity: A Case Study at a Trauma Centre ». *Cognition, Technology & Work* 9 (2): 51-66. <https://doi.org/10.1007/s10111-006-0041-0>
- Miller, A. 2004. « A Work Domain Analysis Framework for Modelling Intensive Care Unit Patients ». *Cognition, Technology & Work* 6 (4): 207-22. <https://doi.org/10.1007/s10111-004-0151-5>.
- Miller, GA. 1956. « The magical number seven, plus or minus two. Some limits on our capacity for processing information ». *Psychological Review*, 63 (2) : 81-97.

- Miller, MJ, KM McGuire, et KM Feigh. 2017. « Decision Support System Requirements Definition for Human Extravehicular Activity Based on Cognitive Work Analysis ». *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* 11 (2): 136-65.
- Misal, US, SA Joshi, et MM Shaikh. 2016. « Delayed Recovery from Anesthesia: A Postgraduate Educational Review ». *Anesthesia: Essays and Researches* 10 (2): 164. <https://doi.org/10.4103/0259-1162.165506>
- Morineau, T, E Frénod, C Blanche, et L Tobin. 2009. « Turing Machine as an Ecological Model for Task Analysis ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 10 (6): 511-29. <https://doi.org/10.1080/14639220802368849>
- Morineau, T, et H Billet. 2007. « L'analyse du domaine de travail et les cartes cognitives pour évaluer une IHM-Application à un Logiciel de Finances ». *Revue d'Interaction Homme-Machine* Vol 8 (2).
- Morineau, T, et JM Flach. 2019. « The Heuristic Version of Cognitive Work Analysis: A First Application to Medical Emergency Situations ». *Applied Ergonomics* 79 : 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.07.008>
- Morineau, T, JM Flach, M Le Courtois, et P Chapelain. 2017. « An Extended Version of the Rasmussen's Dynamic Safety Model for Measuring Multitasking Behaviors during Medical Emergency ». *Proceedings of the International Symposium on Human Factors and Ergonomics in Health Care* 6 (1): 238-43. <https://doi.org/10.1177/2327857917061052>
- Morineau, T, X Morandi, N Le Moëllic, et P Jannin. 2013. « A Cognitive Engineering Framework for the Specification of Information Requirements in Medical Imaging: Application in Image-Guided Neurosurgery ». *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 8 (2): 291-300. <https://doi.org/10.1007/s11548-012-0781-7>
- Mulvihill, CM, PM Salmon, V Beanland, MG Lenné, GJM Read, GH Walker, et NA Stanton. 2016. « Using the Decision Ladder to Understand Road User Decision Making at Actively Controlled Rail Level Crossings ». *Applied Ergonomics* 56: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.02.013>
- Murray, WB, et PA Foster. 2000. « Crisis Resource Management among Strangers: Principles of Organizing a Multidisciplinary Group for Crisis Resource Management ». *Journal of Clinical Anesthesia* 12 (8): 633-38. [https://doi.org/10.1016/S0952-8180\(00\)00223-3](https://doi.org/10.1016/S0952-8180(00)00223-3)
- Naik, VN, et SE Brien. 2013. « Review Article: Simulation: A Means to Address and Improve Patient Safety ». *Canadian Journal of Anesthesia*, 60 (2): 192-200. <https://doi.org/10.1007/s12630-012-9860-z>
- Naikar, N, A Moylan, et B Pearce. 2006. « Analysing Activity in Complex Systems with Cognitive Work Analysis: Concepts, Guidelines and Case Study for Control Task Analysis ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 7 (4): 371-94.

