HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

Présentée à

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

Spécialité : SYSTÈMES INDUSTRIELS

par

Franck Fontanili

Professeur Agrégé de Génie Mécanique, Docteur de l'Université Paris 13

Maitre Assistant au Centre Génie Industriel de IMT Mines Albi

---

Du diagnostic organisationnel au pilotage prédictif des parcours patients à l'hôpital

Une proposition de système cyber-physique hospitalier à base de doubles numériques

---

Soutenue le 5 juillet 2022 devant le jury composé de :

Mme. Caroline Thierry	Professeure, Université Toulouse 2 Jean Jaurès IRIT/ADRIA	Rapporteure
M. Thibaud Monteiro	Professeur, INSA Lyon DISP	Rapporteur
M. Gregory Zacharewicz	Professeur, IMT Mines Alès LG2IP	Rapporteur
Mme. Maria Di Mascolo	Directrice de recherche CNRS G-SCOP Grenoble	Examinatrice
M. Bruno Vallespir	Professeur, Université de Bordeaux IMS	Examinateur
Dr. Jane Poincenot	Chirurgien viscéral, médecin coordinateur gestion des risques associés aux soins au CHI de Créteil	Examinatrice invitée
M. Elyes Lamine	Directeur ISIS INU Champollion CGI IMT Mines Albi	Examinateur
M. Hervé Pingaud	Professeur, INU Champollion LGC & SGRL	Examinateur correspondant

HDR préparée au Centre Génie Industriel de IMT Mines Albi

à Victoire, Aliyah, Naël, Amaury, et Mila

Rien n’est jamais perdu tant qu’il reste quelque chose à trouver.
Pierre Dac

La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne.

La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi.

Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi !

Albert Einstein

Cultiver les sciences et ne pas aimer les hommes, c’est allumer un flambeau et fermer les yeux.

Proverbe chinois

Préambule et remerciements

L'immense majorité des chercheurs préparent leur Habilitation à Diriger les Recherches (HDR) dix à quinze ans après leur doctorat, donc aux alentours de leur quarantième anniversaire. Ce diplôme leur ouvre la voie vers la plus grande partie de leur carrière qui se prolonge encore pendant vingt à trente ans. En commençant une carrière d'enseignant-chercheur à l'âge canonique de 40 ans, j'ai démarré avec un handicap de départ ne me permettant pas de suivre le plan de carrière habituel. Après avoir très naïvement projeté que, comme mes pairs, je me plierai à cet exercice, j'ai d'abord déployé mes talents de procrastinateur face aux tâches qui ne m'emballent guère pour me consacrer totalement à celles que j'avais choisies comme carburant, et en profiter pleinement, tel un épicurien. Le temps passant, j'ai ensuite pensé que cette habilitation ne m'apporterait rien, et que de ne pas l'avoir ne m'empêcherait pas de continuer à mener des projets de toutes natures. J'avais totalement enterré la "*Hache des R.*", tel un chien enterre un os au fond du jardin : peu de chance de la voir réapparaitre… jusqu'à un beau jour de l'année 2019 où le nouveau chef du Centre Génie Industriel de IMT Mines Albi, Xavier Lorca, trouve les arguments et me convainc de me lancer dans cet exercice. C'est à lui que j'adresse mes premiers remerciements.

J'ai donc voulu innover en la matière en rédigeant ce manuscrit d'habilitation après trente-huit (oui, 38) ans de carrière. Il paraitrait que je ne suis pas le plus vieux à tenter ce diplôme national de l'enseignement supérieur, mais être sur le podium des plus anciens m'apporterait une petite gloire personnelle. Si l'administration accepte de déroger à la règle de l'âge limite de départ à la retraite, si le temps qui passe n'entame pas mon énergie et ma motivation, si je ne glisse pas sur une peau de banane malencontreusement jetée sur mon passage, … et si ma femme ne menace pas de me quitter avant, j'aimerais moi aussi disposer encore de vingt à trente années de vie professionnelle devant moi pour mettre en œuvre les projets et travailler sur les perspectives que je décris dans la deuxième partie de ce manuscrit. Malgré mon optimisme naturel, je crains que ce ne soit pas très réaliste, et que je doive finalement me résoudre à affuter mes gaules et préparer mon bateau pour partir à la pêche à l'horizon de cette décennie. Mais cela devrait me laisser le temps de voir pousser et se développer quelques graines que j'ai semées. Tout d'abord, Cléa Martinez et Canan Pehlivan, mes jeunes collègues enseignantes-chercheuses que je remercie de m'avoir rejoint depuis peu pour poursuivre avec moi l'aventure extraordinaire de l'axe IOS, et pour prendre le relais pour le développer. Ensuite, les doctorants que j'ai encadrés ou encadre encore : Samer Alsamadi, Leah Rifi, Abdallah Karakra, Liwen Zhang, Eva Petitdemange, Sina Namaki Araghi, Quentin Schoen, Romain Miclo, Marie Falcon, Samieh Mirdamadi. La première partie de ce manuscrit rassemble des petits bouts de leur travail conséquent. Mais ces petits bouts mis bout à bout constituent toute la richesse scientifique que j'ai acquise au fil des ans, grâce à eux. Ils me permettent d'avancer dans ma vie de chercheur et vers de nouveaux projets. Je les remercie tous infiniment. Je remercie aussi les différents directeurs de thèses qui m'ont proposé de faire partie de l'encadrement ou qui ont accepté de diriger un sujet que j'avais préparé : Lionel Dupont, Matthieu Lauras, Frederick Benaben, Hervé Pingaud, et Jacques Lamothe. Je ne connais pas encore les prochains doctorants que j'encadrerai, mais je les remercie aussi par avance car je ne pense pas avoir l'occasion de le faire dans un prochain manuscrit, à moins que la future réforme des retraites ne contraigne les enseignants-chercheurs à rédiger une autre Habilitation, mais au Départ à la Retraite cette fois…

Il y a dans le monde de la recherche des égos parfois un peu surdimensionnés. C'est sans doute l'un des travers de notre système de progression et de valorisation qui promeut et met en avant l'individu plutôt que l'équipe. J'admire pour ma part et je tente de prendre pour modèle ceux d'entre nous qui demeurent simples, font preuve d'humilité et d'abnégation, tout en étant de brillants

chercheurs reconnus et sollicités pour leur expertise. Je suis donc très honoré que Caroline Thierry, Thibaud Monteiro et Gregory Zacharewicz acceptent d'être les rapporteurs de mon travail car ils possèdent ces qualités. Vous devez être des exemples à citer pour les chercheurs, jeunes et moins jeunes. J'espère ne pas vous avoir déçu quand vous avez lu ce manuscrit et que vous ne regretterez pas d'avoir accepté cette tâche. Quel que soit votre avis, je continuerai à vous apprécier, donc n'hésitez pas à souligner mes faiblesses quand vous rédigerez votre rapport. Tout commentaire venant de vous sera une source d'amélioration et d'inspiration pour moi. Si votre rapport est favorable à mon habilitation, je ferai de mon mieux pour garder la tête froide, afin que, tel un double numérique, je demeure fidèle à votre image et à votre comportement au fil du temps.

Les hasards de la vie professionnelle m'ont fait croiser des personnes qui m'ont beaucoup apporté pour différentes raisons : en m'accordant une confiance aveugle alors qu'elles me connaissaient à peine, en m'apportant avec simplicité et élégance des points de vue autres que les miens, par leur prise de recul scientifique et leur capacité à bien poser les problèmes avant de chercher à les résoudre, pour leurs qualités humaines, …et/ou pour plein d'autres raisons difficiles à exprimer par écrit, car c'est le cœur qui parle, et que je ne sais pas toujours bien traduire mes sentiments. Maria Di Mascolo, Jane Poincenot, Bruno Vallespir et Elyes Lamine font partie de ces personnes et je les remercie d'avoir accepté, sans aucune hésitation, de figurer dans mon jury d'habilitation.

Ceux qui connaissent bien Hervé Pingaud n'auront pas de mal à l'imaginer me dire, sur un ton grave et solennel, comme l'aurait dit Maitre Pô à son jeune disciple : "*Quand ton manuscrit sera prêt et que je l'aurai validé, Petit Scarabée, tu pourras l'envoyer à tes rapporteurs*". Cela ne s'est pas passé exactement comme cela… Si la relation entre Hervé et moi durant ce travail a été effectivement celle d'un disciple (moi) face à son maître à penser, elle a aussi été celle de deux collègues et amis de près de vingt ans. Hervé a accepté d'être mon correspondant auprès de l'INPT, autrement dit de soutenir mon inscription devant la commission de la recherche de cet institut, et je l'en remercie car mon dossier n'était pas forcément facile à défendre. Mais cela ne constitue que la face administrative du rôle qu'il a joué. L'autre face, bien plus importante à mes yeux, est celle du conseiller, du mentor, du maitre, de celui que l'on écoute quand il parle. Il a analysé et a su trouver mes points faibles sans pour autant chercher à m'affaiblir, mais bien au contraire pour me permettre de grandir. Durant sa carrière, il n'a pas hésité à franchir les barrières de sa discipline d'origine dans laquelle il excellait, le génie des procédés, pour étendre ses connaissances vers le génie industriel, l'informatique et les systèmes d'information, et le système de santé, disciplines et domaines dans lesquels il est tout aussi excellent et reconnu comme expert. Si la connaissance mène à la sagesse, Hervé en est une parfaite illustration. Je le remercie aussi pour cela, car le tempérament méditerranéen et la passion qui emportent le Petit Scarabée ont parfois (souvent ?) besoin d'être contenus par les paroles de Maître Pô.

Je suis un pur produit de la formation continue non déclarée et autofinancée[1]. Depuis plus de trente ans, j'ai en effet préparé l'agrégation, puis un DEA, ensuite un doctorat, et enfin cette habilitation à diriger les recherches tout en exerçant en parallèle une activité à temps plein, sans avoir jamais demandé aucun aménagement ou réduction de ma charge de travail. Pour l'habilitation, tout le monde, à ma connaissance, est logé à la même enseigne, et pourrait donc témoigner de la difficulté de la tâche, quand on a une charge d'enseignement, des responsabilités collectives, des projets à monter ou à piloter, et des doctorants à encadrer. La préparation dépasse allégrement les limites de la durée légale de travail, et empiète sur le reste : vie personnelle et familiale, sommeil, congés.

[1] Je précise pour les agents du fisc qui liraient ce manuscrit qu'il s'agit d'une blague un peu lourde, comme j'ai l'habitude d'en faire, à ne pas prendre au premier degré.

Grâce à l'instauration récente du télétravail dans mon établissement, j'ai pu passer une trentaine de journées à travailler depuis mon domicile entre juillet 2021 et maintenant. Tout en assurant les tâches habituelles et en tentant de me limiter à l'essentiel, j'ai ainsi pu m'isoler dans un environnement moins sujet aux sollicitations imprévues afin de me concentrer sur la rédaction de ce manuscrit. Mais l'intermittence des tâches ne m'a pas permis d'être très productif, et mon humeur habituellement joyeuse s'est parfois assombrie quand la rédaction n'avançait pas. Certains étudiants, doctorants, collègues et proches l'auront constaté ou en auront fait les frais… Même si je n'ai pas eu l'information à temps pour pouvoir en bénéficier, je remercie l'Institut Mines Télécom d'avoir mis en place en juin 2021 un dispositif permettant aux enseignants-chercheurs de préparer une habilitation à diriger les recherches durant 10 mois, avec un aménagement à hauteur de 25% du temps de travail, soit 50 jours consacré uniquement à cette fin. C'est effectivement le temps cumulé que j'estime avoir consacré à la rédaction de ce manuscrit. Les prochains collègues de l'IMT qui vont se lancer dans cet exercice pourront ainsi s'y consacrer avec un peu plus de sérénité et sans trop de sacrifices personnels.

Ma femme, Gisèle, mes enfants, Benjamin et Laura, et mes petits-enfants, Victoire, Aliyah, Naël, Amaury et Mila, constituent ma tribu, mon cercle fermé, mon pack, mon "*huit de devant*", et c'est grâce à eux que j'espère marquer, presque avant la fin du match, cet essai libérateur qu'est l'habilitation à diriger des recherches.

Sommaire

Introduction 13

Synthèse et mise en cohérence des travaux passés 17
1.1. Curriculum vitae 17
1.2. La simulation à événements discrets comme discipline principale 22
1.3. L'émancipation : enseignement et recherche en simulation à l'École des Mines d'Albi-Carmaux et au CGI (2003-2016) 30
1.4. La consolidation : un processus en cours depuis 2016 dans le domaine de la santé 43
1.5. Autres activités d'encadrement dans la recherche 61
1.6. Responsabilités collectives assurées 61
1.7. Activités d'expertise technique et scientifique 69
1.8. Ingénierie de plusieurs plateformes expérimentales pour l'enseignement et la recherche 73
1.9. Production scientifique 77
1.10. Interactions avec l'environnement scientifique, social et économique 83

Perspectives scientifiques et projet de recherche 89
2.1. Introduction 89
2.2. Un espace de problèmes délimité par la production de soins à l'hôpital 90
2.3. L'évolution de l'hôpital avec le développement du numérique dans la production de soins jusqu'aux systèmes cyber-physiques en santé (CPS-S) 99
2.4. Les systèmes cyber-physiques (CPS) utilisés en santé, les CPS-S 106
2.5. L'apport d'un double numérique dans un CPS-S pour le pilotage prédictif 110
2.6. Avoir une image fiable de la situation courante avec un centre de commande hospitalier 128
2.7. Mes perspectives scientifiques : un DT-CPS pour le suivi organisationnel et prédictif des parcours patient à l'hôpital 134
2.8. Conclusion et perspectives 141

Conclusion générale 147

Épilogue 151

Références bibliographiques 155

Introduction

La simulation de flux à événements discrets est sans nul doute la discipline scientifique qui a rythmé mes travaux de recherche, depuis ma thèse commencée en 1995, jusqu'aux thèses de doctorat que j'ai encadrées ou encadre encore. Mes travaux se positionnent sur tous les aspects liés à la construction d'un modèle de connaissance pour la simulation d'un processus de production de biens ou de services. Les réseaux de files d'attente et les différentes formes de modélisation de processus à événements discrets en constituent la base scientifique. L'utilisation et l'intégration de la simulation dans une démarche outillée de diagnostic organisationnel et d'amélioration continue sont une autre facette de mon travail. Par exemple, le couplage entre simulation et optimisation, le traitement et l'analyse des données d'entrée et des résultats de sortie, la définition de plans d'expérience, sont un aperçu de mes thématiques de recherche. L'interconnexion d'un simulateur avec le monde physique est celle qui s'inscrit dans le concept récent de double numérique (digital twin) sur lequel j'essaie de contribuer plus particulièrement.

Après avoir appliqué mes travaux et encadré trois thèses portant essentiellement sur les processus de production de biens, la logistique, et la Supply Chain industrielle, je m'intéresse depuis une dizaine d'années aux processus de production de soins et plus particulièrement à tout ce qui concerne la logistique hospitalière et les parcours patients, que ce soit à l'hôpital ou au domicile. C'est ainsi que depuis 2016, j'ai co-encadré sept thèses en rapport avec la santé, dont deux sont encore en cours.

Depuis début 2020, j'anime un nouvel axe de recherche appliquée en "*Ingénierie Organisationnelle pour la Santé (IOS)*" au sein du Centre Génie Industriel (CGI) de IMT Mines Albi. Cet axe apporte de la visibilité à nos travaux en santé et entraine aussi une dynamique très forte liée à ce domaine applicatif dont les besoins sont grands et plein de perspectives. C'est ainsi que l'équipe IOS se renforce depuis fin 2020. Nous avons pu recruter deux nouvelles enseignantes-chercheuses permanentes ayant des profils en recherche opérationnelle, processus stochastiques et science des données. Elles viennent en complément d'un enseignant-chercheur permanent (moi-même), d'un ingénieur de recherche, chargé principalement des développements informatiques en science des données, et de deux chercheurs associés, un académique "historique" senior qui réalise l'intégralité de sa recherche dans l'axe IOS, et un industriel junior, détaché par son entreprise à 20% de son temps de travail.

Pour mon projet de recherche personnel, je souhaite focaliser la suite de mes travaux sur le pilotage des parcours patients à l'hôpital à base d'un double numérique. Pour la petite et jeune équipe que j'anime, toutes les thématiques qui permettront de développer et d'ancrer dans la durée l'axe IOS dans la communauté française et internationale du génie industriel constitueront des opportunités à ne pas manquer.

Ce manuscrit comporte deux parties, chacune découpée en une dizaine de chapitres :

- La partie 1 est une synthèse et une mise en cohérence de mes travaux passés afin de faire apparaître mon expérience dans l'animation d'une recherche.

- La partie 2 correspond à un développement argumenté de mes perspectives scientifiques et de mon projet de recherche.

Partie 1

Synthèse et mise en cohérence des travaux passés

Synthèse et mise en cohérence des travaux passés

1.1. Curriculum vitae

1.1.1. Parcours professionnel

Le Tableau 1 résume les différentes étapes de mon parcours professionnel.

Je suis entré dans la vie active en juin 1984, en tant que dessinateur industriel dans un bureau d'études de sous-traitance pour Renault. Je concevais et dessinais, à la planche à dessin, des montages de contrôle pour des éléments de carrosserie. Mais ce travail ne me passionnait guère, ce qui fait que dès que j'ai été sollicité pour devenir "prof" de construction mécanique dans mon ancien lycée, je n'ai pas hésité un instant.

Fin octobre 1984, à 21 ans, sans aucune expérience, je me suis donc retrouvé pour la première fois face à une classe de terminale préparant un bac technique (un ou deux élèves étaient plus âgés que moi…), qui n'avait pas d'enseignant dans leur matière principale depuis la rentrée. Je me suis tout de suite pris au jeu. Enseigner et transmettre des connaissances donnait un sens à ma jeune vie professionnelle. Alors que je l'exerce depuis près de 40 ans sans aucune interruption, ce métier me passionne toujours autant.

Tableau 1. Les différentes étapes de mon parcours professionnel

Date	Fonction	Établissement-Lieu
2003 à aujourd'hui	Maître assistant	IMT Mines Albi (81)
1996-2003	PRAG	IUT de Cergy-Pontoise (95)
1992-1996	Professeur agrégé en CPGE	Lycée Newton - Clichy (92)
1988-1992	Professeur certifié	CNFP - Montlignon (95)
1988 (6 mois)	Support technique atelier CNC	Thomson SDC (Thalès) - Sartrouville (78)
1987-1988	Professeur certifié stagiaire	Lycée Jean-Jaurès - Argenteuil (95)
1985-1987	Élève-professeur	CFPET-ENS Cachan (94)
1984-1985	Maître auxiliaire	Lycée Jean-Jaurès - Argenteuil (95)
1984 (4 mois)	Dessinateur-projeteur	Sté. Macri-Boussard - Sarcelles (95)

Ce parcours, depuis ses débuts jusqu'à aujourd'hui, est atypique. Il est jalonné de nombreuses étapes qui ont ponctué une volonté d'évoluer au travers des strates de l'enseignement secondaire et supérieur. J'ai démarré dans le métier comme maître auxiliaire en lycée, puis, au gré de concours souvent très sélectifs, je suis successivement devenu professeur certifié après deux années de formation au CFPET-ENS[2] de Cachan, puis agrégé en génie mécanique en 1992. J'ai enseigné en lycée, de la 2nde à la terminale, puis j'ai été formateur de professeurs de technologie dans un centre

[2] Centre de Formation de Professeurs de l'Enseignement Technique - École Normale Supérieure de Cachan

de formation (CNFP[3]), avant de revenir en lycée pour être professeur de mécanique et construction mécanique en Classe Préparatoire aux Grandes Écoles (CPGE).

J'ai ensuite basculé en 1996 dans l'enseignement supérieur en tant que PRAG en IUT, c'est-à-dire avec une obligation de service de 384 heures par an, limitée exclusivement à l'enseignement. Durant mes années passées à l'IUT, je suis aussi intervenu jusqu'en 2003 comme vacataire dans des écoles d'ingénieurs (EPMI[4], ISMCM[5], ENPC[6] et ECP[7]).

Enfin, en 2003, j'ai été recruté à l'École des Mines d'Albi-Carmaux, aujourd'hui devenue IMT Mines Albi, en tant que maître assistant avec une charge d'enseignement et de recherche au Centre de Génie Industriel (CGI). J'avais au préalable obtenu en mars 2000 une qualification en 60ème et 61ème sections du CNU. En septembre 2022, cela fera 19 ans que je suis enseignant-chercheur dans cette même école d'ingénieurs à laquelle je suis très attaché.

> Mon parcours professionnel se résume en deux grandes périodes de 18-20 ans chacune : (1) d'abord exclusivement enseignant dans de multiples établissements et à différents niveaux, puis (2) enseignant-chercheur à IMT Mines Albi. Je ne peux donc pas cacher que j'ai un âge inhabituellement avancé pour soutenir une habilitation à diriger des recherches. Celle-ci vient ponctuer la seconde partie de ma vie professionnelle que j'ai entamée à mon arrivée à IMT Mines Albi en 2003. Elle me permettra, je l'espère, de disposer de la reconnaissance de mes pairs et de la liberté d'orientation de mes travaux qui m'ont parfois manquées jusqu'ici, pour les années qui me restent avant la fin de ma carrière.

1.1.2. Parcours universitaire

Je suis issu d'une génération de bacheliers techniques (série F1) dont le pourcentage d'admis atteignait à peine 55% en 1981[8]. À l'époque, ce bac permettait de rentrer dans la vie active, et j'ai fait partie de la petite proportion de ceux qui ont fait le choix et eu la chance de continuer leurs études.

J'ai donc poursuivi en BTS, et après avoir réussi cet examen en 1983, déjà attiré par l'enseignement, j'ai passé le concours spécial pour rentrer à l'ENS Cachan (anciennement ENSET). J'ai été classé 25ème. Mais il n'y avait malheureusement que 24 places offertes au concours… Pour me consoler de cette "médaille en chocolat", le directeur de l'ENSET de l'époque m'a gentiment proposé de suivre les cours de son école en auditeur libre, ce que j'ai fait pendant un an. Même si, comme les 24 lauréats du concours spécial BTS-DUT, j'ai pu nettement améliorer mes compétences scientifiques en tentant de combler le fossé qui me séparait de mes autres camarades de promotion issus d'une classe préparatoire, cette année a été psychologiquement très dure pour moi, et je n'ai pas pu, ni souhaité poursuivre. Je suis donc rentré dans la vie active en tant que dessinateur industriel en juin 1984 comme je l'ai décrit dans la section 1.1.1.