- Naikar, N, B Pearce, D Drumm, et PM Sanderson. 2002. « A formative approach to designing teams for first-of-a-kind, complex systems ». In *Human Decision Making and Control*, 162. C.W. Johnson.
- Naikar, N, D Drumm, B Pearce, et MP Sanderson. 2000. « Designing new teams with cognitive work analysis ». In *Proceedings of the Fifth Australian Aviation Psychology Symposium*, 20–24.
- Naikar, N, et A Saunders. 2003. « Crossing the boundaries of safe operation: An approach for training technical skills in error management ». *Cognition, Technology & Work* 5 (3): 171-80. <https://doi.org/10.1007/s10111-003-0125-z>
- Naikar, N, et B Elix. 2015. « Designing for Adaptation with Cognitive Work Analysis: Initial Conceptualisation of an Approach for Integrated Sociotechnical System Design ». In *Proceedings 19th Triennial Congress of the IEA*. Melbourne.
- Naikar, N, et PM Sanderson. 1999. « Work domain analysis for training-system definition and acquisition. » *The international journal of aviation psychology* 9 (3): 271-90.
- Naikar, N, et PM Sanderson. 2001. « Evaluating design proposals for complex systems with work domain analysis. » *Human Factors* 43: 529-42.
- Naikar, N, R Hopcroft, et A Moylan. 2005. « Work domain analysis: Theoretical concepts and methodology ». DSTO Technical Report (DSTO-TR-1665). Edinburgh, Australia: System Sciences Laboratory.
- Naikar, N. 2006. « An examination of the key concepts of the five phases of cognitive work analysis with examples from a familiar system ». In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50:447–451. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.
- Naikar, N. 2010. « A Comparison of the Decision Ladder Template and the Recognition-Primed Decision Model ». DSTO-TR-2397. Australia: DSTO Defence Science and Technology Organisation.
- Naikar, N. 2013. *Work Domain Analysis: Concepts, Guidelines and Cases*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.
- Naikar, N. 2017. « Cognitive Work Analysis: An Influential Legacy Extending beyond Human Factors and Engineering ». *Applied Ergonomics* 59 : 528-40.
- Neuhaus, C, DE Lutnæs, et J Bergström. 2019. « Medical Teamwork and the Evolution of Safety Science: A Critical Review ». *Cognition, Technology & Work*. <https://doi.org/10.1007/s10111-019-00545-8>
- Nishisaki, A, R Keren, et V Nadkarni. 2007. « Does Simulation Improve Patient Safety?: Self-Efficacy, Competence, Operational Performance, and Patient Safety ». *Anesthesiology Clinics* 25 (2): 225-36. <https://doi.org/10.1016/j.anclin.2007.03.009>
- Norman, DA. 1988. *The psychology of everyday things*. New York, NY: Basic.

- Ottino, JM. 2003. « Complex Systems ». *AICHE Journal* 49 (2): 292-99.
- Ouyang, M, L Hong, MH Yu, et Q Fei. 2010. « STAMP-Based Analysis on the Railway Accident and Accident Spreading: Taking the China–Jiaoji Railway Accident for Example ». *Safety Science* 48 (5): 544-55. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.01.002>
- Parasuraman, R, TB Sheridan, et CD Wickens. 2000. « A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 30 (3): 286-97. <https://doi.org/10.1109/3468.844354>
- Patel, J, K Ahmed, KA Guru, F Khan, H Marsh, MS Khan, et P Dasgupta. 2014. « An Overview of the Use and Implementation of Checklists in Surgical Specialities – A Systematic Review ». *International Journal of Surgery* 12 (12): 1317-23. <https://doi.org/10.1016/j.ijss.2014.10.031>
- Prigogine, I. 1996. *La fin des certitudes : temps, chaos et les lois de la nature*. Odile Jacob. Paris.
- Procee, S, C Borst, R van Paasen, et M Mulder. 2017. « Toward Functional Augmented Reality in Marine Navigation: A Cognitive Work Analysis ». In *16th Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*.
- Quinn, JF, et S Perelli. 2016. « First and Foremost, Physicians: The Clinical versus Leadership Identities of Physician Leaders ». *Journal of Health Organization and Management* 30 (4): 711-28. <https://doi.org/10.1108/JHOM-05-2015-0079>
- Quinn, JF. 2013. « The Impact of Social Competencies and Role Factors on the Relational Construction of Identity and Participation of Physician Leaders ».
- Rabechault, F, et F Bart. 2015. « Le remplissage vasculaire ». *Urgences*, 9.
- Rasmussen, J, AM Pejtersen, et K Schmidt. 1990. « Taxonomy for Cognitive Work Analysis ». Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory.
- Rasmussen, J, AM Pejtersen, et LP Goodstein. 1994. *Cognitive Systems Engineering*. New York: Wiley-Interscience.
- Rasmussen, J, et K Vicente. 1989. « Coping with Human Errors through System Design: Implications for Ecological Interface Design ». *International Journal of Man-Machine Studies*, 31: 517-534
- Rasmussen, J. 1983. « Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models ». *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, n° 3: 257–266.
- Rasmussen, J. 1985. « The Role of Hierarchical Knowledge Representation in Decisionmaking and System Management ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-15 (2): 234-43. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313353>
- Rasmussen, J. 1986. *Information processing and human-machine interaction : an approach to cognitive engineering*. The Netherlands: Elsevier Science.

- Rasmussen, J. 1990. « The Role of Error in Organizing Behaviour ». *Ergonomics* 33 (10-11): 1185-99. <https://doi.org/10.1080/00140139008925325>
- Rasmussen, J. 1997. « Risk management in a dynamic society: a modelling problem. » *Safety Science*, 27: 183-213.
- Read, GJM, PM Salmon, et MG Lenné. 2012. « From Work Analysis to Work Design: A Review of Cognitive Work Analysis Design Applications ». In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 56 (1): 368-72.
- Read, GJM, PM Salmon, et MG Lenné. 2015. « Cognitive Work Analysis and Design: Current Practice and Future Practitioner Requirements ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 16 (2): 154-73. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2014.930935>
- Régis, N. 2011. « Tunnelisation Attentionnelle: Définitions de métriques physiologiques et comportementales pour diagnostiquer la tunnelisation attentionnelle chez un opérateur humain ».
- Reising, DVC. 2000. « The abstraction hierarchy and its extension beyond process control ». In *Proc. Int. Ergonomics Assn./Human Factors Ergonomics Soc.*
- Rosen, MA, E Salas, KA Wilson, HB King, M Salisbury, JS Augenstein, DW Robinson, et DJ Birnbach. 2008. « Measuring Team Performance in Simulation-Based Training: Adopting Best Practices for Healthcare ». *Simulation in Healthcare: The Journal of the Society for Simulation in Healthcare* 3 (1): 33-41. <https://doi.org/10.1097/SIH.0b013e3181626276>
- Roth, EM, et AM Bisantz. 2013. « Cognitive Work Analysis ». In *The Oxford Handbook of Cognitive Engineering*. Édité par JD Lee et A Kirlik. 240-260.
- Rydenfält, C, A Ek, et PA Larsson. 2014. « Safety Checklist Compliance and a False Sense of Safety: New Directions for Research ». *BMJ Quality & Safety* 23 (3): 183-86. <https://doi.org/10.1136/bmjqs-2013-002168>
- Salas, E, MA Rosen, et H King. 2007. « Managing Teams Managing Crises: Principles of Teamwork to Improve Patient Safety in the Emergency Room and Beyond ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 8 (5): 381-94. <https://doi.org/10.1080/14639220701317764>
- Salmon, PM, GH Walker, GJM Read, N Goode, et NA Stanton. 2017. « Fitting Methods to Paradigms: Are Ergonomics Methods Fit for Systems Thinking? » *Ergonomics* 60 (2): 194-205. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1103385>
- Salmon, PM, GJM Read, et NJ Stevens. 2016. « Who Is in Control of Road Safety? A STAMP Control Structure Analysis of the Road Transport System in Queensland, Australia ». *Accident Analysis & Prevention* 96: 140-51. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.05.025>
- Salmon, PM, NA Stanton, AC Gibbon, DP Jenkins, et GH Wlaker. 2010. *Human Factors Methods and Sports Science*. Boca Raton, FL: CRC Press.