[3] Centre National de Formation de Professeurs à Montlignon (95)
[4] École de Production et Méthodes Industrielles à Cergy-Pontoise (95)
[5] Institut Supérieur de la Mécanique et de la Construction Mécanique à St-Ouen (93)
[6] École Nationale des Ponts et Chaussés à Marne-la-Vallée (77)
[7] École Centrale de paris à Chatenay-Malabry (92)
[8] https://archives-statistiques-depp.education.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/3519/resultats-provisoires-des-examens-du-baccalaureat-et-du-baccalaureat-de-technicien-session-normale-d

Je suis malgré tout revenu à l'ENS Cachan en 1985, mais par la petite porte du CFPET[9], en réussissant un concours qui me permettait de préparer en deux ans le CAPET[10] de Génie Mécanique. Après avoir été reçu au CAPET en 1987 (3ème au classement national), et tout en travaillant comme professeur certifié, j'ai préparé l'agrégation en candidat libre, grâce aux cours du CNED[11] et à quelques cours du soir au CNAM[12]. Après une première tentative infructueuse où je n'ai pu être qu'admissible, j'ai été reçu au concours externe de l'agrégation de Génie Mécanique (39ème au classement national) en 1990.

Malgré tous les efforts et sacrifices personnels fournis pour décrocher cette agrégation, j'avais encore envie d'approfondir mes connaissances. Grâce à une dérogation, j'ai pu suivre des cours en parallèle de ma charge d'enseignement pour obtenir en deux ans un DEA[13] de l'Université de Nancy en 1992. Enfin, le dernier jalon de mon parcours universitaire correspond à la préparation et à l'obtention en 1999 d'un doctorat en Génie Mécanique de l'Université de Paris 13, toujours en parallèle de mon activité principale de professeur agrégé.

Tableau 2. Les différentes étapes de mon parcours universitaire

Date	Diplôme	Établissement-Lieu
1999	Doctorat en Génie Mécanique	Université Paris XIII
1992	DEA en Production Automatisée	Université de Nancy I
1990	Agrégation de Génie Mécanique	
1987	CAPET Génie Mécanique et Productique	
1983	BTS Bureau d'études	Lycée Jean-Jaurès - Argenteuil (95)
1981	Baccalauréat technologique série F1	Lycée Gustave Monod - Enghien les Bains (95)

> Mon parcours universitaire ne suit donc pas la voie royale empruntée par la plupart de mes pairs. Contrairement à eux, je ne suis pas "*tombé dans la recherche quand j'étais petit*" pour paraphraser un célèbre héros de bande dessinée. Je me suis ouvert progressivement à ce monde, au fil d'une maturation durant laquelle j'ai passé du temps à étudier seul, en autodidacte, sur mon temps libre, et en parallèle de mon emploi d'enseignant du secondaire. Comme le résume le Tableau 2, ce parcours a été long, puisqu'entre mon bac et mon doctorat, il s'est écoulé 18 années avant d'atteindre le "camp de base" de la recherche.

Et presque 23 ans sont passés, très vite, entre mon doctorat et ce manuscrit d'habilitation à diriger des recherches. J'ai, durant cette période, pleinement profité de ce parcours long et sinueux qui m'a permis d'élargir mes connaissances, de la construction mécanique jusqu'au génie industriel, en étant guidé uniquement par le plaisir que me procurait les multiples projets, de formation comme de recherche, sur lesquels j'ai travaillés.

[9] Centre de Formation des Professeurs de l'Enseignement Technique
[10] Certificat d'Aptitude au Professorat de l'Enseignement Technique
[11] Centre National d'Enseignement à Distance
[12] Conservatoire National des Arts et Métiers
[13] Diplôme d'Études Approfondies

1.1.3. Profil d'enseignant-chercheur

Depuis mon recrutement à l'école des Mines d'Albi-Carmaux en 2003 sur un poste d'enseignant-chercheur, mon profil a évolué, à la fois sur les terrains d'application, et aussi sur les disciplines scientifiques. La recherche appliquée en Génie Industriel représente aujourd'hui une bonne moitié de mon activité, et j'ai la chance de pouvoir enseigner dans des matières très proches de mes centres d'intérêt en recherche. Mon profil est assez transversal dans le centre Génie Industriel puisque les terrains d'application qui constituent mon *espace de problèmes* sont :

- La **gestion et l'organisation de la chaîne logistique dans l'industrie**,
- L'**organisation du système de santé**. Comme je le développerai à plusieurs reprises dans ce manuscrit, ce terrain focalise aujourd'hui l'essentiel de mon activité, sachant que je reste en veille et disponible pour répondre à des sollicitations éventuelles sur le terrain de la logistique industrielle, d'autant plus quand des transferts vers la logistique hospitalière sont possibles.

Quant à l'*espace de solutions* dans lequel je cultive des liens entre recherche et enseignement, il est constitué de plusieurs disciplines scientifiques :

- La **simulation à événements discrets**, que l'on peut inclure dans le champ plus large de la recherche opérationnelle,
- L'**optimisation à base de méta-heuristique** (algorithmes génétiques notamment),
- L'ingénierie à base de modèles et plus particulièrement la **modélisation de processus (BPM)**, avec une dimension très opérationnelle pour les flux physiques de tous types (produits dans l'industrie, ou patients dans un hôpital),
- La science des données, avec notamment le traitement de données et la **fouille de processus** (Process Mining).

Dans cet espace de solutions, la simulation de flux à événements discrets constitue sans nul doute le capital scientifique qui a rythmé mes travaux de recherche depuis ma thèse commencée en 1995.

Les autres disciplines que je mentionne correspondent à une évolution "naturelle" et progressive de mon profil en permettant d'élargir le champ d'expertise sur les processus opérationnels en général, grâce à des concepts et des approches complémentaires à la simulation. C'est ainsi que mes travaux se positionnent sur tous les aspects liés à la construction d'un modèle de connaissance pour la simulation d'un processus de production. Les files d'attente et les différentes formes de modélisation de processus à événements discrets en constituent la base scientifique. L'utilisation et l'intégration de la simulation dans une démarche outillée de diagnostic organisationnel et d'amélioration continue sont une autre facette de mon travail. Le couplage entre simulation et optimisation, le traitement et l'analyse des données d'entrée et des résultats de sortie, la définition de plans d'expérience, sont un aperçu de mes thématiques de recherche qui entremêlent ces différentes disciplines.

L'interconnexion d'un simulateur avec le monde physique est celle qui s'inscrit dans le concept plus récent de double numérique (digital twin) et sur laquelle j'essaie de contribuer plus particulièrement. J'y reviendrai plus en détails dans la partie 2 de ce manuscrit.

J'ai aussi un bon niveau de connaissances et d'expertise pour certaines technologies récentes et innovantes que j'utilise dans le cadre de mes travaux :

- Les objets connectés (**IoT**),
- La géolocalisation indoor (**RTLS**).

> En résumé, mon profil me permet de travailler aujourd'hui sur des problématiques de **diagnostic, d'amélioration, et de pilotage de processus de production de biens et de soins**.

1.1.4. Activités d'enseignement

Alors que j'ai commencé ma carrière en enseignant la mécanique et le dessin industriel qui correspondent aux disciplines de ma formation initiale jusqu'à mon BTS, mon enseignement a ensuite évolué, d'abord vers le génie mécanique, puis vers la gestion de production que j'ai découvert lors de mes débuts en tant que PRAG[14] à l'IUT.

Tableau 3. Résumé des enseignements dispensés (volume de 175 heures durant l'année 2020-2021)

Niveau	Enseignement	Heures
M1E - 2ème année ingénieur IMT Mines Albi (filière étudiants)	Optimisation Discrète	15
M2E - 3ème année ingénieur IMT Mines Albi (filière étudiants)	Typologie et Analyse de de Flux	12
M2E - 3ème année ingénieur IMT Mines Albi (filière étudiants)	Logistique de Production/Implantation	10,5
M2E - 3ème année ingénieur IMT Mines Albi (filière étudiants)	Bases de la Simulation à événements discrets	12
M2E - 3ème année ingénieur IMT Mines Albi (filière étudiants)	Business Process Intelligence (Process Mining)	6
M2E - 3ème année ingénieur IMT Mines Albi (filière étudiants)	Démarche d'Amélioration à l'aide de la Simulation	19,5
M2E - 3ème année ingénieur IMT Mines Albi (filière étudiants)	Étude de cas Simulation	21
L3A - 1ère année ingénieur IMT Mines Albi (filière apprentis)	Outils informatiques	3,5
L3A - 1ère année ingénieur IMT Mines Albi (apprentissage)	Implantation d'atelier	30
M1A - 2ème année ingénieur IMT Mines Albi (filière apprentis)	Modélisation et simulation	17,5
M1A - 2ème année ingénieur IMT Mines Albi (filière apprentis)	Gestion des Ressources Hospitalières	3,5
MSc SCALE IMT Mines Albi & Toulouse Business School	Decision Support Tool - Discrete Event Simulation	24

[14] Professeur agrégé du second degré affecté dans l'enseignement supérieur.

Depuis mon affectation comme enseignant-chercheur à IMT Mines Albi, je me suis positionné sur un enseignement plus large correspondant au Génie Industriel. J'ai ainsi participé aux enseignements de tronc commun en gestion de projet, que ce soit pour la planification ou pour l'expression du besoin avec un cahier des charges fonctionnel, et en gestion des opérations.

Aujourd'hui, l'essentiel de mon activité d'enseignement concerne des cours dans le parcours Génie Industriel (GI) de dernière année du cycle d'ingénieur de l'École des Mines d'Albi. Je dispense un enseignement portant sur l'analyse, la modélisation, la simulation et l'amélioration des flux industriels. J'interviens aussi dans la formation d'ingénieurs par l'apprentissage sur sensiblement les mêmes enseignements, ainsi que dans le Master of Science (MSc) en Supply Chain and Lean Management (SCALE) avec Toulouse Business School[15] (enseignement en anglais).

Au total, j'ai une charge d'enseignement face aux élèves d'environ 175 heures par an. Le Tableau 3 résume les enseignements réalisés durant l'année scolaire 2020-2021.

En dehors des heures d'enseignement face aux élèves, j'assure aussi chaque année en moyenne le tutorat de 5 stages en entreprise d'étudiants de 2ème et 3ème année du cycle ingénieur.

Je suis aussi responsable pédagogique de l'UE Supply Chain 4.0 du parcours GI de la formation d'ingénieurs depuis 2016 en assurant la coordination de 27 modules de cours et de 16 intervenants.

1.2. La simulation à événements discrets comme discipline principale

Comme je l'ai déjà évoqué dans la section 1.1.3, la simulation à événements discrets est la technique ou la discipline principale sur laquelle je m'appuie, non seulement dans mes enseignements, mais aussi pour apporter des solutions aux questions de recherche que j'adresse.

Le Tableau 4 présente une synthèse de l'apport de la simulation dans les thèses sur lesquelles j'ai travaillé, d'abord en tant que doctorant moi-même, puis en tant qu'encadrant. Comme on peut le voir, cette technique apparait dans la presque totalité des thèses.

Ce tableau montre aussi les trois phases du cycle de vie des processus sur lesquelles j'ai travaillé jusqu'à présent et qui sont concernées par la simulation :

1. Le pilotage, qu'il soit off-line ou on-line.
2. La conception et le dimensionnement.
3. L'amélioration et l'optimisation.

Je mets aussi en évidence les trois grandes phases d'évolution de mes connaissances sur la recherche en simulation :

1. Une appropriation des méthodes, techniques et outils.
2. Une émancipation, grâce à des sujets très orientés vers la production industrielle.
3. Une consolidation dans le domaine applicatif de la santé.

[15] https://www.tbs-education.com/press-releases/msc-scale-the-degree-with-four-vocational-qualifications/

Tableau 4. Synthèse de l'apport de la simulation dans les thèses[16]

Période	Phases	# Thèse	Doctorant	Apport de la simulation	Collaboration industrielle	Phase du cycle de vie	Domaine applicatif	Articles WoS & Scopus	Congrès	En reviewing
1995-1999	Appropriation	0	Franck Fontanili (1995-1999)	**Couplage avec un algorithme génétique pour optimiser le lancement**		Pilotage off-line (préparation)	Production manufacturière	1	3	
2003-2016	Emancipation	1	Samieh Mirdamadi (2006-2009)	**Temps réel en connexion avec un MES**		Pilotage on-line (exécution)	Production manufacturière		2	
		2	Marie Falcon (2009-2013)	Aucun (thématique de dispersion) mais sujet exploratoire	TBC - Syrthéa	Conception - Production	Construction - Bâtiment		2	
		3	Romain Miclo (2013-2016)	**Evaluation du DDMRP par rapport à d'autres stratégies de pilotage des flux : Kanban, ConWip**	Agilea	Conception - Dimensionnement	Production manufacturière	1	6	
2016-2022	Consolidation	4	Sina Namaki (2016-2019)	**Diagnostic des processus avec le RTLS pour collecter des données en temps réel**	Mapple High Tech	Amélioration	Santé	1	5	
		5	Quentin Schoen (2016-2019)	**Evaluation du pilotage décentralisé du transport de colis intelligents (poches de sang EFS)**	Etablissement Français du Sang	Conception - Amélioration	Santé (Logistique)	1	7	
		6	Eva Petitdemange (2017-2020)	**Evaluation de la performance des SAMU pour minimiser le temps de décroché des appels entrants**	SAMU 12-31-81	Amélioration	Santé	1	4	
		7	Liwen Zhang (2017-2021)	**Evaluation des plannings de tournées d'intervenants à domicile en prenant en compte la variabilité des durées**	Berger-Levrault	Pilotage off-line (préparation)	Santé		7	1
		8	Abdallah Karakra (2018-2021)	**Double numérique pour le suivi en temps réel et la prédiction des parcours patients à l'hôpital**		Pilotage on-line (exécution)	Santé		4	1
		9	Leah Rifi (2020-2023)	**Programmation et régulation d'un bloc opératoire**	Groupe Vivalto	Pilotage	Santé	1	2	1
		10	Samer AlSamadi (2022-2025)	**Evaluation de la planification des opérateurs d'un centre d'appel pour personnes sourdes**	Elioz (groupe Ivès)	Pilotage	Handicap			1

[16] La numérotation des thèses (#1 à #10) est celle qui est utilisée dans la suite de ce manuscrit.

Dans les deux sections qui suivent (1.2.1 et 1.2.2), je vais d'abord expliquer les origines de mon intérêt pour la simulation, puis mon appropriation personnelle de cette discipline par la recherche menée durant ma thèse.

1.2.1. Les origines (1992), grâce à l'enseignement, qui guident mes futurs travaux de recherche avec la simulation

J'ai découvert les outils de modélisation et de simulation grâce à l'enseignement, à mes débuts en tant que vacataire dans le tout nouveau département Qualité, Logistique Industrielle et Organisation (QLIO), anciennement Organisation et Gestion de la Production (OGP) de l'IUT de Cergy-Pontoise, en 1994. Le programme pédagogique comportait un cours en "*modélisation et simulation de flux*", totalement nouveau et inconnu des enseignants permanents de ce département, … et de moi-même ! J'ai donc accepté de préparer et d'enseigner ce nouveau cours, et c'est là que mon histoire d'amour avec la simulation a commencé… Pourtant, en tant qu'agrégé de Génie Mécanique, mes connaissances et compétences initiales étaient centrées essentiellement sur cette discipline qui, à l'époque, se limitait au champ de la fabrication mécanique. En effet, au début des années 90, le programme de l'agrégation de Génie Mécanique ne consacrait aucun chapitre au Génie Industriel, qui ne fait d'ailleurs toujours pas partie des différentes spécialités de l'agrégation, tout comme d'ailleurs des spécialités de la CNU. Ni la gestion de production, ni les flux de production, et encore moins la modélisation et la simulation de flux, n'étaient donc au programme de cette agrégation.

Heureusement, dans certaines formations universitaires ou écoles d'ingénieurs françaises, il y avait déjà un petit nombre d'enseignants-chercheurs qui enseignaient ou utilisaient cet outil pour leurs travaux de recherche. Aux États-Unis, la simulation faisait l'objet de recherches depuis les années 60-70 (Schriber et al. 2017)[17], et je pense qu'il a fallu attendre les années 80 pour voir arriver cet outil en France. C'est ainsi que, pour préparer ce cours, je suis tombé un peu par hasard (Internet en était encore à ses balbutiements) sur le cours de Bertrand Jullien, professeur aux Mines de Saint-Etienne, qui dispensait cet enseignement en utilisant comme outil Siman-Cinema, l'ancêtre d'Arena, outil aujourd'hui encore largement utilisé dans la communauté scientifique. Je me suis donc plongé dans son polycopié qu'il avait eu la gentillesse de m'envoyer. Je l'ai étudié en détail. J'ai essayé de me former tout seul à l'utilisation de Siman-Cinema, avec beaucoup de difficultés car il s'agissait alors d'un langage informatique de modélisation (Siman) et de simulation (Cinema), plus fait pour des informaticiens que pour des gestionnaires de flux. J'ai surtout capitalisé des connaissances sur la modélisation conceptuelle pour la simulation à événements discrets que proposait Bertrand Jullien. Cela m'a beaucoup apporté dans la compréhension des processus de production de type discrets à files d'attente, et plus particulièrement dans la modélisation des flux physiques comme des flux informationnels qui leur sont associés (Askin, Standridge, 1993)[18] (Govil, Fu 1999)[19] (Edwards 2013)[20].

Durant cette phase de découverte et d'auto-apprentissage d'une discipline nouvelle pour moi, ma route a heureusement croisé celle de Pierre Vercambre, un consultant de la société d'ingénierie Jacobs-Serete qui distribuait en France le logiciel Witness. Grâce à Pierre, je dois avouer que j'ai eu

[17] Schriber, T.J., Reitman, J., Ockene, A., Hixson, H.G. (2017). History of the winter simulation conference: Origins and early years (1967–1974). 2017 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, Las Vegas, NV, 40–49.
[18] Askin, R.G., Standridge, C.R. (1993). Modeling and Analysis of Manufacturing Systems Wiley, New York
[19] Govil, M.K., Fu, M.C. (1999). Queueing theory in manufacturing: A survey. Journal of Manufacturing Systems, 18(3), 214–240.
[20] Chap. 5 et 6 de JD Edwards. World Product Data Management - Discrete Guide. , 254

le coup de foudre pour cet outil, et le divorce avec Siman a été consommé… En effet, alors que les ordinateurs personnels de l'époque voyaient apparaitre la toute nouvelle interface graphique Windows 3.1 qui se superposait au vieillissant et peu convivial MS-DOS, Witness misait sur cette nouvelle technologie. Cela constituait une véritable rupture conceptuelle comparativement à l'environnement de Siman, exclusivement porté par un langage textuel. Avec Witness, la modélisation du processus pouvait donc se faire de façon interactive et visuelle, et non pas en tapant des lignes de codes. Des éléments graphiques, correspondant notamment aux trois objets génériques d'un processus à file d'attente (entité, accumulateur et processeur), pouvaient donc être facilement instanciés, puis connectés les uns avec les autres, pour constituer au final un modèle de simulation. Celui-ci était directement exécutable avec une animation visuelle, sans compilation, et permettait d'obtenir très facilement des statistiques afin d'analyser le processus étudié. Cette démarche de modélisation et simulation (M&S) est sans doute l'un des prémices de l'ingénierie dirigée par les modèles (IDM) qui s'est développée depuis. Elle est toujours utilisée aujourd'hui, que ce soit avec Witness, comme avec n'importe quel autre logiciel de simulation à événements discrets du commerce.

Cependant, la modélisation pour la simulation avec un langage de programmation, même si elle n'apparait pas vraiment dans le paysage industriel, connait depuis peu un nouvel essor, notamment dans le monde académique, grâce à des bibliothèques spécialisées plus ou moins facilement utilisables avec des langages tels que Python ou Julia (Matloff 2008)[21] (Thulasidasan et al. 2014)[22] (Geraint et al, 2019)[23]. En dehors de la nécessité de coder le modèle en respectant les règles de structuration et de syntaxe du langage choisi, la principale faiblesse de la plupart de ces bibliothèques spécialisées réside dans l'absence de visualisation des flux et des processus durant la simulation, ce qui rend la validation des modèles très difficile, voire impossible, sauf en utilisant en parallèle un autre outil de simulation visuelle comme référence. Ce qui fait leur force par rapport aux différents packages commerciaux du marché se situe non seulement sur les aspects Open Source, à la fois du modèle lui-même, mais aussi du moteur de simulation utilisé, et aussi sur leur rapidité d'exécution qui permet de réduire considérablement les durées de simulation. Comme je le rappellerai dans mes perspectives de recherche présentées à la fin de la deuxième partie de ce manuscrit, je souhaiterais pouvoir associer la puissance de modélisation (et de validation) proposée par des packages commerciaux tels que Arena, Witness, FlexSim, Anylogic, à la rapidité d'exécution de la simulation à l'aide d'une bibliothèque spécialisée.

1.2.2. L'appropriation, durant mes années de thèse (1995-1999) : de l'enseignement de la simulation vers la recherche, avec la simulation couplée à l'optimisation

J'ai donc réalisé mes premiers cours en simulation en 1994, face aux étudiants de deuxième année de la première promotion du département OGP qui avait ouvert en 1992. Et malgré le manque de recul et une maitrise très élémentaire, j'ai été immédiatement conquis par le pouvoir de séduction

[21] Matloff, N. (2008). Introduction to Discrete-Event Simulation and the SimPy Language. , 33.