- Salmon, PM, NA Stanton, M Lenne, DP Jenkins, L Rafferty, et GH Walker. 2011. *Human Factors Methods and Accident Analysis: Practical Guidance and Case Study Applications*. Farnham UK: Ashgate Publishing Limited.
- Salmon, PM, R McClure, et NA Stanton. 2012. « Road Transport in Drift? Applying Contemporary Systems Thinking to Road Safety ». *Safety Science* 50 (9): 1829-38. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.04.011>
- Salvucci, DD. 2013. Attention. In Lee J, & Kirlik A, eds. *Oxford handbook of cognitive engineering*. Oxford, University Press ;57-67.
- Sanderson, P, N Naikar, G Lintern, et S Goss. 1999. « Use of cognitive work analysis across the system life cycle: From requirements to decommissioning ». In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 43:318–322. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.
- Sanderson, P. 1998. « Cognitive work analysis and the analysis, design, and evaluation of human-computer interactive systems ». In *Computer Human Interaction Conference*, 220–227. IEEE.
- Saranagi, S. 2008. « Delayed Awakening From Anaesthesia ». *The Internet Journal of Anesthesiology* 19 (1): 4.
- Schull, MJ, LE Ferris, JV Tu, JE Hux, et DA Redelmeier. 2001. « Problems for clinical judgment: 3. Thinking clearly in an emergency. » *Canadian Medical Association Journal*, n° 164: 1170 –1175.
- Sebillote, S. 1991. « Décrire des tâches selon les objectifs des opérateurs. De l'interview à la formalisation ». *Le Travail humain*, 54.
- Shaikh, SI, et RR Lakshmi. 2014. « Delayed Awakening after Anaesthesia- A Challenge for an Anaesthesiologist ». *International Journal of Biomedical and Advance Research* 5 (8): 352. <https://doi.org/10.7439/ijbar.v5i8.829>
- Shappell, SA, et DA Wiegmann. 2000. « The Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) ». DOT/FAA/AM-01/3. US Department of Transportation.
- Sharp, TD, et AJ Helmicki. 1998. « The Application of the Ecological Interface Design Approach to Neonatal Intensive Care Medicine ». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 42 (3): 350-54. <https://doi.org/10.1177/154193129804200336>
- Shaw, R, et M Turvey. 1999. Ecological foundations of cognition: II. Degrees of freedom and conserved quantities in animal-environment systems. *Journal of Consciousness Studies*, 6 : 111-123.
- Shepherd, A. 1998. « HTA as a framework for task analysis ». *Ergonomics* 41 (11), 1537–1552.
- Sheridan, TB. 2011. « Adaptive Automation, Level of Automation, Allocation Authority, Supervisory Control, and Adaptive Control: Distinctions and Modes of Adaptation ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 41 (4): 662-67. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2010.2093888>

- Simon, H. 1981. *The sciences of the artificial*. Cambridge : MIT Press.
- Sousa, D. 2014. « Validation in Qualitative Research: General Aspects and Specificities of the Descriptive Phenomenological Method ». *Qualitative Research in Psychology* 11 (2): 211-27. <https://doi.org/10.1080/14780887.2013.853855>
- Stanton, NA, P Salmon, G Walker, C Baber, et D Jenkins. 2005. *Human Factors Methods: A Practical Guide for Engineering and Design*. Aldershot: Ashgate.
- Suchman, LA. 1987. *Plans and Situated Actions. The Problem of Human-Machine Communication*. Cambridge University Press.
- Svedung, I, et J Rasmussen. 2002. « Graphic Representation of Accident scenarios: Mapping System Structure and the Causation of Accidents ». *Safety Science* 40 (5): 397-417. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(00\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00036-9)
- Taib, IA, AS McIntosh, C Caponecchia, et T Baysari. 2011. « A review of medical error taxonomies: A human factors perspective ». *Safety Science* 49: 607-15.
- Thomassen, O. 2012. « Implementation of Safety Checklists in Medicine: Not as Simple as It Sounds: Safety Checklists ». *Acta Anaesthesiologica Scandinavica* 56 (6): 801-2. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.2012.02684.x>
- Underwood, P, et P Waterson. 2013. « Accident Analysis Models and Methods: Guidance for Safety Professionals ». Loughborough University, 28.
- Van Klei, WA, RG Hoff, EEHL van Aarnhem, RKJ Simmermacher, LPE Regli, TH Kappen, L van Wolfswinkel, CJ Kalkman, WF Buhre, et LM Peelen. 2012. « Effects of the Introduction of the WHO “Surgical Safety Checklist” on In-Hospital Mortality: A Cohort Study ». *Annals of Surgery* 255 (1): 44-49. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e31823779ae>
- Vicente, KJ, et J Rasmussen. 1990. « The ecology of human-machine systems II: Mediating direct perception in complex work domains ». *Ecological psychology* 2 (3): 207–249.
- Vicente, KJ, et K Christoffersen. 2006. « The Walkerton E. Coli Outbreak: A Test of Rasmussen’s Framework for Risk Management in a Dynamic Society ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 7 (2): 93-112. <https://doi.org/10.1080/14639220500078153>
- Vicente, KJ. 1999a. « Wanted: psychologically relevant, device-and event-independent work analysis techniques ». *Interacting with Computers* 11(3):237–254.
- Vicente, KJ. 1999b. *Cognitive Work Analysis: Toward Safe, Productive, and Healthy Computer-Based Work*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Walker, IA, S Reshamwalla, et IH Wilson. 2012. « Surgical Safety Checklists: Do They Improve Outcomes? » *British Journal of Anaesthesia* 109 (1): 47-54. <https://doi.org/10.1093/bja/aes175>