[22] Thulasidasan, S., Kroc, L., Eidenbenz, S. (2014). Developing Parallel, Discrete Event Simulations in Python - First Results and User Experiences with the SimX Library:. 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, Vienna, Austria, 188–194

[23] Geraint I. Palmer, Vincent A. Knight, Paul R. Harper & Asyl L. Hawa (2019). Ciw: An open-source discrete event simulation library, Journal of Simulation, 13:1, 68-82, DOI: 10.1080/17477778.2018.1473909

d'un tel outil auprès des étudiants. Il faut reconnaitre que le phénomène d'incarnation d'une réalité modélisée et l'attrait visuel de l'animation proposés par la simulation constituent un appât ludique qui facilite l'entrée en la matière au niveau pédagogique. Face aux étudiants, je me suis rendu compte à quel point la simulation de flux sur ordinateur permettait de comprendre des phénomènes, qui, bien que se produisant dans le monde réel, sont parfois peu perceptibles. Pour des étudiants qui ne disposent ni d'une expérience pratique dans la production industrielle, ni d'un terrain d'application concret et réel, la simulation permet donc de virtualiser des ateliers de fabrication, des lignes ou des îlots de production, et de visualiser dynamiquement les flux qui les traversent. Cela constitue un apport pédagogique considérable, que ce soit dans le monde académique comme dans le monde industriel, comme j'ai pu le constater à l'occasion de diverses collaborations. La simulation fait aussi appel à de nombreux savoirs et compétences, et permet de les développer :

- Analyse d'un modèle de connaissance pour décrire dans son ensemble le processus à simuler.
- Transposition de ce modèle de connaissance dans un outil de simulation.
- Compréhension du caractère déterministe ou stochastique d'un modèle.
- Compréhension de la sensibilité du modèle à certains phénomènes aléatoires.
- Modélisation de règles de pilotage ou de gestion des flux sous la forme d'algorithmes.
- Définition d'indicateurs de performance pertinents.
- Analyse et traitement statistique des données d'entrée et des résultats de sortie.

Je considère pour ma part la simulation comme un formidable outil pédagogique permettant d'agréger un ensemble de connaissances à la fois techniques, scientifiques, et aussi de communication, puisqu'une étude de simulation doit souvent nécessiter de collecter des données, de réaliser des interviews, et de présenter les résultats à des niveaux hiérarchiques différents. Tout cela doit bien sûr être pondéré par les risques que présentent la simulation quand elle n'est pas confrontée à un retour d'expérience réalisé dans le monde réel. C'est un aspect qu'il est difficile d'aborder en formation initiale, à moins de disposer de plateformes d'observation de processus réels.

Parallèlement à cet enseignement, et "jeune" diplômé d'un DEA en production automatisée, je réfléchissais à la réalisation d'une thèse de doctorat. Après avoir fait murir mon projet, je me suis décidé en 1995 à me lancer dans cette aventure menée de front avec mes activités d'enseignant. Il n'était donc pas question pour moi de travailler sur un sujet aux antipodes de mon enseignement, même si j'étais prêt à déborder largement sur mon temps libre et ma vie personnelle grâce au soutien de mes proches. Je ne me sentais pas capable non plus d'alterner ma concentration sur des sujets et des activités trop éloignées. Mêler l'enseignement et la recherche constituait donc, et constitue toujours, une condition très forte pour moi. J'ai ainsi construit mon sujet de thèse, plutôt que de postuler sur un sujet existant. Et pour cela, je me suis fortement inspiré d'enseignements réalisés à l'IUT : l'un portant sur des travaux pratiques (TP) sur une ligne de production que j'avais conçue et réalisée (voir présentation LFE dans la section 1.8.2), et l'autre étant bien sûr la simulation. Les TP sur la ligne de production (ou plus précisément d'assemblage) avec des étudiants m'ont permis d'identifier des problèmes concrets de pilotage de flux pour lesquels je n'avais alors pas de réponse. J'ai perçu que la simulation pouvait sans doute aider à enrichir un espace de prise de décision, grâce notamment à sa capacité d'agir sur le ratio temps simulé/temps réel qui permet de simuler un scenario en quelques secondes au lieu d'attendre plusieurs dizaines de minutes dans le monde réel.

Je suis donc allé rencontrer celui qui m'avait encadré pour la partie pratique de mon DEA, le professeur Raymond Ponsonnet, directeur du Groupe de Recherche en Production Intégrée (GRPI)

à l'Université Paris 13, pour lui proposer un sujet de thèse et lui demander de le diriger, ce qu'il a accepté après plusieurs échanges pour mieux cadrer le périmètre d'étude et les verrous. Compte-tenu de mon emploi d'enseignant à temps complet, j'ai obtenu une dérogation pour réaliser cette thèse en 4 ans.

Mon appropriation de cette recherche centrée sur la simulation s'est progressivement concrétisée durant ma thèse (#0 du Tableau 4) grâce notamment à la théorie de la modélisation et de la simulation, telle que décrite dans les années 80-90 par les "titans" de cette discipline dans leurs ouvrages plusieurs fois réédités : (Zeigler et al. 2019)[24] (Law 2013)[25] (Banks 1998)[26] et un peu plus récemment par (Robinson 2011)[27]. Après quatre années de travail en alternance avec mon emploi de PRAG, la plupart du temps durant mes congés, j'ai soutenu ma thèse en octobre 1999, sur un sujet intitulé "*Intégration d'outils de simulation et d'optimisation pour le pilotage d'une ligne d'assemblage multiproduit à transfert asynchrone*". Le domaine applicatif était donc exclusivement celui de l'industrie manufacturière, avec pour objectif scientifique l'amélioration du pilotage de lignes flexibles de production ou d'assemblage. Beaucoup de concepts sur lesquels je me suis appuyé durant ces travaux de thèse émergeaient à peine il y a près de 30 ans. Le Juste-à-Temps (ou Just-in-Time) et le CIM (Computer Integrated Manufacturing), dont on ne parle plus beaucoup aujourd'hui, ont constitué sans aucun doute les prémisses de la 4ème révolution industrielle (Industrie 4.0) qui n'échappe à personne aujourd'hui.

La contribution scientifique de ces travaux de thèse est le couplage entre la simulation à événements discrets et un algorithme génétique afin d'optimiser le pilotage d'un processus. L'idée consiste à utiliser le modèle de simulation du processus comme une boîte noire recevant en entrée des valeurs des variables de pilotage calculées par l'algorithme d'optimisation et, après exécution accélérée de la simulation avec ces valeurs, retourne, en sortie vers l'algorithme, la valeur de la fonction objectif. En fonction de cette valeur, l'algorithme génétique progresse vers une autre solution qui sera évaluée de la même façon (voir Figure 1).

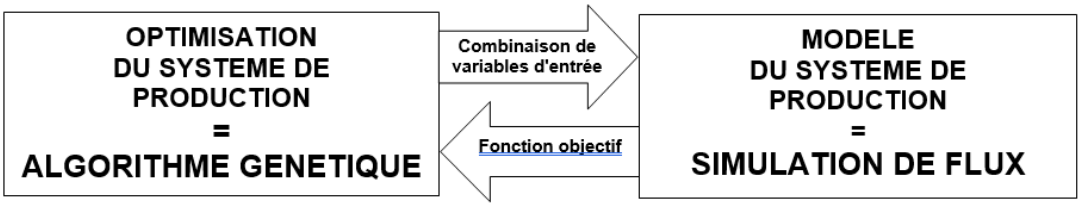


Figure 1. Principe du couplage entre simulation et optimisation

L'orientation de mes travaux de thèse vers l'optimisation du pilotage d'une ligne d'assemblage multiproduit par couplage de la simulation avec une métaheuristique à base d'un algorithme génétique a pourtant été le fruit du hasard d'une rencontre déterminante avec Arnaud Vincent. Arnaud était un élève-ingénieur de l'EPMI que j'ai eu comme élève en TP sur la ligne de production de l'IUT (en 1996-1997). Sur son temps libre, il se passionnait pour les colonies de fourmis et les

[24] 1ère édition en 1976 de Zeigler, B.P., Muzy, A., Kofman, E. (2019). Theory of modeling and simulation: discrete event and iterative system computational foundations 3rd ed. Academic Press, San Diego (Calif.).
[25] 1ère édition en 1982 de Law, A.M. (2013). Simulation modeling and analysis Fifth edition. McGraw-Hill Education, Dubuque.
[26] 1ère édition en 1998 de Banks, J. (2007). Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice Wiley ; Co-published by Engineering & Management Press, New York.
[27] Robinson, S. (ed.) (2011). Conceptual modeling for discrete-event simulation CRC Press, Boca Raton.

algorithmes génétiques, et face à des questions que je posais pour faire le TP, et pour lesquelles je n'avais encore jamais eu de réponse satisfaisante, il m'a parlé de ces nouvelles techniques qui commençaient à peine à émerger. Elles ont ensuite connu un passage à vide d'une ou deux décennies, avant de devenir aujourd'hui un sujet de recherche incontournable (Goldberg 1988)[28] (Goldberg, Holland 1988)[29] (Renders 1995)[30]. Nous avons ensuite eu, en dehors des cours, plusieurs échanges et nous avons pu réaliser quelques "preuves de concept" en combinant simulations et algorithmes génétiques, ce qui se faisait alors très peu, du moins en France, en dehors des travaux de Jean-Luc Paris dans l'équipe d'Henri Pierreval (Paris et al. 1996)[31].

Le processus physique servant de TP et de terrain applicatif à ces travaux, une ligne de transfert avec des postes de travail en dérivation, comme on peut en rencontrer aujourd'hui par exemple dans les entrepôts de distribution pour la préparation de commandes (voir plus loin en section 1.8.2), me semblait être difficilement modélisable par des approches purement analytiques telles que la théorie des files d'attente ou les chaines de Markov. Alors que la modélisation pour la simulation, en dehors des difficultés techniques de maîtrise de l'outil choisi, permet de construire un modèle, même pour un processus complexe, par des itérations successives d'essais et de validations, jusqu'à ce que ce modèle ait un comportement dynamique proche du système réel. L'autre avantage de la simulation à événements discrets par rapport à une modélisation analytique est la capacité de visualiser les flux circulants entre les différents éléments en fonction du temps. Cela pourrait paraître superflu, mais constitue néanmoins une approche empirique d'analyse des flux pouvant conduire à trouver des solutions d'optimisation "simples" sans faire appel à des techniques plus élaborées.

Une autre différence avec une modélisation analytique qui serait inspirée par la théorie de l'optimisation, est qu'il y a une séparation entre le modèle de simulation d'un côté, et la méthode d'optimisation de l'autre. L'un et l'autre sont développés distinctement. Le modèle de simulation étant autoporteur, il permet uniquement de simuler des scenarios sans aucune capacité intrinsèque à trouver une optimalité. Grâce à un module d'optimisation à coupler avec le modèle de simulation, différentes approches peuvent donc être mises en œuvre, allant de plans d'expériences complets les plus élémentaires, à des algorithmes capables de trouver une bonne solution dans un espace très complexe. Par itérations successives, le module d'optimisation est donc en charge de proposer une solution à la simulation, qui va la tester, et retourner la valeur de la fonction objectif au module d'optimisation, et ainsi de suite.

Le point faible de la simulation, seule ou couplée avec un module d'optimisation, par rapport à un système d'équations d'un modèle analytique qui, avec un bon solveur, peut être résolu très rapidement, est son temps de calcul qui est proportionnel à la fréquence des événements simulés. Cela pourrait être considérablement amélioré grâce à un modèle de simulation "codé", comme évoqué précédemment dans la section 1.2.1. Mais par rapport à une modélisation analytique, la simulation possède d'autres avantages encore qui la rendent plus adaptée, voire incontournable, dès qu'il s'agit de modéliser des processus nécessitant des ressources limitées ou partagées, qui plus est en prenant en compte les phénomènes aléatoires. C'est l'une des raisons majeures de son essor dans l'industrie où de tels processus complexes sont de plus en plus fréquents, compte-tenu

[28] Goldberg, D. (1988). Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning.
[29] Goldberg, D.E., Holland, J.H. (1988). Genetic Algorithms and Machine Learning. Machine Learning, 3(2), 95–99.
[30] Renders Jean-Michel. (1995). Algorithmes génétiques et réseaux de neurones : applications à la commande de processus. Lavoisier Hermès.
[31] Paris, J. (1996). Une méthode d'optimisation-simulation par algorithme évolutionniste en gestion de production juste-à-temps. Journal européen des systèmes automatisés : JESA, 30(7), .

du marché très volatile de la plupart des produits manufacturés. Cela nécessite de disposer d'un outil de production flexible et agile… et donc le plus souvent complexe à concevoir, à améliorer et à piloter. En effet, la simulation peut être utilisée pour l'une ou plusieurs de ces trois phases du cycle de vie d'un processus : conception, pilotage, et amélioration (Smith 2003)[32] (Kampa et al. 2017)[33] (Smith et al. 1994)[34]. Pour les nostalgiques ou ceux qui souhaitent connaitre les origines d'un outil qui a considérablement évolué, (Hollocks 2006)[35] retrace 40 ans de simulation à événements discrets depuis les années 1950, en indiquant qu'il s'agit de la technique de recherche opérationnelle la plus utilisée. Cette référence peut rappeler aux jeunes chercheurs les différents langages et outils qui se sont succédé au fil des dernières décennies afin de leur permettre aujourd'hui de profiter de ce capital et de l'enrichir.

En ce qui me concerne, j'ai eu l'occasion de collaborer avec Pierre Castagna et Bernard Yannou à la rédaction d'un chapitre d'ouvrage sur les outils de simulation utilisés dans la logistique (Fontanili et al. 2008)[36]. Cet ouvrage présente par ailleurs les différents types de simulation que l'on peut utiliser pour les chaines logistiques (simulation continue ou simulation à événements discrets), et aborde des notions toujours fondamentales aujourd'hui sur la simulation centralisée ou distribuée, sur la simulation multi-agent, ou encore sur la simulation de systèmes pilotés par le produit (Thierry *et al.* 2008)[37].

L'utilisation de la simulation pour concevoir et dimensionner un processus non encore existant, ou pour améliorer un processus existant, constitue la grande majorité des cas d'étude, comme cela est par exemple démontré dans le domaine de la supply-chain (Semini et al. 2006)[38]. Partant de ce constat, j'ai donc préféré orienter mes travaux de thèse vers l'utilisation de la simulation pour le pilotage de processus capables de produire à la demande une grande variété de produits, en quantités variables. Pour chaque lancement ou campagne de production, l'objectif est de maximiser l'occupation des postes de travail et des ressources, tout en minimisant le délai de production. Il s'agit alors de trouver une combinaison optimale des variables de pilotage : séquence et intervalle de lancement des produits, ordonnancement sur chaque poste de travail, capacité des buffers en amont de chaque poste de travail, règles de priorité en cas de conflit, etc. J'ai aussi proposé une méthode destinée à choisir entre une très bonne solution, mais pouvant être assez sensible à des variations non maitrisées des variables de décision, et d'autres solutions, moins bonnes dans

[32] Smith, J.S. (2003). Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. Journal of Manufacturing Systems, 22(2), 157–171.
[33] Kampa, A., Gołda, G., Paprocka, I. (2017). Discrete Event Simulation Method as a Tool for Improvement of Manufacturing Systems. Computers, 6(1), 10.
[34] Smith, J.S., Wysk, R.A., Sturrock, D.T., Ramaswamy, S.E., Smith, G.D., Joshi, S.B. (1994). Discrete event simulation for shop floor control. Dans Proceedings of Winter Simulation Conference. Proceedings of Winter Simulation Conference. 962–969.
[35] Hollocks, B.W. (2006). Forty years of discrete-event simulation—a personal reflection. Journal of the Operational Research Society, 57(12), 1383–1399.
[36] Fontanili, F., Castagna, P., Yannou, B. (2008). Software tools for simulation, Chap. 10 de Simulation for Supply Chain Management, Edited by Caroline Thierry, André Thomas et Gérard Bel, ISTE JOHN WILEY, p.295-337, 2008, ISBN 978-1-84821-090-5.
[37] Thierry, C., Thomas, A., Bel, G. (2008). La simulation pour la gestion des chaînes logistiques. Hermès Science Publications - Lavoisier.
[38] Semini, M., Fauske, H., Strandhagen, J. (2006). Applications of Discrete-Event Simulation to Support Manufacturing Logistics Decision-Making: A Survey. Dans Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. 2006 Winter Simulation Conference.

l'absolu, mais aussi moins sensibles. Cela permettait de répondre à une question de recherche sur la prise en compte de l'incertitude dans le processus réel.

Ce principe de couplage simulation/optimisation est aujourd'hui largement utilisé et même intégré dans de nombreux outils de simulation du commerce, rendant l'accès à des algorithmes d'optimisation beaucoup plus aisé qu'il ne l'était il y a une vingtaine d'années. Il reste cependant aujourd'hui encore de nombreuses perspectives, que ce soit pour disposer d'algorithmes encore plus performants, ou grâce à l'apport et à l'essor de l'intelligence artificielle : des algorithmes de Machine Learning peuvent maintenant être couplés à des modèles de simulation avec différents objectifs (Mladenić et al. 1994)[39] (Budgaga et al. 2016)[40] (Greasley 2020)[41] (Greasley, Edwards 2021)[42]. Par exemple, plutôt que de partir d'une solution initiale plus ou moins aléatoire, l'intelligence artificielle peut permettre de disposer d'une "bonne" solution initiale grâce à des algorithmes performants de traitement de données historiques, ce qui aura pour effet d'accélérer la convergence.

Mon doctorat a été valorisé par une publication dans une revue internationale (ACL), par des publications dans deux conférences internationales avec actes(C-ACTI), et par une publication de vulgarisation dans une revue francophone (ACLN) :

(1) Fontanili, F., Vincent, A., Ponsonnet, R. (2000). Flow simulation and genetic algorithm as optimization tools. International Journal of Production Economics, 64(1), 91–100)
(2) Fontanili, F., Vincent, A., Soriano, T., Ponsonnet, R. (1997). Modeling an Assembly Line wth Bypass Workstations and Seeking its Optimum Management Parameters. Dans International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'97), Fucam, pages 34–43, Lyon, France, 530-540
(3) Fontanili, F., Vincent, A., Soriano, T., Ponsonnet, R. (1999). A Ring-Shaped Mechanical Assembly Line Optimized by a Genetic Algorithm. Dans Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering ’98. Batoz, J.-L. et al. (eds.) Springer Netherlands, Dordrecht, 431–438.
(4) Fontanili, F., Vincent, A. (1997). Comment optimiser un atelier à l'aide de la simulation de flux ? Revue Française de Gestion Industrielle RFGI, Vol. 16, N°3.

1.3. L'émancipation : enseignement et recherche en simulation à l'École des Mines d'Albi-Carmaux et au CGI (2003-2016)

Dans ce chapitre, je vais détailler la *phase d'émancipation* évoquée dans le Tableau 4. Après un rapide résumé de la partie enseignement, je vais présenter les trois premières thèses (#1 Samieh Mirdamadi à #3 Romain Miclo) que j'ai co-encadrées.

J'ai intégré le Centre de Génie Industriel (CGI) de l'École des Mines d'Albi-Carmaux en septembre 2003, dans une équipe de recherche de taille modeste, mais bien mieux adaptée à mon profil que celle que j'avais connue durant mon DEA et ma thèse au GRPI de l'Université Paris 13. Je passais

[39] Mladenić, D., Bratko, I., Paul, R.J., Grobelnik, M. (1994). Using machine learning techniques to interpret results from discrete event simulation. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 399–402
[40] Budgaga, W., Malensek, M., Pallickara, Sangmi, Harvey, N., Breidt, F.J., Pallickara, Shrideep (2016). Predictive analytics using statistical, learning, and ensemble methods to support real-time exploration of discrete event simulations. Future Generation Computer Systems, 56, 360–374.
[41] Greasley, A. (2020). Architectures for Combining Discrete-event Simulation and Machine Learning:. 10th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. SCITEPRESS - Science and Technology
[42] Greasley, A., Edwards, J.S. (2021). Enhancing discrete-event simulation with big data analytics: A review. Journal of the Operational Research Society, 72(2), 247–267.

en effet du Génie Mécanique, avec une thèse sur un sujet "Canada Dry" dans cette spécialité, au Génie Industriel, en plein essor à cette époque sur le plan de la recherche, et plus en cohérence avec mes aspirations. À mon arrivée en 2003, le CGI était composé de 8 enseignants-chercheurs (3 professeurs et 5 maîtres-assistants), de deux conseillers en Génie Industriel (dont les postes ont disparu depuis), d'une assistante, et de 9 doctorants, soit un effectif total de 20 personnes. Le CGI s'est considérablement développé depuis, puisque son effectif est de plus de 50 personnes aujourd'hui.

1.3.1. Évolution de l'enseignement en simulation de flux

À mon arrivée à l'EMAC (École des Mines d'Albi-Carmaux) comme on le disait à l'époque, l'enseignement de la simulation de flux était confidentiel, voire inexistant. Seul Hervé Pingaud faisait une courte initiation de quelques heures dans le cadre d'un cours électif sur la modélisation de systèmes discrets à base de réseaux de Petri (cours "SED&SURF"). J'ai donc proposé au responsable de l'option Génie Industriel, rassemblant à l'époque une vingtaine d'élèves-ingénieurs de dernière année, de réaliser un cours en "*Optimisation des Flux Industriels*" s'appuyant sur la simulation. J'ai ainsi pu définir le contenu, la progression et l'approche pédagogique de ce nouveau cours sur une durée de 12 heures, que j'ai résolument tourné vers le concret et l'opérationnel puisque s'adressant à des élèves en fin d'études. Dès la fin de la première session, j'ai pu constater l'intérêt de cet outil pour les élèves puisque certains m'ont spontanément demandé de les encadrer pour leur stage de fin d'études en prévoyant d'utiliser la simulation de flux[43].

Cet engouement s'est accentué l'année suivante, en 2004-2005. J'ai pu bénéficier d'une trentaine d'heures de cours pour proposer un module d'amélioration des systèmes de production où la simulation avait une place majeure pour mieux appréhender d'autres méthodes et outils tels que le Lean Manufacturing, le SMED, le pilotage en flux tirés, etc. J'ai aussi été sollicité pour plusieurs autres tutorats de stage de fin d'études faisant appel à la simulation[44] [45].

À partir de l'année scolaire 2006-2007, ce cours a été rebaptisé "*Améliorer les Systèmes de Production*" après une fusion avec d'autres cours réalisés par Hervé Pingaud et Matthieu Lauras. Au total, nous disposions d'un volume global de 45 heures comprenant la modélisation de processus (BPM), la simulation de flux, et une étude de cas "fil rouge" permettant de mettre en application ces deux approches complémentaires. À partir de 2008, nous avons, avec Matthieu Lauras, construit cette étude de cas directement issue du site de distribution pharmaceutique de Pierre Fabre Muret (31) afin que les étudiants de l'option GI puissent être placés dans une situation pédagogique très réaliste et proche de la réalité industrielle, mêlant modélisation de processus et simulation de flux. Nous avions enregistré plusieurs vidéos présentant les principaux processus réels, accompagnées d'interviews afin d'apporter des explications. Cette étude de cas a été améliorée et utilisée durant plusieurs années, et je crois même qu'elle l'est encore partiellement. Elle a été complétée en 2011 par une autre étude de cas similaire sur le site de production de Pierre Fabre à Soual (81).

[43] Voir par exemple le rapport de stage de fin d'études de Sébastien Mounier réalisé à la VOA afin de construire un modèle de simulation pour évaluer la disponibilité de certaines ressources (juin 2004).
[44] Stage de fin d'études de Céline Paris, Air France (2004) : Optimiser l'affectation des vols aux positions finales du trieur de bagages en correspondance à Orly.
[45] Stage de fin d'études de Guillaume Gimonet, Sanofi Winthrop Industrie (2005) : Dans le cadre de l'optimisation d'un atelier de production : simulation et gestion de flux, de la pesée à la fabrication.

J'ai aussi pu établir des contacts avec plusieurs industriels utilisateurs de la simulation, notamment grâce à des stages de fin d'études d'étudiants ou d'apprentis que j'ai tutorés : Nicolas Galinaitis à la VOA (Albi) en 2010, Nicolas Vieu chez Sanofi-Pasteur en 2012, Laure Charrier et Romain Landois chez Sanofi Vietnam en 2015, Perrine Descroix au Centre Intégré de Radiologie de Laval (Québec) en 2016, Andrea Raynal chez Pierre Fabre (site d'Aignan) en 2018, Victor Bizet chez Airbus Defence&Space en 2018, Cédric Lées chez Safran Helicopter Engines en 2018, Alice Pouteau chez SimCore en 2019, Alexandre Dumoulin chez Bennes JPM en 2020, Laurie Vacher chez Faurécia en 2020, Céline Ye et Enzo Raynal au CH Narbonne en 2020, Mathilde Beaugendre au CH Perpignan en 2020.

1.3.2. Les premiers travaux de recherche au CGI en simulation

Parallèlement à ces enseignements portant sur la simulation, je me suis inscrit dans des collaborations avec d'autres chercheurs du CGI.

Michel Aldanondo a tout d'abord proposé de collaborer à la rédaction d'un article qui a été présenté à la conférence MOSIM'04. Il s'agissait de proposer une utilisation conjointe de la configuration sous contrainte et de la configuration via simulation :

(1) Michel Aldanondo, J. L. Paris, Franck Fontanili, Khaled Hadj-Hamou, Henri Pierreval. Prospective d'une utilisation conjointe de la configuration sous contraintes et de la configuration via simulation pour optimiser la diversité en production. MOSIM 2004 -5ème Conférence francophone de modélisation et simulation, Sep 2004, Nantes, France. p.115-122.

J'ai ensuite été sollicité dans le cadre de la thèse CIFRE de Mathieu Dupuy (encadré par Lionel Dupont et Jacques Lamothe) qui était en deuxième année au moment de mon arrivée au CGI en septembre 2003. Son sujet portait sur l'ordonnancement des analyses dans un laboratoire de contrôle qualité de l'industrie pharmaceutique. Je l'ai aidé à simuler ce système pour vérifier en dynamique la performance d'algorithmes d'ordonnancement qui avaient déjà été validés en statique et sans perturbations aléatoires. Une partie de nos travaux portant sur la phase de construction d'un modèle de simulation a été présentée lors de la conférence MOSIM'06. Nous avions proposé une démarche permettant de passer du système réel au modèle désiré en intégrant plusieurs vues de la modélisation d'entreprise (vue fonctionnelle, vue ressources, et vue décisionnelle) et permettant la mise en situation des problèmes d'ordonnancement posés pour le pilotage du système étudié :

(2) Fontanili, F., Lamothe, J., Dupuy, M., Nexon, C. (2006). Étude dynamique de l'ordonnancement d'un laboratoire de contrôle qualité pharmaceutique. Dans MOSIM'06 -6ème Conférence francophone de modélisation et simulation. LAVOISIER, Rabat, Morocco, 9 p.

En lien avec ma propre thèse, j'ai aussi soumis un article et fait une présentation à la conférence IMSM'07 portant sur le couplage entre un modèle de simulation et un algorithme génétique pour optimiser les paramètres d'exécution suivant plusieurs critères : l'encours, le nombre de réglages et le délai de réalisation d'une campagne :

(3) Fontanili, F. (2007). Discrete events simulation and genetic algorithm-based manufacturing execution. Dans IMSM07 -International Modeling and Simulation Multiconference 2007, Buenos Aires, Argentine. Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, p. 235.

Au-delà de ces collaborations, reconnaissant une expertise et tirées par des finalités applicatives, ce sont les trois thèses de Samieh Mirdamadi, Marie Falcon et Romain Miclo (#1 à #3 du Tableau 4) pour lesquelles j'ai pris un statut d'encadrant et qui constituent réellement ce que j'appelle ma phase d'émancipation. En effet, j'ai non seulement appris à encadrer des doctorants, mais j'ai aussi pu développer des idées et faire des expériences pour modifier les usages et valoriser de nouvelles capacités de la simulation, tout en restant dans un espace de problèmes essentiellement industriels.

1.3.3. Premiers travaux sur la simulation "on-line" avec la thèse de Samieh Mirdamadi (#1)[46]

Tableau 5. Résumé de la thèse de Samieh Mirdamadi (#1)

#1. MIRDAMADI, Samieh	
Sujet	*Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution*
Mots-clés	*Pilotage en temps réel, Simulation à événements discrets, MES, Aide à la décision*
Date de soutenance	*17 juin 2009*
Taux d'encadrement	*50% (Co-Directeur de thèse, direction assurée par Lionel Dupont)*
Financement	*Bourse école*
Travaux co-publiés	1 publication C-ACTI[47], 1 publication C-ACTN[48]

En février 2006, j'ai eu l'opportunité de disposer d'une bourse école me permettant de proposer et de co-diriger une première doctorante. Je souhaitais travailler sur un sujet qui me tenait à cœur depuis ma thèse et qui nécessitait un travail de recherche conséquent. L'idée principale était d'utiliser la simulation pour piloter un processus en temps réel, en la connectant ou en l'intégrant à un MES (Manufacturing Execution System), d'où l'appellation de simulation en ligne (on-line), synchrone et en temps réel, par opposition à la simulation hors-ligne (off-line) asynchrone, plus généralement utilisée. En effet, les MES, qui se sont développés dans les années 2000, disposent de différentes fonctions définies en particulier par la norme ISA S95 (IEC 62264), dont une de "*Collecte et acquisition de données*". Pour les opérations d'ordonnancement et de suivi de production qui nous intéressent, un MES dispose aussi d'une interface homme-machine permettant de visualiser sur des synoptiques l'état courant d'un processus de production, ainsi que des graphiques d'évolution sur une période passée. Cela peut s'apparenter à une application de supervision de type SCADA[49]. On peut noter qu'aucune de ces fonctions ne correspond à l'aide à la décision pour le pilotage, même si certaines permettent de prendre des décisions, mais sans aucune garantie du résultat. En effet, la prise de décision pour le pilotage du système de production se fait sans connaître les évolutions des nouvelles valeurs décidées dans la production. La majorité des outils d'exploitation comme le MES n'utilise pas l'expérience acquise pour optimiser les solutions proposées. Ce manque de projection dans le futur peut être comblé par l'utilisation d'un logiciel de simulation de flux. L'objectif de la simulation en ligne pour le pilotage d'un processus est d'apporter des informations objectives sur les conséquences d'un événement dans le court terme et, de la

[46] Mirdamadi, S. (2009). Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution. Thèse de doctorat. Disponible à l'adresse : http://www.theses.fr/2009INPT022G/document.
[47] C-ACTI : Communications avec actes dans un congrès international.
[48] C-ACTN : Communications avec actes dans un congrès national.
[49] Supervisory Control And Data Acquisition

même manière, sur les différents scénarios envisagés dans le cas où cet événement entraîne un écart par rapport aux objectifs fixés. Le sujet de thèse consistait donc à explorer l'utilisation de la simulation pour aller au-delà de la supervision, en permettant une projection sur le futur proche. J'ai donc proposé ce sujet et co-dirigé, avec Lionel Dupont, la thèse de Samieh Mirdamadi qui a été soutenue en juin 2009 sous le titre "*Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution*". Ce travail de recherche a mis en avant l'intérêt qu'offre la simulation en ligne comme outil d'aide à la décision pour le pilotage d'atelier vis-à-vis d'événements se produisant en temps réel et pour un horizon à très court terme. Après avoir proposé une modélisation du processus de pilotage en temps réel afin de décrire les différentes fonctions utiles, nous avons aussi comparé les différentes stratégies d'emploi des simulateurs en ligne pour le pilotage, avec un seul ou deux modèles, et avec plusieurs finalités d'usage de ces modèles. J'ai été examinateur dans le jury de thèse d'Olivier Cardin (Cardin 2007)[50] qui proposait une approche avec deux modèles : un "observateur" temps-réel s'exécutant en parallèle du système réel, et un simulateur "off-line proactif". Cela m'a permis de comparer ses choix avec la stratégie que nous avions retenue pour la thèse de Samieh Mirdamadi : un même modèle pouvant successivement passer d'un mode "on-line" pour du suivi en temps réel à un mode "off-line" pour se projeter dans le futur.

Quelle que soit la stratégie d'utilisation, la simulation en ligne est destinée à fournir des informations objectives sur les conséquences à court terme d'un événement, ainsi que sur les divers scenarii de correction envisagés. Pour mieux convaincre les industriels de l'intérêt de la simulation en ligne, nous avions développé des solutions adaptées aux spécifications et besoins énoncés précédemment en nous appuyant sur une plate-forme expérimentale (voir plus loin le projet e-Mac en section 1.8.3).

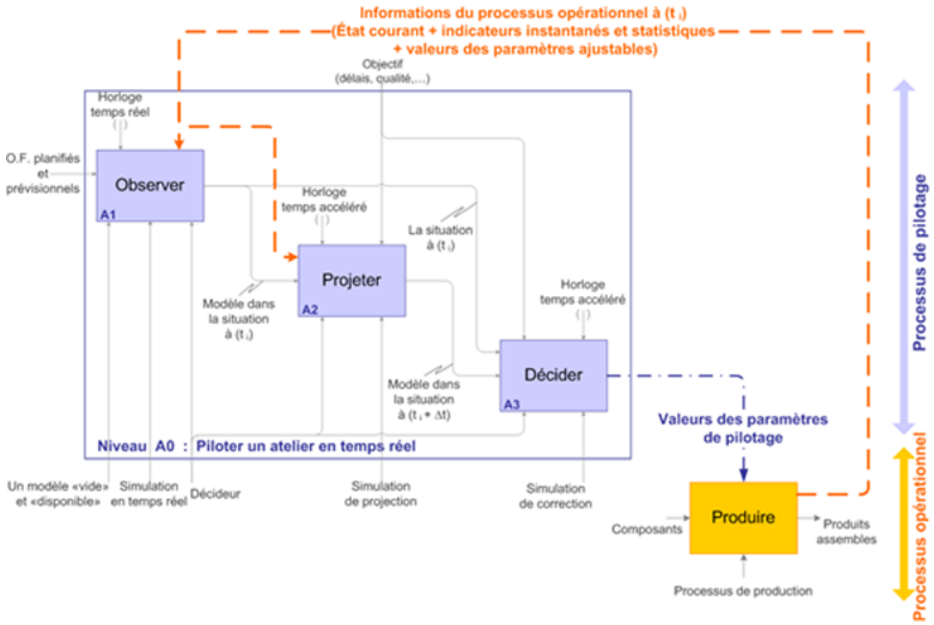


Figure 2. Fonctions de pilotage d'un processus opérationnel assurées par 3 formes de simulation : (1) temps-réel, (2) projection, et (3) correction (Thèse de Samieh Mirdamadi, 2009)

[50] Cardin, O.(2007). Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production - Application à un système flexible de production, Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, spécialité automatique (octobre 2007)

La Figure 2, issue de la thèse de Samieh, illustre et résume les 3 principales fonctions de pilotage d'un processus opérationnel assurées par 3 formes de simulation : (1) temps-réel, (2) projection, et (3) correction.

Les travaux de thèse de Samieh Mirdamadi ont été valorisés par deux publications dans des conférences internationales avec actes :

(1) Mirdamadi, S., Fontanili, F., Dupont, L. (2007). Discrete event simulation-based real-time shop floor control Zelinka, I., Z. Oplatkova, and A. Orsoni (eds.) 21st European Conference on Modelling and Simulation Ecms 2007: Simulations in United Europe.
(2) Mirdamadi, S., Autefage, R., Fontanili, F., Dupont, L. (2008). Complémentarité des approches analytique et simulatoire pour le dimensionnement d'un atelier manufacturier. Dans MOSIM'08 -7ème Conférence internationale de Modélisation et Simulation. MOSIM'08 -7ème Conférence internationale de Modélisation et Simulation. TEC & DOC -LAVOISIER, Paris, France, p.1337-1346.

En dehors des aspects "*on-line*" ou "*off-line*" de la simulation, nous avons fait aussi ressortir dans l'état de l'art plusieurs termes pouvant être proches de cette même thématique comme par exemple "*simulateur*" vs "*émulateur*", simulation "*look-ahead*", simulation "hardware-in-the-loop", simulation "*symbiotique*". Tous ces termes demeurent d'actualité et ont été complétés par de nouvelles appellations apparues depuis, car les travaux de recherche menés durant cette thèse perdurent et constituent toujours un de mes centres d'intérêt (voir Partie 2).

1.3.4. L'industrialisation de la rénovation énergétique avec la thèse de Marie Falcon (#2)[51]

Tableau 6. Résumé de la thèse de Marie Falcon (#2)

#2. FALCON, Marie	
Sujet	*Proposition d'un processus et d'outils pour industrialiser la rénovation énergétique des bâtiments*
Mots-clés	*Rénovation énergétique, Industrialisation, Modélisation, Planification*
Date de soutenance	*24 septembre 2013*
Taux d'encadrement	*50% (Co-Directeur de thèse, direction assurée par Lionel Dupont)*
Financement	*Financement direct par la société TBC (Toulouse)*
Travaux co-publiés	1 publication C-ACTI, 1 publication C-ACTN
Situation du docteur	*Conseillère énergie et animatrice à l'Agence Locale de l'Énergie et du Climat métropole grenobloise.*

Alors que la thèse de Samieh Mirdamadi en était à mi-parcours, j'ai, à partir de septembre 2007, consacré entre 30 et 50% de mon temps de travail au projet de formation d'ingénieurs par l'apprentissage, avant d'y consacrer de façon progressive entre 70 et 100% de mon temps, du démarrage de la formation en octobre 2008 jusqu'en septembre 2013 (voir section 1.6.3). Cette nouvelle responsabilité en formation ne me permettait pas de développer comme il se doit mon activité de recherche. Elle aurait même pu m'inciter à l'interrompre totalement. Toutefois, j'ai eu à cœur de conserver un pied dans mon centre de recherche, et cela s'est concrétisé par l'encadrement d'une deuxième thèse à partir de 2009 qui me permettait d'assurer une nouvelle fois le lien avec

[51] Falcon, M. (2013). Proposition d'un processus et d'outils pour industrialiser la rénovation énergétique des bâtiments. Thèse de doctorat. Disponible à l'adresse : http://www.theses.fr/2013INPT0085/document.

mes activités d'enseignement, ou plus précisément de management de l'enseignement. Avec le recul, je peux qualifier aujourd'hui la thématique de cette seconde thèse comme *excentrée* puisque c'est la seule thèse que j'ai encadrée dans laquelle il n'y a pas eu d'apport de la simulation, bien que la question se soit posée. En effet, poussé par Bruno Ladevie qui était alors responsable de l'option Énergétique à l'école des mines d'Albi, je me mets à réfléchir, dès le milieu de l'année 2009, sur un sujet encore jamais abordé au CGI mais que j'avais découvert avec la formation d'ingénieurs par l'apprentissage dans le secteur de l'énergie et des nouveaux matériaux pour le bâtiment (SENMBA) : la rénovation énergétique des bâtiments. Je tente alors d'établir le lien avec le génie industriel en m'intéressant à l'industrialisation de cette rénovation énergétique afin d'atteindre les objectifs très ambitieux du Grenelle de l'Environnement (rénover plus de 500 000 logements par an), car, aujourd'hui encore, elle se déroule le plus souvent de façon unitaire et artisanale, donc avec une productivité très faible. Cela s'est concrétisé par la thèse Cifre de Marie Falcon (#2 du Tableau 4, voir résumé dans Tableau 6), en collaboration avec l'entreprise TBC, et intitulée "*Proposition d'un processus et d'outils pour industrialiser la rénovation énergétique des bâtiments*", processus illustré par la Figure 3.

Les travaux de Marie Falcon ont permis de modéliser à la fois le produit (système constructif) et le processus d'industrialisation. Le système constructif est basé sur des panneaux multifonctionnels de grandes dimensions qui sont préfabriqués en usine et fixés sur les façades extérieures des bâtiments. Il réduit fortement le temps de mise en œuvre sur chantier, mais il impose de connaître précisément la géométrie des façades existantes. Pour cela, une technique de relevé tridimensionnel sans contact peut être utilisée pour créer rapidement une maquette numérique des bâtiments existants. Celle-ci sert à des études énergétiques, structurelles, et architecturales et pour la configuration. Ensuite, Marie a proposé un configurateur pour aider l'utilisateur à choisir les options des panneaux et réaliser leur calepinage (choix de leurs dimensions et positionnement sur les façades). Il permet d'éditer la gamme de montage des panneaux et de générer automatiquement un devis précis. D'autre part, un outil d'estimation a été proposé pour établir les devis et plannings initiaux d'après les études préliminaires. Cet outil est alimenté par le retour d'expérience du configurateur. Enfin, un outil d'optimisation a été proposé pour planifier le chantier en fonction du plan de charge des fabricants de panneaux et des ressources nécessaires pour la mise en œuvre. La fonction objectif peut comporter plusieurs critères, dont la minimisation de la durée du chantier, des stocks et de la durée de location des engins de levage.

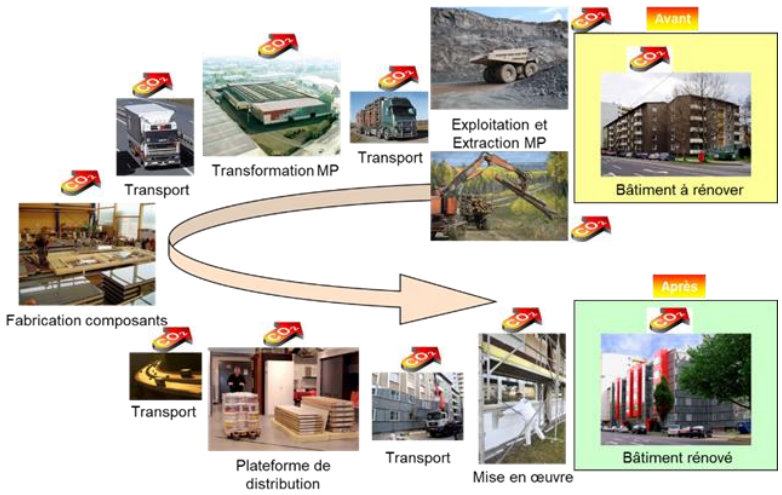


Figure 3. Industrialisation de la rénovation énergétique des bâtiments (Thèse de Marie Falcon, 2013)

Durant cette thèse, nous avons obtenu aussi un financement de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) pour le projet SIRENE (Systèmes Industriels pour la Rénovation Énergétique) qui s'est déroulé sur 36 mois. L'objectif était d'évaluer la faisabilité d'un processus industriel permettant une rénovation énergétique des logements collectifs à moindre coût, délai minimum, haute qualité et bilan environnemental global.

Les travaux de thèse de Marie Falcon ont été valorisés par une publication dans une conférence internationale et une publication dans une conférence nationale avec actes :

(1) Falcon, M., Fontanili, F. (2010). Process modelling of industrialized thermal renovation of apartment buildings. Dans eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Proceedings of the European Conference on Product and Process Modelling 2010. 363–368. (C-ACTI)
(2) Falcon, M., Thuillier, A., Ladevie, B., Dupont, L., Fontanili, F., 2014. Proposition d'un processus et d'outils pour industrialiser la rénovation énergétique des bâtiments. Actes du congrès Ecobat Sciences & Techniques 2014. (C-ACTN)

Cette thématique a continué de vivre jusqu'en 2017 au sein du CGI en étant portée par le projet CRIBA, piloté par Michel Aldanondo, Elise Vareilles, Jacques Lamothe et Lionel Dupont, et a donné lieu à deux nouvelles thèses :

(1) Andrés Felipe Barco Santa (2016) : "Constraint-based design : two-dimensional insulating panels configuration", sous la direction de Michel Aldanondo et de Elise Vareilles.
(2) Shadan Gholizadeh Tayyar (2017) : "An optimization-based framework for concurrent planning of multiple projects and supply chain : application on building thermal renovation projects", sous la direction de Jacques Lamothe et Lionel Dupont.

1.3.5. Une évaluation du DDMRP avec la simulation avec la thèse de Romain Miclo (#3)[52]

Tableau 7. Résumé de la thèse de Romain Miclo (#3)

#3. MICLO, Romain	
Sujet	*Challenging the "Demand Driven MRP" Promises: A Discrete Event Simulation Approach*
Mots-clés	*Supply Chain Management, DDMRP, Uncertainty, Discrete Event Simulation*
Date de soutenance	*7 décembre 2016*
Taux d'encadrement	*30% (co-encadrement, direction assurée par Matthieu Lauras et co-direction par Jacques Lamothe)*
Financement	*Bourse CIFRE ANRT avec la société AGILEA (Toulouse)*
Travaux co-publiés	1 publications ACL[53], 5 publications C-ACTI, 1 publication C-ACTN
Situation du docteur	*Consultant en CDI société AGILEA (Toulouse)*

Septembre 2013 marque une transition forte pour moi. En effet, après 5 années passées à diriger la formation par l'apprentissage, j'étais arrivé à un stade où je devais faire un choix. Mes responsabilités dans cette formation devenant trop prenantes et incompatibles avec une activité de recherche significative, j'ai décidé de ne pas prolonger mon investissement dans ce projet et de

[52] Miclo, R. (2016). Challenging the 'Demand Driven MRP' Promises : a Discrete Event Simulation Approach. Thèse de doctorat. Disponible à l'adresse : http://www.theses.fr/2016EMAC0016/document.
[53] ACL : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées

redonner une place conséquente au CGI. Cela a bien sûr nécessité de me remobiliser totalement sur la recherche.