- Wallace, C, et T Engelhardt. 2015. « Videolaryngoscopes in Paediatric Anaesthesia ». *Current Treatment Options in Pediatrics* 1 (1): 25-37. <https://doi.org/10.1007/s40746-014-0007-z>
- Warren, WH. 1984. « Perceiving affordances: Visual guidance of stair climbing ». *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 10:683-703.
- Watson, HA. 1961. *Lunch Control Safety Study*. Murray Hill, NJ: Bell Labs.
- Weinger, MB. 2002. « Human Factors Research in Anesthesia Patient Safety: Techniques to Elucidate Factors Affecting Clinical Task Performance and Decision Making ». *Journal of the American Medical Informatics Association* 9 (90061): 58S - 63. <https://doi.org/10.1197/jamia.M1229>
- Weiser, TG, AB Haynes, G Dziekan, WR Berry, SR Lipsitz, et AA Gawande. 2010. « Effect of A 19-Item Surgical Safety Checklist During Urgent Operations in A Global Patient Population ». *Annals of Surgery* 251 (5): 976-80.
- Wells, AJ. 2002. « Gibson's Affordances and Turing's Theory of Computation ». *Ecological Psychology* 14 (3): 140-80. https://doi.org/10.1207/S15326969ECO1403_3
- Wickens, CD, et AL Alexander. 2009. « Attentional Tunneling and Task Management in Synthetic Vision Displays ». *The International Journal of Aviation Psychology* 19 (2): 182-99. <https://doi.org/10.1080/10508410902766549>
- Wickens, CD. 2008. « Multiple Resources and Mental Workload ». *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 50 (3): 449-55. <https://doi.org/10.1518/001872008X288394>
- Winters, BD, AP Gurses, H Lehmann, JB Sexton, C Rampersad, et PJ Pronovost. 2009. « Clinical Review: Checklists - Translating Evidence into Practice ». *Critical Care* 13 (6): 210. <https://doi.org/10.1186/cc7792>
- Wolff, M, F Vanderhaegen, M Brethault, H Brisson, et R Mollard. 2018. « Vers une possible contribution à la compréhension de "l'effet tunnel" : une étude exploratoire », 11.
- Wong, WBL, PJ Sallis, et D O'Hare. 1998. « The Ecological Approach to Interface Design: Applying the Abstraction Hierarchy to Intentional Domains ». In *Proceedings 1998 Australasian Computer Human Interaction Conference*, 144-51. Adelaide, SA, Australia: IEEE Comput. Soc.
- Woods, D, S Dekker, R Cook, L Johannesen, et N Starter. 2010. *Behind Human Error*. 2^e éd. Farnham: Ashgate.
- Xiao, Y, P Milgram, et D.J Doyle. 1997. « Planning Behavior and Its Functional Role in Interactions with Complex Systems ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 27 (3): 313-24. <https://doi.org/10.1109/3468.568740>
- Xiao, Y, S Schenkel, S Faraj, CF Mackenzie, et J Moss. 2007. « What Whiteboards in a Trauma Center Operating Suite Can Teach Us About Emergency Department Communication ». *Annals of Emergency Medicine* 50 (4): 387-95.