Matthieu Lauras m'a proposé de co-encadrer avec lui et Jacques Lamothe la thèse Cifre de Romain Miclo, dès septembre 2013, en collaboration avec la société de conseil Agilea (voir résumé en Tableau 7). Romain était un ingénieur de l'école des Mines d'Albi que j'avais eu comme étudiant durant l'année 2012-2013 dans l'option GI. J'avais donc pu mesurer sa maîtrise et ses capacités très élevées en simulation de flux avec Witness, ce qui était un point très positif puisque le sujet proposé par Matthieu nécessitait de faire largement appel à la simulation. La Figure 4 illustre le positionnement fort de la simulation dans un contexte d'ingénierie d'entreprise mue par l'amélioration continue.

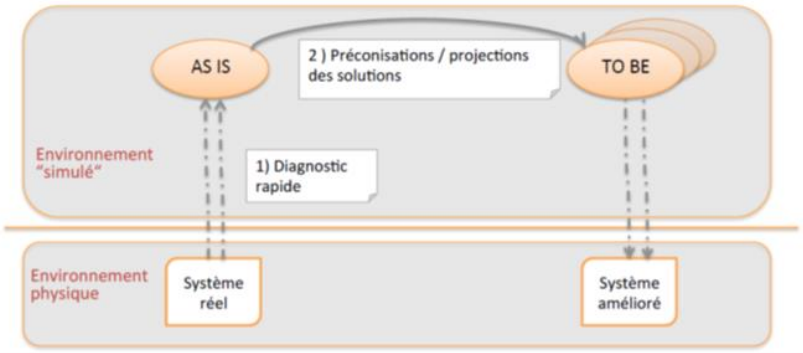


Figure 4. Positionnement de la simulation dans une dynamique de transformation organisationnelle (Thèse de Romain Miclo, 2016)

Plusieurs pistes ont été suggérées dès le début de la thèse, avec mission pour le doctorant de les "débroussailler" afin de faire émerger les plus prometteuses pour l'offre de service proposée par Agilea :

- L'apport de la simulation dans une démarche de Lean Management en Supply Chain.
- L'apport de la simulation pour cartographier la chaine de la valeur (Value Stream Mapping, VSM) en prenant en compte la chaine de valeur économique (Value Stream Accounting) afin de proposer une VSM dans laquelle le besoin en fonds de roulement (Working Capital) est associé au délai de réalisation (Lead Time).
- L'exploration des possibilités offertes par la fouille de processus (Process Mining) dans la Supply Chain.

Cela nous a conduit à réaliser de nouveaux développements mettant en œuvre la simulation. En particulier, avec le support de Nicolas Salatgé, ingénieur de recherche au CGI, nous avons réalisé un prototype logiciel appelé "*Dynamism*" permettant de générer automatiquement un modèle de simulation à partir de la description d'un processus via une VSM (Value Stream Mapping), ceci afin de proposer une approche "métier" de la simulation, et non pas une approche "expert" en simulation. En effet, l'un des principaux freins en entreprise concerne l'apprentissage et la maîtrise d'un outil de simulation. Le besoin "métier" était donc de disposer d'une interface permettant de décrire les flux d'un processus opérationnel à l'aide d'un formalisme largement utilisé dans l'industrie et même dans

les services : la VSM (McDonald et al. 2002)[54] (Bosch-Mauchand et al. 2012)[55]. Mais comme tous les modèles de processus, une VSM fournit une vue figée des processus. Le caractère dynamique des flux qui les traversent n'est pas visualisable avec un tel formalisme, contrairement à un modèle de simulation. Partant de ce constat, nous avons décidé de développer une nouvelle approche métier inspirée de l'ingénierie dirigée par les modèles (IDM) pour passer d'une VSM à un modèle de simulation (voir Figure 5).

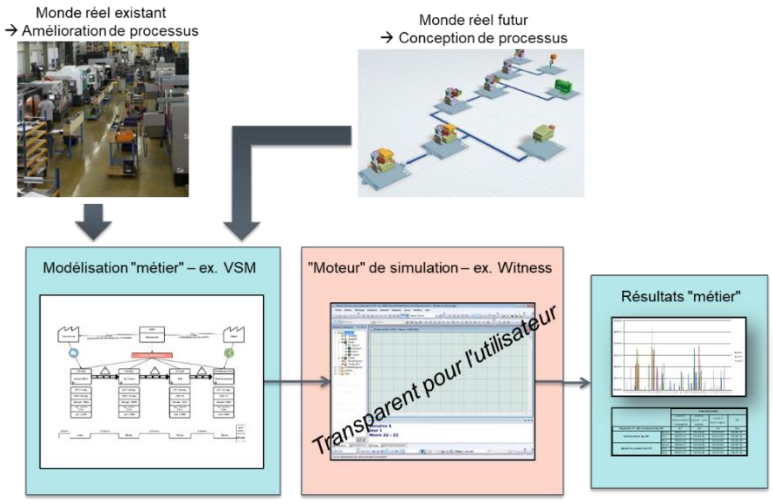


Figure 5. Approche "métier" pour passer du monde réel à un modèle de simulation

Pour cela, un véritable modeleur "*VSM to Witness*" a été réalisé afin de disposer d'une interface permettant de modéliser des processus avec ce formalisme.

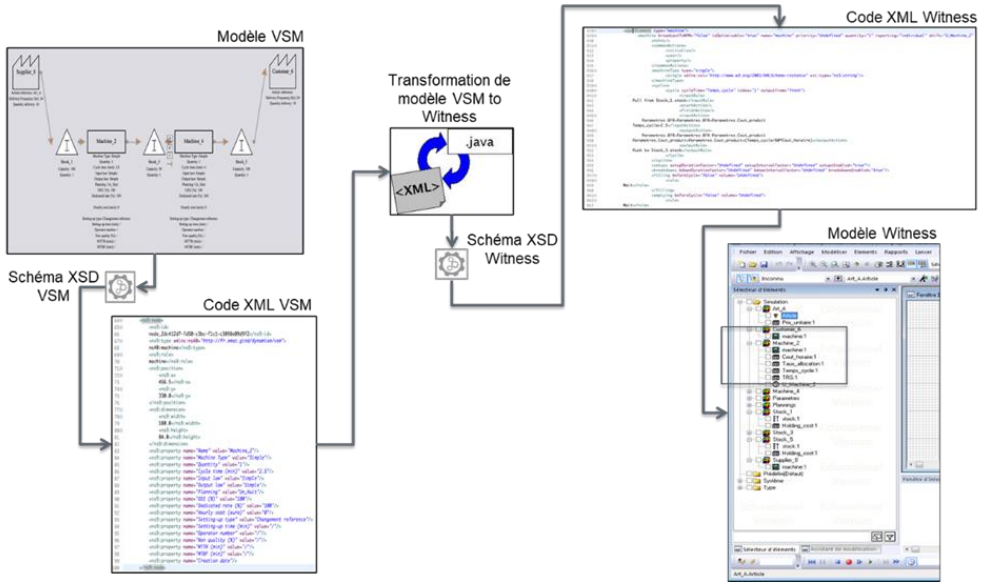


Figure 6. Transformation du modèle métier VSM vers un modèle de simulation (Witness)

[54] McDonald, T., Van Aken, E.M., Rentes, A.F. (2002). Utilising Simulation to Enhance Value Stream Mapping: A Manufacturing Case Application. International Journal of Logistics Research and Applications, 5(2), 213–232.
[55] Bosch-Mauchand, M., Siadat, A., Perry, N., Bernard, A. (2012). VCS: value chains simulator, a tool for value analysis of manufacturing enterprise processes (a value-based decision support tool). Journal of Intelligent Manufacturing, 23(4), 1389–1402.

La transformation automatique du modèle VSM vers un modèle de simulation[56] est réalisée (1) grâce à un pré-processeur s'appuyant sur un schéma XSD pour coder le modèle source VSM au format XML, puis (2) grâce à un post-processeur spécifique à l'outil de simulation choisi permettant de générer le code XML du modèle cible de simulation, ce dernier pouvant ensuite être importé dans l'outil. La Figure 6 illustre ce processus de transformation.

J'ai eu l'occasion de présenter ce prototype lors de la conférence des utilisateurs Witness en mars 2016. Une collaboration avec l'éditeur Lanner avait été envisagée afin d'aller plus loin, mais il n'y a malheureusement pas eu de suites concrètes. Je continue cependant de penser que la construction "rapide" d'un modèle de simulation via une interface métier est l'une des perspectives les plus prioritaires des recherches en simulation. L'ensemble du travail de recherche, incluant aussi la dimension économique par la prise en compte du besoin en fonds de roulement (BFR), a été valorisé par une publication dans une conférence internationale avec actes :

(1) R. Miclo, M. Lauras, F. Fontanili, J. Lamothe, P. Bornert et al., Working Capital Improvement through Value Stream Mapping Costing and Discrete-Event Simulation, Proc. 5th Int. Conf. Inf. Syst. Logist. Supply Chain Connect. WORLDS ILS 2014, 2014.

Dès 2014, les travaux de recherche de Romain ont aussi été l'occasion de découvrir et d'explorer deux techniques ou technologies récentes et jusqu'alors encore peu associées l'une à l'autre : le RTLS (Real-Time Location System) et le Process Mining. En effet, j'ai découvert le Process Mining au hasard de recherches bibliographiques, dès mon retour au CGI en 2013, et j'ai tout de suite été impressionné par le potentiel de cette technique récente de découverte, de modélisation et d'analyse de processus, souvent informationnels, en suivant une approche "*Evidence-based modeling*", alors que la modélisation de processus se fait plus traditionnellement avec une approche observationnelle de type "*Interview-based modeling*" sans nécessairement faire référence à un vécu tracé. Cependant, pour des processus opérationnels tels que ceux que l'on rencontre par exemple en production de biens dans la Supply Chain, les événements collectés par le système d'information sont rarement synchrones avec les événements réels. Pour des raisons techniques ou organisationnelles, il peut y avoir un écart important entre l'apparition d'un événement et son enregistrement horodaté dans le système d'information. De plus, les événements sont souvent très partiellement collectés, pour un nombre incomplet d'activités ou de tâches, ce qui rend difficile, voire impossible, toute forme de modélisation avec le Process Mining qui nécessite en entrée un journal de traces (appelé "log") aussi cohérent et complet que possible avec les événements réels. C'est principalement pour cette raison que je me suis intéressé au RTLS. Il s'agit en effet d'une technologie de localisation indoor permettant d'émettre des événements selon la localisation du produit transformé par un processus opérationnel. Pour cela, une étiquette électronique ou "*tag*" doit être disposée sur chaque produit. Suivant les mêmes principes que ceux du GPS qui ne fonctionne qu'en extérieur, le signal radio émis par chaque tag est capté par des balises judicieusement disposées dans les locaux, puis un moteur de localisation calcule la position du tag grâce à des algorithmes de triangulation. Après avoir fait un peu de veille technologique et une recherche bibliographique sur ces deux outils, j'ai pu acheter une solution de RTLS qui nous a permis de tester ses capacités réelles et mettre en place un cas d'usage expérimental. Comme je vais le présenter un peu plus loin, mon domaine applicatif s'étant élargi à celui de la santé, le cas d'usage m'a permis de tester cette solution de RTLS dans l'hypothèse d'un suivi des parcours patients dans un hôpital. J'ai donc demandé à Romain de dévier un peu de sa trajectoire très centrée sur la Supply Chain, et nous

[56] Witness dans ce cas, mais n'importe quel outil capable d'importer des modèles au format XML peut être utilisé, moyennant le développement d'un "post-processeur" spécifique.

avons réalisé des expérimentations qui ont conduit à la rédaction de deux publications dans des conférences internationales avec actes :

(2) Miclo, R., Fontanili, F., Marques, G., Bomert, P., Lauras, M. (2015). RTLS-based Process Mining: Towards an automatic process diagnosis in healthcare. Dans 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, Gothenburg, 1397–1402.

(3) Fontanili, F., Lamine, E., Lauras, M., Miclo, R., Pingaud, H. (2016). Une démarche outillée à base de RTLS, Process Mining et simulation pour le diagnostic organisationnel des parcours patients en établissement hospitalier. Dans MOSIM 2016, 11e Conférence Francophone d'Optimisation et Simulation. MOSIM 2016, 11e Conférence Francophone d'Optimisation et Simulation. Montréal, Québec, Canada.

Au début de sa deuxième année de thèse, nous avons, en concertation avec Agilea, orienté les travaux de recherche de Romain Miclo afin que, dans ses modèles, il prenne en compte, en plus des flux physiques, la planification et le pilotage de la Supply Chain. C'est ainsi que son sujet s'est recentré sur le développement d'une démarche outillée à base de simulation pour comparer différentes stratégies connues de gestion de flux poussés ou tirés (MRP2, ConWip, Kanban) avec une nouvelle approche baptisée DDMRP (Demand Driven Material Requirements Planning). En effet, la société Agilea a fait le constat que DDMRP semblait émerger dans l'industrie de façon très prometteuse, mais avec plusieurs zones d'ombres dues à une approche très empirique ou qualitative, notamment pour la localisation des "buffers" et pour leur dimensionnement (niveaux rouge, jaune, vert). Romain a ainsi fait le constat qu'en dehors de l'ouvrage de (Ptak, Smith 2016)[57] présentant les fondements de DDMRP, peu de publications scientifiques avaient tenté jusqu'alors d'établir des relations analytiques. Romain a donc développé une approche quantitative en s'appuyant fortement sur la simulation. Grâce à plusieurs cas d'études de simulation, partant de cas d'école, permettant de comprendre et de valider, en allant vers d'autres cas pratiques et plus complexes issus du terrain, il a pu comparer MRP2, Kanban et DDMRP, et confirmer la robustesse de DDMRP dans des situations présentant une forte variabilité, soit de la demande, soit du processus de fabrication lui-même, afin de respecter les délais tout en maintenant les stocks dans des niveaux plus faibles que les stratégies concurrentes. Les résultats de cette comparaison sur un cas d'étude comportant une forte variabilité sont présentés sur la Figure 7 (chaque point sur le graphique correspond à une réplication en simulation).

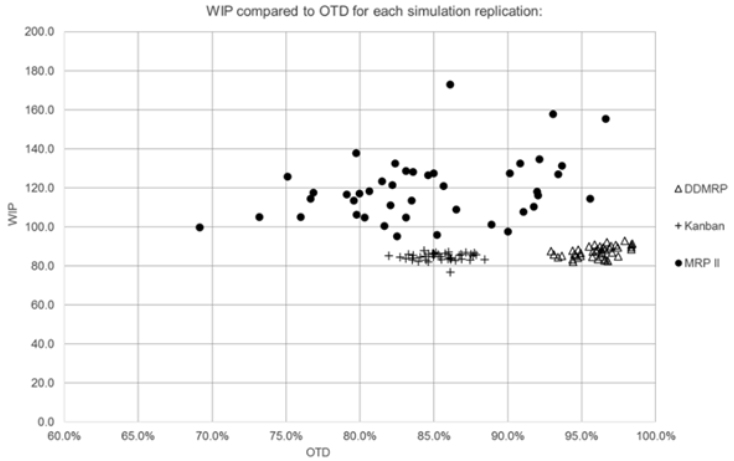


Figure 7. Comparaison de MRP2, Kanban et DDMRP suivant l'encours moyen (WIP) et le délai de réalisation (OTD)
(Thèse de Romain Miclo, 2016)

[57] Ptak, C., Smith, C., 2016. Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP), Industrial Press, Inc.

On peut voir que le DDMRP (triangles) est non seulement la stratégie la plus performante en termes de qualité de service (respect du délai = "*On Time Delivery*" (OTD), en abscisses) et de niveau des stocks (encours moyen = "*Work In Process"* (WIP), en ordonnées), mais aussi s'avère être la moins sensible aux variations aléatoires : l'ensemble des triangles est regroupé sur une surface beaucoup plus faible que le même ensemble de points avec MRP2. On peut voir aussi que le Kanban présente une performance et une robustesse sensiblement identique concernant le niveau des stocks, mais l'est beaucoup moins au niveau du respect des délais.

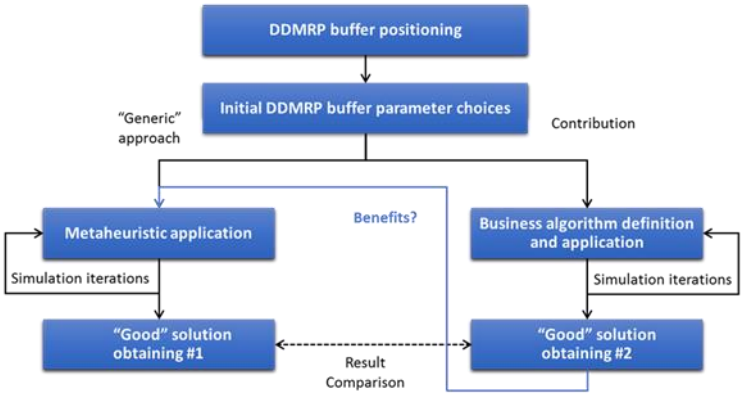


Figure 8. Méthodologie d'optimisation couplée à la simulation pour déterminer les valeurs optimales des niveaux des buffers DDMRP
(Thèse de Romain Miclo, 2016)

Enfin, grâce à la simulation, et en couplant celle-ci à un algorithme d'optimisation à base d'un recuit simulé, nous avons pu trouver les valeurs optimales des niveaux des buffers et les comparer aux valeurs trouvées par un algorithme "métier", capable de converger plus rapidement (voir Figure 8).

Ce résumé, un peu long, montre à quel point le travail de Romain durant ses trois années de thèse a été conséquent, avec de nombreuses pistes explorées sur différents sujets, mais cependant connexes à la simulation, tels que le RTLS et le Process Mining. Sa thèse, intitulée " *Challenging the "Demand Driven MRP" Promises: A Discrete Event Simulation Approach*" a été soutenue en décembre 2016 devant un jury international dans lequel figurait Carol Ptak, la co-inventeuse du DDMRP avec Chad Smith. Ses travaux ont été valorisés par plusieurs publications dans des journaux et conférences, en plus de celles mentionnées précédemment :

(4) Miclo, R., Lauras, M., Fontanili, F., Lamothe, J., Melnyk, S.A. (2019). Demand Driven MRP: assessment of a new approach to materials management. International Journal of Production Research, 57(1), 166–181.
(5) Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., Milian, B. (2016). An empirical comparison of MRPII and Demand-Driven MRP. IFAC-PapersOnLine, 49(12), 1725–1730.
(6) Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., Milian, B. (2016). An empirical study of demand-driven MRP. Dans ILS 2016 - 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain.
(7) Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., Milian, B. (2015). MRP vs. Demand-Driven MRP: Towards an Objective Comparison International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM). Framinan, J. M., P. P. Gonzalez, and A. Artiba (eds.)

> Ainsi se termine cette phase d'émancipation de ma trajectoire de chercheur en génie industriel spécialisé en simulation, entre 2003 et 2016, à la fois dans le cadre de mes activités d'enseignement et aussi dans le cadre de mes activités de recherche, dont l'espace de problèmes a concerné essentiellement la production de biens et la chaine logistique.

1.4. La consolidation : un processus en cours depuis 2016 dans le domaine de la santé

Depuis 2016, avec les thèses de Sina Namaki-Araghi (#4) et de Quentin Schoen (#5), mon activité s'applique exclusivement au domaine de la santé. Les années qui ont suivi m'ont permis de démarrer en moyenne un peu plus d'une thèse par an : celle d'Eva Petitdemange (#6) en 2017, celles de Liwen Zhang (#7) et d'Abdallah Karakra (#8) en 2018, celle de Leah Rifi (#9) en 2020, et enfin celle de Samer Alsamadi (#10) qui a débuté en février 2022.

J'ai pu entrer dans cette phase de consolidation car je consacre depuis 2013 l'essentiel de mon activité à exercer exclusivement mon métier d'enseignant-chercheur. Depuis cette date, qui est, sans aucun doute, un nouveau point de départ de mon activité de recherche, j'ai pu acquérir plus d'expérience dans l'encadrement, en suivant les doctorants et en collaborant avec cinq directeurs de thèse différents, jusqu'à tenir moi-même le rôle de directeur de thèse par dérogation pour la thèse de Leah Rifi (#9).

Je résume ces sept thèses appliquées au domaine de la santé dans les sections suivantes, en tentant de mettre en relief pour chacune d'elles l'apport de la simulation à événements discrets qui est la principale forme sur laquelle je travaille parmi celles qui sont décrite par (Zeigler *et al.* 2019)[58].

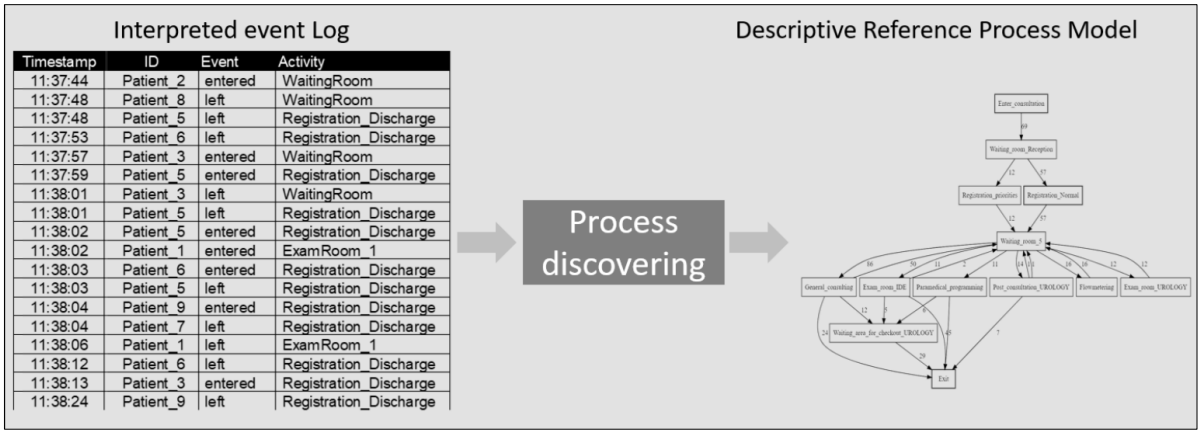
1.4.1. Le diagnostic des parcours patients avec la thèse de Sina Namaki Araghi (#4)[59]

Tableau 8. Résumé de la thèse de Sina Namaki Araghi (#4)

#4. NAMAKI-ARAGHI, Sina	
Sujet	*A methodology for business process discovery and diagnosis based on indoor location data: Application to patient pathways improvement*
Mots-clés	*Patient pathways, Process mining, Indoor location system, Business process diagnosis*
Date de soutenance	*12 novembre 2019*
Taux d'encadrement	*50% (Co-Directeur de thèse, direction assurée par Frederick Benaben et co-encadrement d'Elyes Lamine)*
Financement	*Bourse doctorale de la Région Occitanie et contrat de recherche avec la société Mapple High Tech (Toulouse)*
Travaux co-publiés	1 publication ACL, 5 publications C-ACTI
Situation du docteur	*Ingénieur de recherche*

[58] Zeigler, B.P., Traoré, M.K., Zacharewicz, G., Duboz, R. (2019). Value-based learning healthcare systems: integrative modeling and simulation. IET Healthcare Technologies Series, Institution of Engineering and Technology, 376 p.
[59] Namaki Araghi, S. (2019). A methodology for business process discovery and diagnosis based on indoor location data : Application to patient pathways improvement. Thèse de doctorat. Disponible à l'adresse : http://www.theses.fr/2019EMAC0014/document.

La thèse de Sina visait le développement d'une démarche outillée, baptisée DIAG, permettant l'obtention rapide d'un modèle du processus métier puis d'un diagnostic guidé de sa performance en faisant appel à des outils tels que le RTLS, le Process Mining et la simulation à événements discrets. Le terrain d'application privilégié était la production de soins, avec notamment les parcours patients à l'hôpital (voir Figure 9).



Timestamp	ID	Event	Activity
11:37:44	Patient_2	entered	WaitingRoom
11:37:48	Patient_8	left	WaitingRoom
11:37:48	Patient_5	left	Registration_Discharge
11:37:53	Patient_6	left	Registration_Discharge
11:37:57	Patient_3	entered	WaitingRoom
11:37:59	Patient_5	entered	Registration_Discharge
11:38:01	Patient_3	left	WaitingRoom
11:38:01	Patient_5	left	Registration_Discharge
11:38:02	Patient_5	entered	Registration_Discharge
11:38:02	Patient_1	entered	ExamRoom_1
11:38:03	Patient_6	entered	Registration_Discharge
11:38:03	Patient_5	left	Registration_Discharge
11:38:04	Patient_9	entered	Registration_Discharge
11:38:04	Patient_7	left	Registration_Discharge
11:38:06	Patient_1	left	ExamRoom_1
11:38:12	Patient_6	left	Registration_Discharge
11:38:13	Patient_3	entered	Registration_Discharge
11:38:24	Patient_9	left	Registration_Discharge

Figure 9. Ilustration de la transformation d'un fichier d'événements (log) en une cartographie de processus pour modéliser des parcours patients à l'hôpital.
(Thèse de Sina Namaki Araghi, 2019)

La démarche comporte quatre étapes, chacune consistant à réaliser une ou plusieurs fonctions :

1. Étape *Données*, avec deux fonctions permettant (1) de définir l'environnement et (2) de collecter des données de localisation des patients.
2. Étape *Information*, avec (1) une fonction d'interprétation des données de localisation, et (2) une autre de cartographie des parcours type BPM.
3. Étape *Connaissance*, comportant une fonction de découverte du processus existant et (2) une fonction de diagnostic de ce processus.
4. Étape *Décision*, avec une fonction de simulation du processus existant et de scénarios d'amélioration.

La contribution majeure de Sina a porté sur l'étape Connaissance, avec notamment un nouvel algorithme de Process Mining, le "*Stable Heuristic Miner*". La Figure 10 et la Figure 11 illustrent une cartographie de mêmes parcours obtenue avec un algorithme classique de découverte de processus (Figure 10), et avec l'algorithme proposé par Sina (Figure 11).

Cet algorithme fait ressortir automatiquement les "*parcours de référence*" suivis par les patients, comparativement à un algorithme classique qui nécessite de jouer empiriquement sur une valeur de seuil pour visualiser les processus avec plus ou moins de détail. Par ailleurs, grâce à des calculs de bornes supérieures et inférieures inspirés des cartes de contrôle utilisées en maitrise statistique des procédés (MSP), l'algorithme identifie des nœuds (activités) et des arcs (liens entre activités) dont le comportement peut présenter des risques de perturbation du flux, comme par exemple des goulots d'étranglement. Ils apparaissent en rouge sur le graphe de la Figure 11.

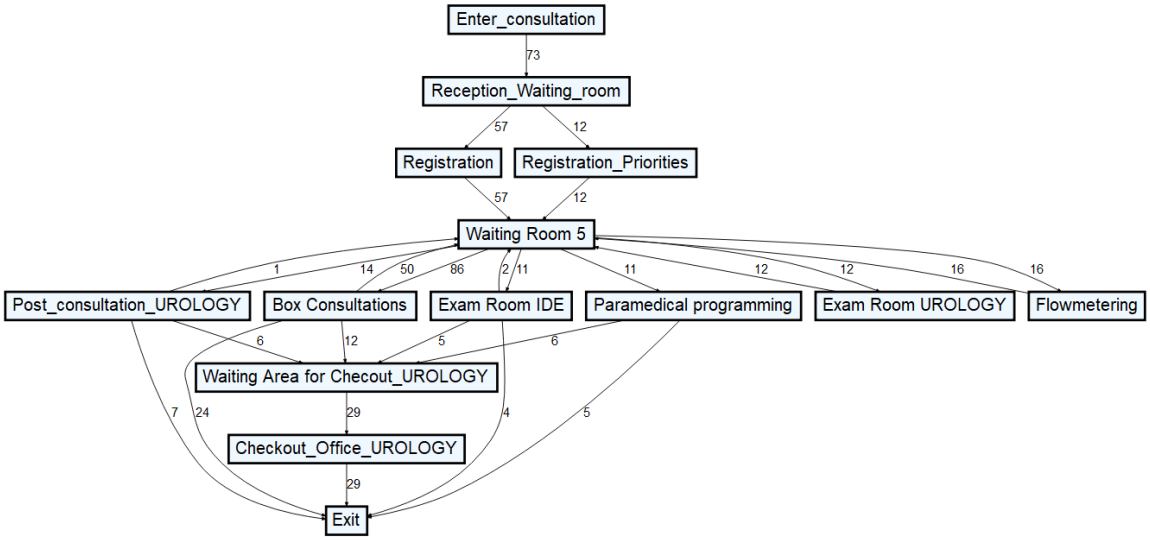


Figure 10. Parcours patients obtenus avec l'algorithme "Heuristic miner"
(Thèse de Sina Namaki Araghi, 2019)

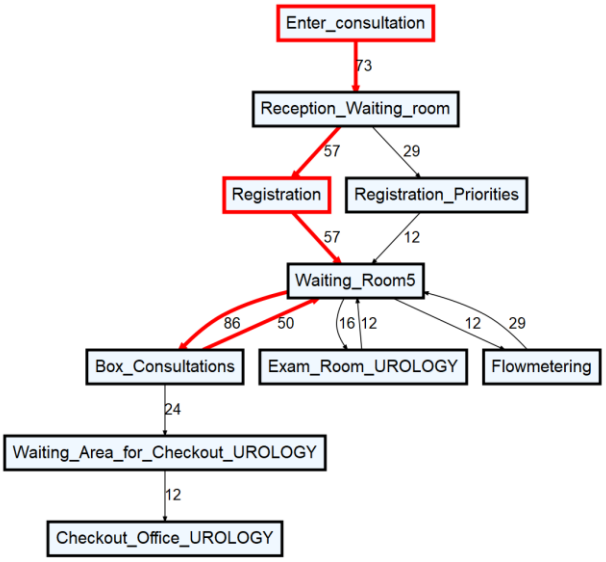


Figure 11. Les mêmes parcours patients, obtenus avec l'algorithme "Stable heuristic miner"
(Thèse de Sina Namaki Araghi, 2019)

Les travaux de Sina ont été valorisés par plusieurs publications dans des journaux et des conférences internationales :

(1) Araghi, S.N., Fontanili, F., Lamine, E., Tancerel, L., Benaben, F. (2018). Monitoring and analyzing patients' pathways by the application of Process Mining, SPC, and I-RTLS. Ifac Papersonline. 2018. Vol. 51, n° 11, pp. 980-985. DOI 10.1016/j.ifacol.2018.08.480.

(2) Araghi, S.N., Fontanili, F., Lamine, E., Salatge, N., Lesbegueries, J., Pouyade, S.R., Benaben, F. (2019). Evaluating the process capability ratio of patients' pathways by the application of process mining, SPC and RTLS. HEALTHINF 2019 - 12th International Conference on Health Informatics, Proceedings; Part of 12th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies, BIOSTEC 2019., BIOSTEC 2019. 302–309.

(3) Araghi, S., Fontanili, F., Lamine, E., Salatge, N., Benaben, F. (2020). Interpretation of Patients' Location Data to Support the Application of Process Mining Notations. Proceedings of the 13th International Joint Conference on

Biomedical Engineering Systems and Technologies. 13th International Conference on Health Informatics. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, Valletta, Malta, 472–481.
(4) Araghi, S., Fontanili, F., Lamine, E., Benaben, F. (2022). Stable heuristic miner: Applying statistical stability to discover the common patient pathways from location event logs. Intelligent Systems with Applications. 1 mai 2022. Vol. 14, pp. 200071. DOI 10.1016/j.iswa.2022.200071.
(5) Namaki Araghi, S., Fontanili, F., Lamine, E., Benaben, F. (2022). Miniscule Movements of Business Processes (Mmp): An Approach to Diagnose Deviations in Patients' Pathways. Rapport, Social Science Research Network, Rochester, NY, , SSRN Scholarly Paper, No. 4074880
(6) Araghi, S.N., Fontanili, F., Lamine, E., Salatge, N., Lesbegueries, J., Pouyade, S.R., Tancerel, L., Benaben, F. (2018). A Conceptual Framework to Support Discovering of Patients' Pathways as Operational Process Charts. Dans AICCSA 2018 - 15th International Conference on Computer Systems and Applications. IEEE, 1.

1.4.2. Le transport des produits sanguins avec la thèse de Quentin Schoen (#5)[60]

Tableau 9. Résumé de la thèse de Quentin Schoen (#5)

#5. SCHOEN, Quentin	
Sujet	*Piloter le transport de colis intelligents : proposition d'une approche décentralisée. Application aux colis contenant des produits sensibles*
Mots-clés	*Transport, Pilotage décentralisé, Colis intelligents, Simulation à événements discrets*
Date de soutenance	*13 novembre 2019*
Taux d'encadrement	*30% (co-encadrement, direction assurée par Matthieu Lauras et co-direction par Sébastien Truptil)*
Financement	*Bourse CIFRE ANRT et l'Établissement Français du Sang (Toulouse).*
Travaux co-publiés	1 publication ACL, 6 publications C-ACTI, 1 publication C-ACTN
Situation du docteur	*Consultant en CDI société Iterop (Toulouse)*

La thèse de Quentin Schoen portait sur un sujet que l'on peut qualifier de "*logistique hospitalière*" puisqu'il ne touchait pas les patients eux-mêmes, mais un flux connexe. En effet, cela concernait la préparation et le transport des poches de sang entre les lieux de collecte, le site de préparation/distribution de la région Pyrénées-Méditerranée basé à Toulouse, et les établissements hospitaliers "clients" de l'Établissement Français du Sang (EFS), où Quentin était embauché en thèse Cifre.

Les poches de sang stockées et transportées sont considérées comme des produits sensibles (durée de vie de quelques jours, températures de conservation comprise entre -25°C et 22°C, importance vitale pour les receveurs). Alors même que le pilotage des transports devrait être optimal vu la criticité de ces produits, la variabilité des processus et moyens de transport reste importante (route, rail, air, plus de 100 sous-traitants de transport différents, etc.) et l'efficience limitée (transport de vide, traçabilité manuelle et papier).

Afin de garantir un bon niveau de performance (coût, délai, qualité), l'EFS devait optimiser la gestion de ses flux logistiques et notamment ses activités de transport. La sensibilité des produits manipulés et les exigences drastiques de délais (péremption, urgence) imposent une traçabilité maximale, notamment vis-à-vis des conditions de conservation des produits sanguins. Si les méthodes employées jusqu'alors ont démontré leur efficacité, elles restaient relativement perfectibles

[60] Schoen, Q. (2019). Piloter le transport de colis intelligents : proposition d'une approche décentralisée Application aux colis contenant des produits sensibles. Thèse de doctorat. Disponible à l'adresse : http://www.theses.fr/2019EMAC0008/document.

notamment en termes d'adaptabilité, de réactivité, de qualité de service et d'efficience. C'est pour cette raison que Quentin a orienté ses travaux vers un nouveau paradigme de transport qui est l'*Internet Physique* afin d'évaluer la pertinence d'un mode de pilotage des colis non pas centralisé, qui était la configuration existante, mais décentralisé. Pour cela, il a fait une hypothèse forte au niveau technologique en supposant que les colis contenant les poches de sang étaient "*intelligents*" et "*opportunistes*". Cela lui a permis de définir un ensemble d'indicateurs de pilotage permettant à chaque colis de prendre ses propres décisions pour se router sur le réseau logistique et ainsi décider par lui-même d'opportunités de transport, selon des algorithmes qu'il a aussi définis.

Pour évaluer la pertinence d'un tel pilotage, et le comparer avec d'autres modes de pilotage plus conventionnels, il a développé des modèles de simulation à événements discrets afin de simuler le transport des colis entre différents "hubs" et différentes prestations possibles de transport. Pour ce cas précis qui semble bien s'y prêter, la question s'était posée d'utiliser une simulation de type multi-agent, chaque colis pouvant être considéré comme un agent autonome, comme le décrit par exemple (Monteiro et al. 2008)[61]. Je reconnais que nous n'avons pas fait totalement le tour de cette question, faute de temps, et parce que nous avons trouvé dans la littérature des arguments nous permettant de traiter notre problème avec de la simulation à événements discrets sans perte de fonctionnalités par rapport à une simulation multi-agent (Maidstone 2012)[62].

Plusieurs scenarios ont été évalués avec la simulation : tournée classique, navettes, affrètement, et crowdsourcing (voir Figure 12).

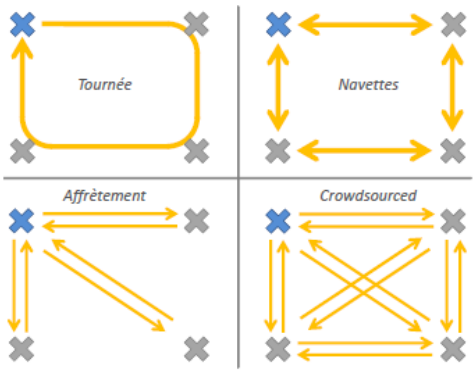


Figure 12. Les quatre scenarios de transport testés avec la simulation (Thèse de Quentin Schoen, 2019)

Ce dernier scénario (*crowdsourced*) est le plus disruptif et correspond à ce que l'on voir émerger depuis quelques années : une forme d'externalisation, voire de collaboration possible, avec des individus à l'extérieur de l'entreprise pouvant sous-traiter du transport de colis. Les simulations ont permis de fournir des résultats pour deux principaux types d'indicateur permettant de comparer ces scénarios : (1) l'efficacité, qui indique si les colis sont arrivés dans les délais ou non, et (2) l'efficience, qui mesure la distance parcourue par l'ensemble des véhicules pour réaliser toutes les livraisons.

[61] Monteiro, T., Anciaux, D., Espinasse, B., Ferrarini, A., Labarthe, O., Montreuil, B., Roy, D. (2008). Chapitre 6. L'intérêt des agents pour la simulation de la chaîne logistique. Dans La simulation pour la gestion des chaînes logistiques. Thierry, C., A. Thomas, and G. Bel (eds.) Traité IC2, série systèmes automatisés. Hermès-Lavoisier, 196–226.
[62] Maidstone, R. (2012). Discrete Event Simulation, System Dynamics and Agent Based Simulation: Discussion and Comparison. Dans System 1.6, pp. 1–6, 2012.

Les résultats ont montré que le transport crowdsourced est aussi efficace, et même plus efficace, que l'affrètement dans le cas de rapports charge/capacité des véhicules inférieurs à 1. Les rapports charge/capacité correspondent aux valeurs qui sont dans les cadres colorés de la Figure 13. Pour l'efficience, le transport crowdsourced est plus intéressant que l'affrétement et que les navettes. Ces résultats ont confirmé aussi que l'utilisation de colis autonomes avec les règles de gestion proposées par Quentin peut s'avérer pertinente, quel que soit le mode de transport retenu.

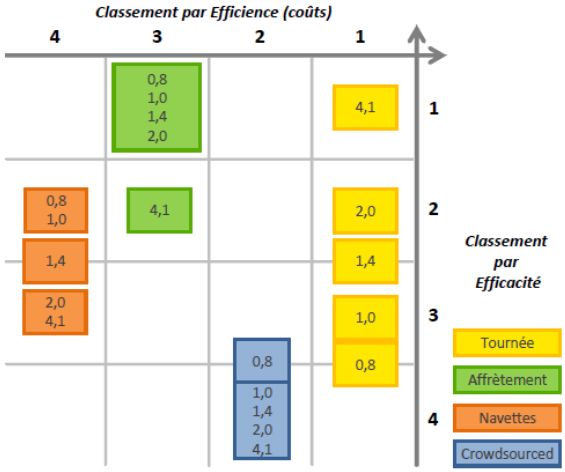


Figure 13. Comparaison des scénarios simulés en termes d'efficience et d'efficacité (Thèse de Quentin Schoen, 2019)

La thèse de Quentin a été valorisée par de nombreuses publications dans des conférences et une publication dans un journal. Avec un peu plus de temps et en optant pour un projet professionnel dans la recherche, je suis convaincu que Quentin aurait pu avoir une production scientifique bien meilleure encore au regard de la qualité de son manuscrit de thèse que je recommande aux chercheurs qui travaillent dans le domaine du transport. Je trouve en effet qu'il contient de nombreux développements scientifiques innovants, que ce soit au niveau des indicateurs de performance, des règles de gestion des colis autonomes et intelligents à appliquer dans le cadre de l'internet physique, et enfin au niveau de sa démarche d'évaluation à base de simulation.

(1) Schoen, Q., Fontanili, F., Lauras, M., Truptil, S., Anquetil, A.-G. (2017). Diagnostic de processus automatisé via le Physical Internet : application à la chaîne logistique des produits sanguins. CIGI 2017 - 12ème Congrès International de Génie Industriel. Université de technologie de Compiègne, Compiègne, France, 8 p.

(2) Schoen, Q., Lauras, M., Fontanili, F., Truptil, S., Machado-Alves, A. (2018). L'indispensable évolution des "transport management system" pour le pilotage des flux de produits sensibles. MOSIM'18 - 12ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation. ISAE and IMT Mines Albi, Toulouse, France, 8 p.

(3) Schoen, Q., Fontanili, F., Lauras, M., Truptil, S. (2019). Improving parcels transportation performance by introducing a hitchhiker parcel model 2019 Ieee 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (iciea). pp. 420-429.

(4) Schoen, Q., Pinon-Baca, D., Lauras, M., Fontanili, F., Truptil, S. (2018). A new transport management system design considering the upcoming logistics environment and the sensitive products supply chains. Proceedings. ILS 2018 - Information Systems, Logistics and Supply Chains. 286–295.

(5) Schoen, Q., Truptil, S., Lauras, M., Fontanili, F., Conges, A. (2018). A New Approach for Supply Chain Management Monitoring Systems Adapted to Crisis. PRO-VE 2018. Collaborative Networks of Cognitive Systems. CamarinhaMatos, L. M., H. Afsarmanesh, and Y. Rezgui (eds.) 512–523.

(6) Schoen, Q., Truptil, S., Fontanili, F., Lauras, M., Anquetil, A.-G. (2017). Tracking in real time the blood products transportations to make good decisions. Proceedings of the International ISCRAM Conference. 173–180.

(7) Schoen, Q., Lauras, M., Truptil, S., Fontanili, F., Anquetil, A.-G. (2016). Towards a Hyperconnected Transportation Management System: Application to Blood Logistics. Dans Collaboration in a Hyperconnected World. Afsarmanesh, H., L. M. CamarinhaMatos, and A. L. Soares (eds.) 3–12.
(8) Schoen, Q., Fontanili, F., Truptil, S., Lauras, M., Anquetil, A.-G. (2017). Improving the labile blood products transportation processes using physical Internet, complex event processing and process mining. Dans IFAC 2017 - 20th World congress of the International Federation of Automatic Control. IFAC (ed.) IFAC, Toulouse, France, p.7232-7236.

1.4.3. Les flux d'appels dans un SAMU avec la thèse d'Eva Petitdemange (#6)[63]

Tableau 10. Résumé de la thèse d'Eva Petitdemange (#6)

#6. PETITDEMANGE, Eva	
Sujet	*Une démarche outillée de diagnostic, d'amélioration et de collaboration à base de doubles numériques : application aux centres d'appels d'urgence de trois SAMU*
Mots-clés	*Centre d'appels d'urgence, Simulation à événements discrets, Double numérique, Diagnostic organisationnel, Démarche d'amélioration*
Date de soutenance	*6 novembre 2020*
Taux d'encadrement	*50% (Co-Directeur de thèse, direction assurée par Matthieu Lauras et co-encadrement d'Elyes Lamine)*
Financement	Projet SamuFlux avec bourse doctorale de la Région Occitanie
Travaux co-publiés	1 publication ACL, 2 publications C-ACTI, 2 publication C-ACTN
Situation du docteur	*Maitre-assistant à IMT Mines Albi*
Prix de la meilleure thèse 2020 du GDR Macs en section 61 Automatique et Génie Industriel	

La thèse d'Eva Petitdemange portait elle aussi sur un flux connexe aux parcours patients, puisqu'il s'agissait d'évaluer la performance des centres d'appels des services d'aide médicale urgente (SAMU) dans le décroché des appels téléphoniques. Le flux n'est donc pas un flux physique et visible, comme dans un service physique d'accueil des urgences (SAU) d'un hôpital, mais un flux d'appels téléphoniques pris en charge par des agents de régulation médicale (ARM) avant d'être régulés par des médecins (MR). Tant qu'un appel n'a pas été décroché, il est impossible d'évaluer objectivement la gravité associée, puisque la file d'attente n'est pas physique. La distribution des flux d'appels vers les agents est assurée par un système d'information téléphonique qui collecte en continu des événements sous la forme de logs d'appels téléphoniques (LOG), et les informations médicales associées à chaque appel sont quant à elles enregistrées dans des dossiers numériques de régulation (DRM).