Xiao, Y, WA Hunter, CF Mackenzie, NJ Jefferies, RL Horst, et L Group. 1996. « Task Complexity in Emergency Medical Care and Its Implications for Team Coordination ». *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 38 (4): 636-45.

Xiao, Y. 1994. « Interacting with Complex Work Environments: A Field Study and a Planning Model ». *Philosophy*, Toronto: Department of Industrial Engineering.

Yu, X, E Lau, KJ Vicente, et MW Carter. 2002. « Toward Theory-Driven, Quantitative Performance Measurement in Ergonomics Science: The Abstraction Hierarchy as a Framework for Data Analysis ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 3 (2): 124-42.

Zaccaro, SJ, AL Rittman, et MA Marks. 2001. « Team leadership ». *The Leadership Quarterly* 12: 451-83.

Zhang, J, VL Patel, TR Johnson, et EH Shortliffe. 2004. « A Cognitive Taxonomy of Medical Errors ». *Journal of Biomedical Informatics* 37 (3): 193-204.

Titre : Analyse de l'activité de soignants médicaux et paramédicaux sur simulateur haute-fidélité lors de simulations d'urgence, en vue de la conception d'un environnement de soins ergonomique.

Mots clés : Analyse cognitive du travail, Modèle dynamique de sûreté, Urgence médicale, Systèmes dynamiques, Méthode d'analyse des risques, Auto-organisation.

Résumé : Face à la complexité grandissante des systèmes de travail, un manque méthodologique est identifié, notamment pour l'analyse des systèmes faiblement couplés et non traçables. Au sein de ces systèmes, où humains, machines et environnement sont en constante interaction, le maintien des exigences de sécurité et de performance repose essentiellement sur la capacité des opérateurs à gérer l'ensemble des degrés de liberté disponibles et à s'adapter, en temps réel, aux situations anormales ou imprévues. Récemment, la méthode hCWA (2019) s'est développée pour répondre à ces besoins spécifiques. Dans la continuité des travaux menés dans le cadre de la hCWA, le travail de thèse est animé par deux objectifs méthodologiques.

Un premier, dit de « conception », applique la hCWA à différentes situations d'urgence médicale et montre dans quelles mesures son cadre conceptuel permet le développement d'assistances capables de soutenir les opérateurs dans la mise en place de comportements adaptatifs. Le second, dit de « modélisation », fournit de nouveaux outils méthodologiques modélisant les comportements des opérateurs sous la forme de trajectoires dans un espace défini par les contraintes fonctionnelles du système et délimitant le champ des actions possibles (DSM, Rasmussen 1997). Ces deux objectifs évoluent vers une volonté commune de contribuer à la conception d'environnements de soins ergonomiques, sûrs et performants.

Title: Activity analysis of medical and paramedical caregivers on a high-fidelity simulator during emergency simulations in order to design an ergonomic care environment.

Keywords: Cognitive work analysis, Dynamic safety model, Medical emergency, Dynamic systems, Risk analysis method, Self-organization.

Abstract: Given the growing complexity of work systems, a methodological lack is identified, particularly for the analysis of loosely coupled and intractable systems. Within these systems, where humans, machines and the environment are constantly interacting, the maintenance of the safety and performance requirements is essentially based on the operators' ability to manage of the all available degrees of freedom and to adapt, in real time, to unusual or unexpected situations. Recently, the hCWA (2019) method has been developed to meet these specific needs. In the continuity of the research carried out in the framework of the hCWA, the PhD work is driven by two methodological objectives.

The first objective, called "design", applies the hCWA to different medical emergency situations and shows how the conceptual framework allows the development of assistants able to support operators in the implementation of adaptive behaviors. The second "modeling" objective provides new methodological tools that model the operators' behaviors as trajectories in a space defined by the functional constraints of the system and delineating the field of possible actions (DSM, Rasmussen 1997). These two objectives are evolving towards a common desire to contribute to the design of ergonomic, safe and efficient care environments.