L'objectif d'un SAMU est de disposer d'une organisation permettant d'atteindre une qualité de service très élevée, puisqu'il s'agit de répondre à 99% des appels entrants en moins de 60 secondes.

Les travaux d'Eva visaient à objectiver des similitudes ou des différences organisationnelles pour trois typologies représentatives de SAMU selon leurs différences d'activité et l'hétérogénéité des populations couvertes :

[63] Petitdemange, E. (2020). SAMUFLUX : une démarche outillée de diagnostic et d'amélioration à base de doubles numériques : application aux centres d'appels d'urgence de trois SAMU. Thèse de doctorat. Disponible à l'adresse : http://www.theses.fr/2020EMAC0012/document.

1. le SAMU de Toulouse sert la 4ème ville de France et son territoire, la Haute-Garonne, connait une croissance démographique parmi les plus fortes du pays.
2. le SAMU d'Albi (Tarn) sert une population semi-urbaine en croissance modérée.
3. le SAMU de Rodez (Aveyron) couvre un territoire rural très étendu de moyenne montagne dont la population est stable.

Les travaux de recherche ont conduit à évaluer plusieurs scenarios organisationnels grâce à une démarche outillée de diagnostic organisationnel et d'amélioration s'appuyant sur des modèles de simulation de flux d'appels, véritables "doubles numériques" des SAMU (voir Figure 14).

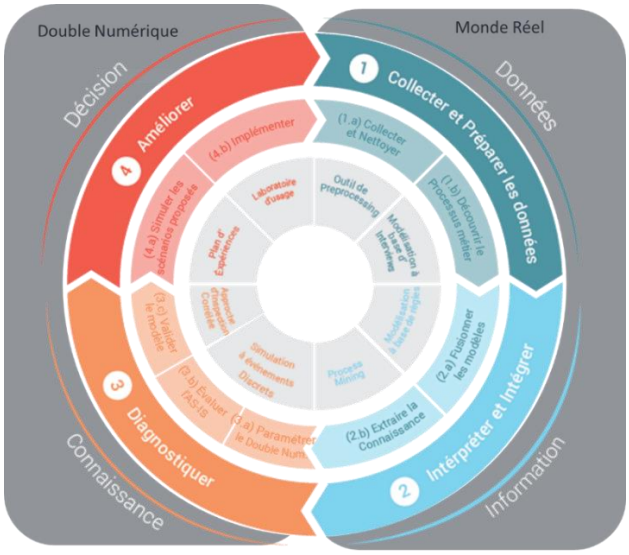


Figure 14. Démarche proposée pour diagnostiquer et améliorer le fonctionnement d'un centre d'appels (Thèse d'Eva Petitdemange, 2020)

Cette démarche en quatre grands étapes s'apparente beaucoup à celle suivie par un médecin pour diagnostiquer et traiter un patient : (1) il commence par collecter des données (température, tension artérielle, rythme cardiaque, résultats d'examens biologiques, etc.) et des informations symptomatiques obtenues grâce à une anamnèse qui consiste en un interrogatoire dirigé du patient par le médecin, puis (2) il essaye de trouver les causes de la maladie ou de la souffrance du patient, (3) il prescrit un traitement, et enfin (4) il contrôle l'efficacité de ce traitement. On retrouve ces quatre étapes dans la démarche organisationnelle proposée par Eva, à la différence qu'il y a une séparation entre le monde réel, et un monde virtuel obtenu avec un double numérique dans lequel on va évaluer l'organisation actuelle, avant de tester différentes améliorations.

Ainsi, grâce au double numérique, il a été possible d'évaluer objectivement aussi bien les organisations actuelles que des organisations futures. Dans le cadre de sa thèse, Eva a travaillé en particulier sur différents scénarios de décroché des appels puisque la qualité de service est principalement dépendante du temps d'attente d'un appel avant qu'il soit décroché. Le processus aval de régulation médicale n'a donc pas été pris en compte pour ses travaux. En s'appuyant sur les données réelles extraites des systèmes d'information de trois SAMU pilotes (Albi, Rodez, Toulouse), Eva a pu valider objectivement la pertinence d'une nouvelle organisation qui se met en place aujourd'hui progressivement : le bi-niveau. Elle consiste à trier les appels entrants très rapidement (niveau 1) avant de les orienter selon leur gravité (niveau 2). Cela s'apparente à ce qui se fait dans la plupart des SAU avec une infirmière chargée de l'orientation et de l'accueil des patients (IOA) dès leur arrivée aux urgences. Sur les cas qu'elle a traités, elle a pu démontrer que

le bi-niveau permettait d'atteindre la cible visée de qualité de service alors que ce n'était pas le cas avec les organisations existantes.

Plusieurs publications dans des journaux et conférences ont permis de valoriser la thèse d'Eva :

(1) Petitdemange, E., Fontanili, F., Lamine, E., Lauras, M., Okongwu, U. (2020). A Tool-Based Framework to Assess and Challenge the Responsveness of Emergency Call Centers. Ieee Transactions on Engineering Management, 67(3), 568–581.
(2) Petitdemange, E., Fontanili, F., Lamine, E., Lauras, M. (2018). Skill-based routing problem in emergency call centers: Toward an improvement of response time. 7th International Workshop on Innovative Simulation for Health Care, IWISH 2018. 43–51.
(3) Petitdemange, E., Fontanili, F., Lamine, E., Lauras, M. (2018). Une démarche outillée pour l'évaluation et l'amélioration du fonctionnement des centres d'appel d'urgence français (SAMU). GISEH 2018, 9ième Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des SystEmes Hospitaliers. Genève, Suisse.
(4) Petitdemange, E., Fontanili, F., Lamine, E., Lauras, M. (2018). Centres d'appel d'urgence français (SAMU) : une démarche dirigée par les modèles pour l'examen de leur fonctionnement. 12ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation. ISAE and IMT Mines Albi, Toulouse, France, 8 p.
(5) Petitdemange, E., Lamine, E., Fontanili, F., Lauras, M. (2020). Enhancing Emergency Call Centers' Performance Through a Data-driven Simulation Approach. Proceedings of the 17th ISCRAM Conference – Blacksburg, VA, US2020, 218-227.

Par ailleurs, Eva a obtenu le prix de la meilleure thèse 2020 du GDR Macs en section 61 Automatique et Génie Industriel.

> Les travaux de thèse d'Eva nous ont permis d'être en contact avec d'autres SAMU de France, et c'est ainsi que nous avons pu établir une collaboration plus importante avec les SAMU de la région Pays de la Loire : Nantes (44), Angers (49), Le Mans (72), La Roche-sur-Yon (85), et Laval (53). En effet, nous avons déposé ensemble un projet PREPS, financé par la DGOS, qui a été retenu et a démarré en janvier 2020 pour une durée de 3 ans. Nous travaillons donc depuis cette date sur le projet *CallSAMU* dont l'objectif principal est d'améliorer encore la qualité de service, mais en évaluant cette fois l'entraide, qui est une forme de collaboration téléphonique entre les SAMU d'une même région.

1.4.4. La planification des tournées à domicile avec la thèse de Liwen Zhang (#7)[64]

Tableau 11. Résumé de la thèse de Liwen Zhang (#7)

#7. ZHANG, Liwen	
Sujet	*De la vision métier à la génération assistée de plannings pour la coordination centralisée de services de soins à domicile*
Mots-clés	*Prise en charge à domicile, Ingénierie dirigée par les modèles, Optimisation de tournées, Langage spécifique au domaine*
Date de soutenance	*5 juillet 2021*
Taux d'encadrement	*30% (Co-directeur de thèse, Direction assurée par Hervé Pingaud, LGC Toulouse et co-encadrement par Elyes Lamine)*
Financement	*Bourse CIFRE ANRT et entreprise Berger-Levrault (Toulouse)*
Travaux co-publiés	5 publications C-ACTI, 2 publications C-ACTN
Situation du docteur	*Ingénieur de recherche en CDI service R&D Berger-Levrault* *Chercheur associé (20% ETP) au CGI de IMT Mines Albi dans l'axe IOS*

[64] Zhang, L. (2021). De la vision métier à la génération assistée de plannings pour la coordination centralisée de services de soins à domicile. Thèse de doctorat. Disponible à l'adresse : http://www.theses.fr/2021EMAC0004/document.

La thèse de Liwen Zhang s'est intéressée à un sujet qui est très courant dans la littérature puisque fortement inspiré d'un sujet industriel (*Vehicle Routing Problem*, VRP) : la planification des tournées des intervenants pour la prise en charge à domicile (*Home Health Care Routing and Scheduling Problem*, HHCRSP). Malgré la multitude de références scientifiques que l'on trouve sur ce sujet depuis de nombreuses années dans la littérature, on ne peut que constater que la réalité du métier de "coordinateur" d'une structure de type soins infirmier à domicile (SSIAD) ou hospitalisation à domicile (HAD) ne semble pas bénéficier de ces nombreuses recherches. En effet, dans beaucoup de structures, la planification et la coordination des intervenants se fait encore de façon très artisanale. Ce constat a été le point de départ de la thèse Cifre de Liwen, menée en collaboration avec la société Berger-Levrault. Le vieillissement de la population et le développement de la chirurgie ambulatoire entrainent un besoin de services à domicile qu'il est aujourd'hui très difficile de satisfaire. Il y a non seulement une pénurie de ressources, mais aussi des difficultés organisationnelles liées au contexte très incertain de ce type d'activité. Il est difficile de prévoir les durées de service ou de transport ou les aléas tels qu'une absence imprévue d'un intervenant ou d'un bénéficiaire. La construction d'un planning permettant de coordonner les différentes ressources est donc un véritable défi journalier.

Durant sa thèse, Liwen s'est principalement intéressé à traiter les problèmes métiers d'affectation des ressources et d'ordonnancement des interventions. Pour cela, il a travaillé sur une transformation des connaissances métiers vers un environnement numérique afin d'aider les coordinateurs de structures de prise en charge à domicile à prendre les meilleures décisions. Pour obtenir une solution de coordination qui soit opérationnelle, il a proposé un découpage en deux grandes phases :

1. La formulation du problème, par exemple par de la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) ou en nombres mixtes (PLNM), ou encore avec des problèmes de satisfaction de contraintes (Constraint Satisfaction Problem, CSP).
2. La résolution du problème, par exemple par une méthode exacte ou par une méthode approchée grâce à un solveur.

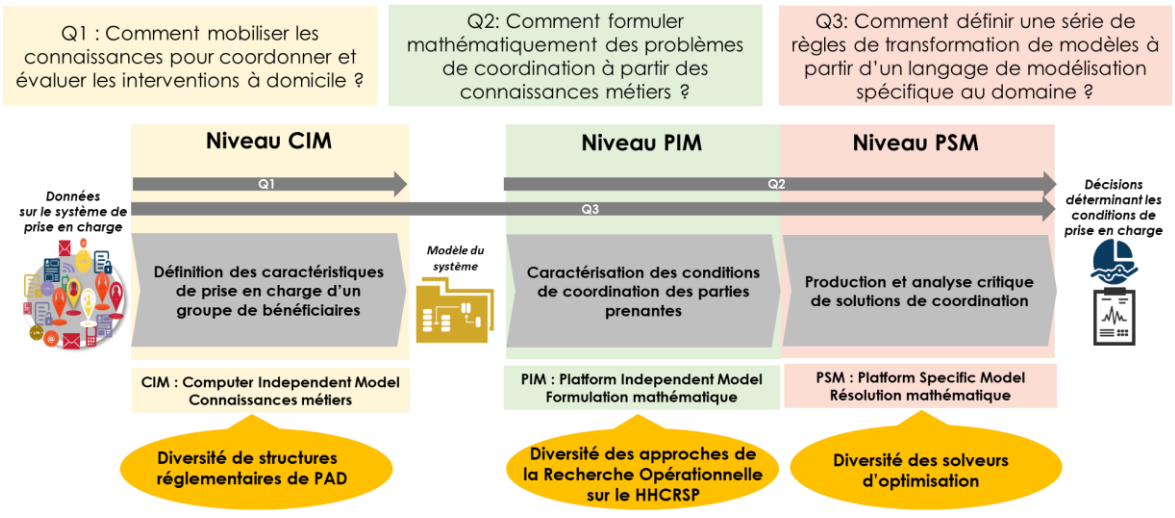


Figure 15. Approche proposée d'IDM pour la coordination de la prose en charge à domicile (Thèse de Liwen Zhang, 2021)

Ce découpage a appelé un besoin de représentation des connaissances par l'usage de modèles pour traiter les diversités qui existent dans ce domaine : (1) la diversité des structures de prise en charge à domicile, (2) la diversité des approches de recherche opérationnelle et (3) la diversité des solveurs d'optimisation. C'est pour ces raisons qu'il a orienté ses travaux vers l'ingénierie dirigée par les modèles (IDM) pour la coordination des services à domicile (voir Figure 15).

Ses principales contributions scientifiques ont porté sur :

- La définition d'un langage métier spécifique au domaine (*Domain Specific Modelling Language*, DSML) afin d'aider le coordinateur d'une structure à construire un modèle de connaissance orienté métier.
- La formulation et la résolution du problème à l'aide de méthodes exactes ou approchées. Il a notamment défini une fonction objectif qui intègre des concepts originaux relatifs à la satisfaction des bénéficiaires (respect des plages horaires et des délais inter-interventions) et des intervenants (respect des horaires de travail, et équilibrage de la difficulté des tournées).
- La configuration automatique du solveur d'optimisation à partir du modèle métier (voir Figure 16).

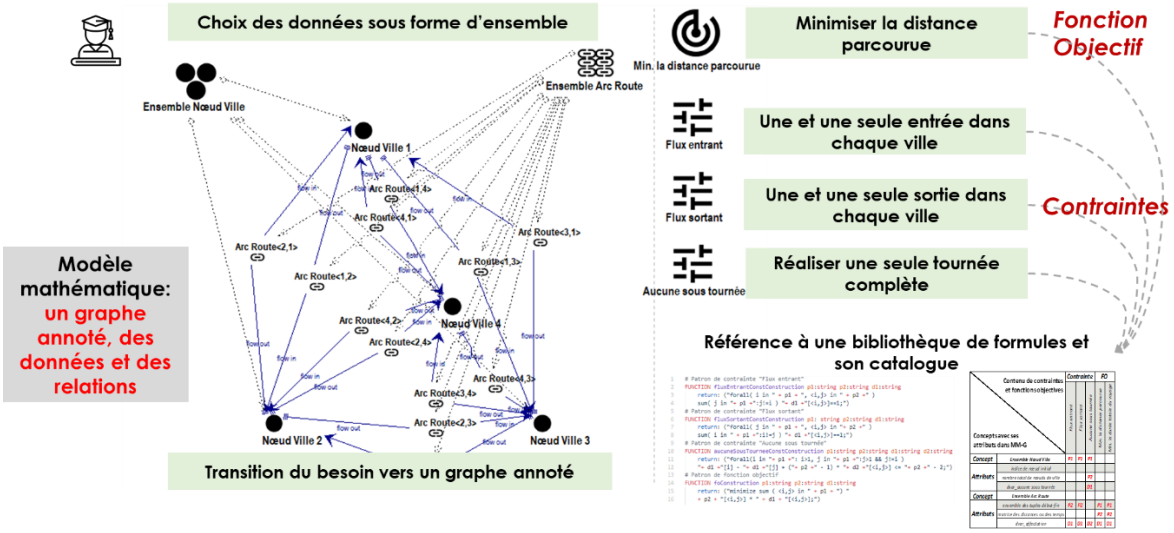


Figure 16. Transformation du modèle métier vers la formulation mathématique (Thèse de Liwen Zhang, 2021)

La thèse de Liwen a été valorisée par plusieurs publications dans des conférences internationales et, je tiens à le souligner pour un jeune chercheur chinois arrivé en France un an avant le début de sa thèse, des conférences nationales où il a présenté ses travaux avec beaucoup de brio :

(1) Zhang, L., Bouchet, P.-Y., Lamine, E., Fontanili, F., Bortolaso, C., Derras, M., Pingaud, H. (2019). Home Health Care Daily Planning Considering the Satisfaction of all the Stakeholders. Dans Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM 2019.

(2) Zhang, L., Lamine, E., Fontanili, F., Bortolaso, C., Derras, M., Pingaud, H. (2019). A decision-making support system for operational coordination of Home Health Care services. Dans 2019 Ieee/Acs 16th International Conference on Computer Systems and Applications (aiccsa 2019).

(3) Zhang, L., Fontanili, F., Lamine, E., Pingaud, H., Bortolaso, C., Derras, M. (2018). Une approche systémique de caractérisation des connaissances sur la coordination opérationnelle d'une prise en charge à domicile. Dans

GISEH 2018, 9ième Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des SystEmes Hospitaliers. GISEH 2018, 9ième Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des SystEmes Hospitaliers. Genève, Suisse, 9.
(4) Zhang, L., Fontanili, F., Lamine, E., Bortolaso, C., Derras, M., Pingaud, H. (2020). A systematic model to model transformation for knowledge-based planning generation problems. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 12144 LNAI, 140–152.
(5) Zhang, L., Lamine, E., Fontanili, F., Bortolaso, C., Sargent, M., Derras, M., Pingaud, H. (2020). BLPAD.Core: A Multi-Functions Optimizer towards Daily Planning Generation in Home Health Care. Dans Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA. Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA.
(6) Zhang, L., Pingaud, H., Lamine, E., Fontanili, F., Bortolaso, C., Derras, M. (2021). Étude prospective d'un environnement d'aide à la decision rendu configurable par des modèles. Dans CIGI-Qualita21 : 14ème Conférence Internationale Génie Industriel QUALITA. Grenoble (à distance), France, 93–101. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://hal-mines-albi.archives-ouvertes.fr/hal-03332025 [Consulté le 18 March 2022].
(7) Zhang, L., Fontanili, F., Lamine, E., Bortolaso, C., Derras, M., Pingaud, H. (2021). Stakeholders' Tolerance-based Linear Model for Home Health Care Coordination. IFAC-PapersOnLine, 54(1), 269–275.

Un article a été soumis en décembre 2021 dans la revue Health Systems (WoS) : *Novel OptaPlanner-Oriented CSP Model Considers the Satisfaction of All Stakeholders in Home Health Care Coordination*. Nous sommes en attente des rapports des reviewers.

Nous avions prévu d'intégrer dans l'architecture dirigée par les modèles développée par Liwen une dernière étape de simulation afin de pouvoir évaluer la solution optimale de tournée des intervenants, et même la soumettre à des perturbations aléatoires afin de mesurer sa robustesse. Afin de valider cette approche, nous avons construit un premier modèle de simulation pour le cas d'une tournée de 8 intervenants et 28 bénéficiaires. Les résultats se sont avérés concluants, même si Liwen n'a pas eu le temps d'aller plus loin durant sa thèse.

> C'est pour cette raison que le projet *BL-Sim* a été monté en collaboration avec la société Berger-Levrault qui souhaitait donner une suite à la thèse de Liwen Zhang, et aussi à celle de Cléa Martinez, qui a rejoint le centre Génie Industriel en décembre 2020 en tant qu'enseignante-chercheuse. Ce projet bénéficie d'une aide apportée par le Plan de Relance (mesure de préservation de l'emploi R&D) pour une période de deux ans et d'un financement direct de la société Berger-Levrault pour deux années complémentaires. J'ai ainsi pu recruter un post-doctorant (Guillaume Dessevre), et Liwen a rejoint le CGI/IOS en tant que chercheur associé. Il est détaché par Berger-Levrault, son employeur principal, à hauteur de 20% de son temps de travail pour mener ses travaux de recherche avec nous. Une première publication vient d'être soumise à WSC'22 en avril 2022 (notification d'acceptation prévue le 10/06/2022) : *Simulation and analysis of disruptive events on a deterministic home health care routing and scheduling solution.*

1.4.5. Un double numérique des parcours patients avec la thèse d'Abdallah Karakra (#8)[65]

Tableau 12. Résumé de la thèse de Abdallah Karakra (#8)

#8. KARAKRA, Abdallah	
Sujet	*HospiT'Win: Designing a Discrete Event Simulation-Based Digital Twin for Real-Time Monitoring and Near-Future Prediction of Patient Pathways in the Hospital*
Mots-clés	*Patient pathways, Discrete event simulation-based digital twin, Initialization, Synchonization*
Date de soutenance	*18 octobre 2021*
Taux d'encadrement	*50% (Co-Directeur de thèse, direction assurée par Jacques Lamothe et co-encadrement d'Elyes Lamine)*
Financement	*Projet HospiT'Win avec bourse doctorale de la Région Occitanie et convention avec la DGOS (ministère de la Santé) / ARS Occitanie*
Travaux co-publiés	1 publication ACLN[66], 3 publications C-ACTI
Situation du docteur	*Associate professor à l'Université de Birzeith (Palestine)*

La thèse d'Abdallah Karakra, qui s'est terminée en octobre 2021, nous a permis de travailler pendant trois ans sur un sujet qui me tient à cœur : le double numérique des parcours patient. La finalité des travaux d'Abdallah consistait à concevoir un double numérique de l'hôpital servant d'outil d'aide à la décision pour le pilotage en temps réel des flux de patients. Il s'agit de disposer d'une véritable réplique digitale et dynamique de l'hôpital, servant à la fois d'outil de supervision et de pilotage des flux de patients. En effet, la connaissance en temps réel de l'état du système hospitalier, en termes de localisation des patients et d'occupation des ressources (salles, équipements, personnels), peut permettre, en étant couplée à un simulateur de flux, (1) d'évaluer très rapidement (l'objectif est de moins de cinq minutes) les conséquences d'événements inattendus (arrivée d'un patient non programmé dans un service de consultation, durée opératoire plus longue que prévue au bloc, analyse biologique non terminée, etc.), puis (2) de tester virtuellement différents scenarii permettant d'y remédier au mieux, avant (3) de mettre en œuvre la solution la plus performante dans le monde réel.

Ce double numérique constitue l'élément de base de la thématique de recherche sur laquelle je projette de travailler dans les prochaines années : le pilotage prédictif des parcours patients. Je la développerai donc plus en détail dans la partie 2 de ce manuscrit.

Dans ce résumé de la thèse d'Abdallah, je me limite à mettre en avant les verrous qu'il a tenté de lever et ses principales contributions pour y parvenir.

Sa première question de recherche est très élémentaire, et pourtant peu de références ont été publiées : Comment construire un double numérique des parcours patients à partir d'un simulateur à événements discrets ? Pour y répondre, Abdallah a proposé une méthodologie basée sur l'ingénierie dirigée par les modèles et comportant trois grandes phases : (1) conception, (2) transformation, et (3) exploitation. Pour chacune de ces phases, il a utilisé différents modèles et méta-modèles qu'il a interconnectés : un modèle de connaissance des parcours s'appuyant à la fois sur un méta-modèle des parcours du monde réel et un autre méta-modèle des parcours du double

[65] Karakra, A. (2021). HospiT'Win : designing a discrete event simulation-based digital twin for real-time monitoring and near-future prediction of patient pathways in the hospital. Thèse de doctorat. Disponible à l'adresse : http://www.theses.fr/2021EMAC0005/document.

[66] ACLN : Articles dans des revues avec comité de lecture non référencées.

numérique. À l'issue de la phase de conception, cela lui permet de développer deux modèles de simulation obtenus à partir d'un simulateur à événements discrets : un modèle "*replay*" permettant de rejouer le passé à l'identique pour disposer d'un modèle validé, et un modèle "*prospectif*" pour simuler l'existant ou de nouveaux scénarios dans le futur. La phase de transformation a consisté à connecter le modèle prospectif au monde réel, en collectant des événements provenant de capteurs. Cela constitue un obstacle technique majeur puisque les simulateurs du commerce ne sont pas prévus pour être connectés en temps réel à des événements externes. Pour finir, dans la phase d'exploitation, Abdallah a travaillé à la fois sur la problématique d'initialisation du double numérique dans l'état du monde réel, et aussi sur sa synchronisation au fil de l'arrivée des événements du monde réel.

Ses autres questions de recherche découlent de la première : Comment initialiser le double numérique dans l'état courant du monde réel ? et comment synchroniser les événements du double numérique avec les événements du monde réel ? Pour cela, il a notamment proposé un langage de description de la synchronisation, GRAFNet, établi à partir d'une hybridation entre réseau de Petri et Grafcet.

La Figure 17 illustre un exemple de synchronisation de parcours patients entre monde réel (à gauche) et double numérique (à droite) permettant de recaler le double numérique selon qu'il est en retard ou en avance par rapport à des événements de parcours patients dans le monde réel.

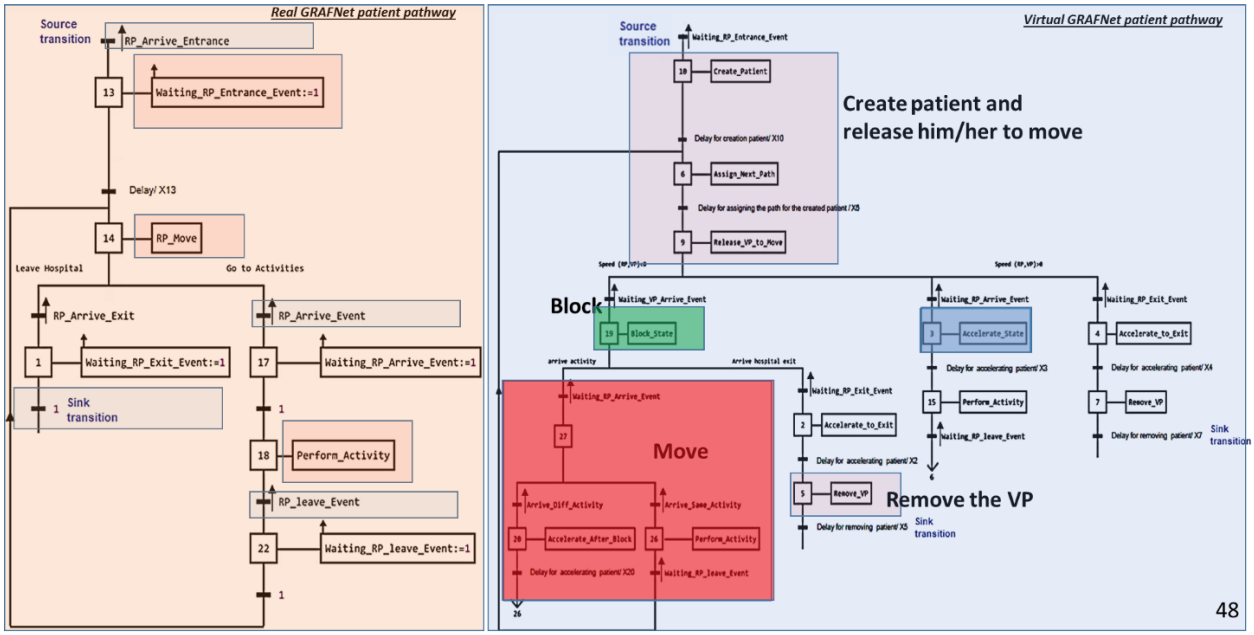


Figure 17. Description de la synchronisation de parcours patients à l'aide du langage GRAFNet (Thèse d'Abdallah Karakra, 2021)

Les travaux d'Abdallah ont été valorisés par plusieurs publications dans des journaux et conférences internationales :

(1) Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., Lamothe, J. (2019). HospiT'Win: A Predictive Simulation-Based Digital Twin for Patients Pathways. IEEE EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics, BHI 2019 - Proceedings 2019.

(2) Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., Lamothe, J., Taweel, A. (2019). Pervasive Computing Integrated Discrete Event Simulation for a Hospital Digital Twin. Dans Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA.
(3) Karakra, A., Lamine, E., Fontanili, F., Lamothe, J. (2020). HospiT'Win: A digital twin framework for patients' pathways real-time monitoring and hospital organizational resilience capacity enhancement. Dans 9th International Workshop on Innovative Simulation for Health Care, IWISH 2020. 9th International Workshop on Innovative Simulation for Health Care, IWISH 2020. 62–71.
(4) Karakra A, Fontanili F, Lamine E et al. (2022). A discrete event simulation-based methodology for building a digital twin of patient pathways in the hospital for near real-time monitoring and predictive simulation [version 1; peer review: 1 approved with reservations]. Digital Twin 2022, 2:1 (https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17454.1)

Un article a été soumis en mars 2022 dans la revue Health Care Management Science (WoS) : *A Novel Application of Discrete Event Simulation as a Digital Twin for Monitoring Patient Pathways in a Hospital in Real Time*. Nous sommes en attente des rapports des reviewers.

Grâce à ses travaux, Abdallah nous a permis de passer d'un concept de double numérique assez flou à une preuve concrète réalisée avec, d'une part le logiciel de simulation FlexSim qui a servi de double numérique, et d'autre part le logiciel de simulation Witness qui a servi d'émulateur du monde réel. Il était en effet très compliqué et risqué de nous connecter à un "vrai" système d'information hospitalier pour réaliser nos expérimentations. L'émulateur a été développé de façon à émettre des événements vers le double numérique, à l'identique de ce que l'on obtiendrait si l'on était effectivement connecté au monde réel.

> Les travaux d'Abdallah ont permis d'obtenir un financement du groupe de travail GHT de la DGOS (Direction Générale de l'Offre de Soins, ministère de la Santé) dans le cadre du pacte de refondation des Urgences[67]. Nous avons proposé le projet *HospiT'Win* qui doit aboutir à la mise en place d'un double numérique au centre hospitalier de Perpignan sur un périmètre expérimental entre le service d'accueil des urgences et deux services aval d'hospitalisation, ceci afin de disposer d'un outil d'aide à la décision pour la gestion des lits d'aval. Dans ce cas, le double numérique sera effectivement connecté au monde réel via un système de tracking des patients et non pas par le biais d'un émulateur. Ceci nous permettra de valider totalement cette approche, y compris pour son acceptabilité par les personnels et les patients.

Abdallah est maintenant *associate professor* à l'Université de Birzeith, dans l'équipe du Professeur Adel Taweel, et nous restons en contact pour poursuivre ses travaux de recherche puisque nous avons établi un *Memorendum of Undestanding* (MoU) avec son établissement.

[67] https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/_urgences_dp_septembre_2019.pdf

1.4.6. La régulation des blocs opératoires avec la thèse de Leah Rifi (#9)

Tableau 13. Résumé de la thèse de Leah Rifi (#9)

#9. RIFI, Leah	
Sujet (provisoire)	*Une Démarche Outillée d'Aide à la Décision pour la Régulation des Blocs Opératoires*
Mots-clés	*Blocs opératoires, Régulation sous incertitude, Simulation à événements discrets, Prédiction des durées d'intervention*
Date de soutenance	*Prévue fin 2023. Thèse en cours, débutée en octobre 2020*
Taux d'encadrement	*50% : Directeur de thèse par dérogation, co-direction assurée par Maria Di-Mascolo, GScop Grenoble et co-encadrement par Cléa Martinez)*
Financement	*Projet OREM, avec bourse doctorale de la Région Occitanie et contrat de recherche avec le groupe Vivalto Santé (Paris, Avranches)*
Travaux co-publiés	1 publication ACL, 1 publications C-ACTN, 1 chapitre d'ouvrage OS[68]
Situation du docteur	*En contrat doctoral IMT Mines Albi*

La thèse de Leah Rifi a débuté en octobre 2020. Elle est donc actuellement au milieu de sa deuxième année. Son sujet concerne la régulation des blocs opératoires, problème qui est au cœur du pilotage de l'activité quotidienne (horizon = 1 journée), et fonction généralement assurée par un cadre paramédical ou médical expérimenté. Le régulateur est en charge du bon déroulement du programme opératoire en vérifiant régulièrement les jalons du parcours patient et en minimisant les écarts entre le Programme Prévisionnel Initial, qui est validé la veille, et le Programme Effectivement Réalisé. Ces écarts sont dus à deux types de perturbations aléatoires : (1) les aléas qui sont des événements qui affectent le déroulement du programmation opératoire (exemple : rajout d'une intervention urgente ou suppression d'une intervention à cause d'un instrument manquant ou défectueux) et (2) les incertitudes qui sont des imprécisions associées à l'estimation des durées telles que le temps opératoire et le temps de remise en état d'une salle.

Aussi, la question de recherche que nous adressons dans cette thèse est la suivante : Comment aider la régulation à réduire les écarts entre le programme prévisionnel et le programme effectivement réalisé afin de maintenir l'activité du bloc opératoire au niveau de performance visé ? Pour y répondre, nous proposons une démarche à base de simulation à événements discrets pour fournir une aide à la décision permettant une régulation agile des flux de patients et une coordination optimale des ressources humaines et matérielles dans le bloc opératoire d'un hôpital.

Leah a déjà fourni un très important travail, à la fois de recherche bibliographique, et aussi expérimental. Pour ce dernier, elle est en contact étroit avec trois blocs opératoires de différents établissements : le centre hospitalier d'Albi, le centre hospitalier intercommunal de Créteil, et l'hôpital privé de La Baie à Arromanches (groupe Vivalto). Elle bénéficie aussi des conseils de l'ancienne directrice des blocs opératoires de l'hôpital du Kremlin-Bicêtre (AP-HP). Tout cela lui a déjà permis de collecter de nombreuses données et informations issues de la réalité et qu'elle a structurées sous la forme de modèles de données, et de diagrammes de flux permettant de modéliser les parcours patients au blocs opératoires ainsi que la coordination des différentes ressources : chirurgiens, anesthésistes, infirmières, brancardiers.

[68] OS : Ouvrages scientifiques

Elle est actuellement en train de travailler sur le développement d'un modèle de simulation générique du bloc opératoire, construit sur la base des connaissances et des données dont elle dispose. Ce modèle de simulation doit lui permettre de mener des expérimentations durant lesquelles elle souhaite évaluer l'impact de perturbations, à l'identique de celles qui se produisent réellement. Quand ce modèle de simulation sera validé, son objectif est donc de l'utiliser soit (1) pour préparer un programme opératoire prévisionnel, mais en anticipant les perturbations qui pourraient survenir et les solutions qui pourraient les atténuer, soit (2) comme un véritable double numérique de pilotage en temps réel. Cette dernière option se situe donc dans la suite de la thèse d'Abdallah Karakra.

Leah a déjà valorisé son travail par une publication dans une revue internationale référencée WoS et Scopus, dans une conférence francophone, et dans un chapitre d'ouvrage (édité en français et en anglais) :

(1) Rifi, L., Fontanili, F., Di Mascolo, M., Martinez, C. (2021). Framework for a retrospective analysis of operating room schedule execution. International Journal of Healthcare Technology and Management, 1, 1. DOI: 10.1504/IJHTM.2021.10042376
(2) Rifi, L., Fontanili, F., Jeanney, M. (2020). Proposition d'une démarche outillée d'analyse rétrospective du déroulement du programme au bloc opératoire : application à la régulation. Dans GISEH 2020, 10ième Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des SystEmes Hospitaliers. GISEH 2020, 10ième Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des SystEmes Hospitaliers. Valenciennes, France.
(3) Rifi, L., Fontanili, F., Jeanney, M. (2022). À paraitre. Tool-based Approach to Analyze Operating Room Schedule Execution: Application to Online Management. Chapitre 12 de l'ouvrage "Ingénierie de la santé", coordinateurs : S. Chaabane, E. Cousein et P. Wieser). ISTE Editions.

Un article a été soumis à la Winter Simulation Conference'22 en avril 2022 : *A simulation-based approach for assessing the impact of uncertainty on patient waiting time in the operating room*. La notification d'acceptation est prévue le 10/06/2022.

1.4.7. La planification d'un centre d'appels pour sourds et malentendants avec la thèse de Samer Alsamadi (#10)

Tableau 14. Résumé de la thèse de Samer Alsamadi (#10)

#10. ALSAMADI, Samer	
Sujet (provisoire)	*Développement d'un outil d'aide à la décision pour optimiser la planification des opérateurs-relais et permettre le dimensionnement et l'exploitation des centres d'appels pour la surdité*
Mots-clés	*Centre d'appels, Planification des ressources, Simulation à événements discrets, Prédiction des arrivées d'appels*
Date de soutenance	*Prévue début 2025. Thèse en cours, débutée en février 2022*
Taux d'encadrement	*30% en co-direction prévue sur année 1 avec Xavier Lorca, puis direction années 2 et 3, et co-encadrement par Cléa Martinez (IMT Mines Albi)*
Financement	*Projet ACDC dans le cadre du Dispositif GRAINE de la Région Occitanie et de la création d'un laboratoire commun avec la société Ivès-Elioz.*
Travaux co-publiés	
Situation du docteur	*En contrat doctoral IMT Mines Albi*

> Samer Alsamadi a débuté sa thèse il y a à peine trois mois, en février dernier. Celle-ci se déroule dans le cadre du projet et du laboratoire commun ACDC, en collaboration avec la société Elioz. Elioz fournit des services de communication innovants et personnalisés aux entreprises et collectivités désireuses de faciliter leurs échanges avec les personnes sourdes ou malentendantes. Ces services sont disponibles sur une plateforme numérique d'appels multimodaux (LSF, LPC, texte, etc.) qui fait intervenir à distance des opérateurs-relais pour assurer la communication entre un interlocuteur sourd et un entendant.

La planification de ses opérateurs-relais, afin de combiner qualité de service (rapidité de décroché) et performance économique (occupation des opérateurs-relais), constitue la principale difficulté qu'Elioz souhaite adresser avec ce projet de recherche. En effet, cette planification est aujourd'hui réalisée de façon empirique, sur la base d'une expertise métier forte, mais sans maîtrise de son optimalité. Cela a pour conséquence de freiner le développement de l'activité alors que le marché est porteur. Le projet ACDC entre Elioz et IMT Mines Albi propose de mener des travaux de recherche conduisant à développer une démarche et un outil d'aide à la décision pour optimiser la planification des opérateurs-relais et permettre le dimensionnement et l'exploitation des centres d'appels pour la surdité.

Elioz et IMT Mines Albi ont entamé une collaboration de recherche en 2018-2019 qui a conduit en la réalisation d'une preuve de concept logicielle (TRL 3-4) sous la forme d'un simulateur de la plateforme de services, avec un périmètre limité aux appels LSF. Grâce à cette preuve de concept, assimilable à un véritable double numérique de la plateforme, Elioz a pu valider qu'il lui serait possible d'évaluer et d'anticiper de façon très précise le besoin en ressources (opérateurs-relais) sur différents créneaux horaires en fonction des flux d'appels entrants. Ceci constitue le point de départ de la thèse de Samer que nous avons structurée en trois thématiques fortement dépendantes les unes des autres :

1. L’analyse, le traitement, et l’exploitation de données d’un centre d’appels.
2. L’optimisation de la planification.
3. La Simulation du centre d’appel.

Je ne développe pas d'avantage cette thèse toute récente, mais je souligne que Samer s'est très rapidement investi dans son sujet puisqu'il a pu rédiger un premier article qu'il a soumis mi-avril à la Winter Simulation Conference. La notification d'acceptation est attendue le 10/06/2022. Son article est intitulé "*Call center agent scheduling evaluation using discrete event simulation: a decision-aid tool*".

1.5. Autres activités d'encadrement dans la recherche

1.5.1. Encadrement de Masters ou de DEA

Le Tableau 15 résume les deux encadrements que j'ai assurés. Celui d'Arnaud Vincent s'est déroulé durant ma thèse, alors que j'ai assuré celui de Leïla Albert peu de temps après mon arrivée à IMT Mines Albi.

Tableau 15. Encadrements de Masters et DEA

Nom, prénom	Sujet	Période
VINCENT, Arnaud	Algorithmes génétiques appliqués à l'optimisation d'une ligne de production, ENS Cachan.	1998
ALBERT, Leïla	Mesure et amélioration de la performance des équipements de production, INSA Lyon.	2004

1.5.2. Encadrement de post-doctorats

Le Tableau 16 résume les trois post-doctorats que j'ai encadrés ou encadre encore. Que ce soit les deux premiers (Eva Petitdemange de 01/2021 à 08/2021 dans le cadre du projet PREPS CallSAMU, voir encadré en section 1.4.3, et Abdallah Karakra de 11/2021 à 01/2022 dans le cadre du projet HospiT'Win, voir encadré en section 1.4.5), ou le dernier qui vient de démarrer (Guillaume Dessèvre de 02/2022 à 01/2026 dans le cadre du projet BL-Sim, voir encadré en section 1.4.4), j'ai pu financer ces contrats post-doctoraux grâce à des projets de recherche collaborative dans lesquels j'ai été le contributeur principal.

Tableau 16. Encadrement de post-doctorats

Nom, prénom	Sujet/contrat de recherche	Période
PETITDEMANGE, Eva	Projet CallSAMU (financement PREPS DGOS)	01/2021 à 08/2021
KARAKRA, Abdallah	Projet HospiT'Win (financement DGOS)	11/2021 à 01/2022
DESSEVRE, Guillaume	Projet BL-Sim (financement Plan de Relance et Berger-Levrault)	02/2022 à 01/2026

1.6. Responsabilités collectives assurées

Le Tableau 17 résume les différentes responsabilités collectives que j'ai exercées. La plupart d'entre-elles concernent le domaine de la formation ou du management de la formation, responsabilités qui sont malheureusement peu reconnues dans la carrière d'un enseignant-chercheur.

Enfin, depuis janvier 2020, j'ai une responsabilité managériale dans mon laboratoire de recherche puisque le directeur du CGI m'a proposé de créer et de piloter l'axe de recherche appliquée *Ingénierie Organisationnelle pour la Santé* (IOS).

Tableau 17. Responsabilités collectives exercées

	Responsabilité	Lieu	Période
1	Directeur des études du département OGP	IUT de Cergy-Pontoise	1997-1999
2	Chef du département OGP	IUT de Cergy-Pontoise	2000-2003
3	Responsable de la Licence Professionnelle en Management de la Qualité	IUT de Cergy-Pontoise	2000-2003
4	Membre de l'Assemblée des Chefs de Départements (ACD) des IUT dans la spécialité OGP	IUT de Cergy-Pontoise	2000-2003
5	Responsable de la cellule NTE (Nouvelles Technologies Éducatives)	École des mines d'Albi-Carmaux	2004-2006
6	Responsable de la formation d'ingénieurs par l'apprentissage	École des mines d'Albi-Carmaux	2008-2013
7	Membre du comité de l'enseignement pendant le montage et le pilotage de la formation d'ingénieurs en apprentissage	École des mines d'Albi-Carmaux	2007-2013
8	Responsable de l'UE Supply Chain 4.0 de l'option Génie Industriel	IMT Mines Albi	depuis 2016
9	Responsable de l'axe de recherche appliquée IOS - Ingénierie Organisationnelle pour la Santé	CGI/IMT Mines Albi	depuis 2020

1.6.1. Mes premières responsabilités à l'IUT de Cergy-Pontoise

Au début de ma carrière dans l'enseignement secondaire, je me suis cantonné à un métier d'enseignant, non seulement parce que j'étais jeune et inexpérimenté, mais aussi parce que les responsabilités collectives étaient réservées à des personnels affectés exclusivement à ce rôle.

C'est en arrivant dans l'enseignement supérieur en tant que PRAG, à l'IUT de Cergy-Pontoise, que j'ai pu exercer mes premières responsabilités collectives, en plus de mes enseignements, à partir de 1997. Celles-ci ont évolué crescendo, puisque dès septembre 2000, j'ai été nommé chef du département OGP pour un mandat de 3 ans, en ayant en responsabilité les étudiants de DUT et de Licence Professionnelle ainsi que l'ensemble des personnels enseignants et enseignants-chercheurs, administratifs et techniques, pour assurer le fonctionnement opérationnel d'un site délocalisé de l'IUT (à Argenteuil, 95).

Alors que j'avais soutenu ma thèse en octobre 1999, je n'ai eu devant moi qu'une année de répit avant de prendre cette responsabilité. En tant que PRAG, et avec une obligation de service de 384 heures par an exclusivement limitée à l'enseignement, j'aurais pourtant aimé faire fructifier mes travaux de thèse. Mais j'ai dû finalement me résoudre à mettre mes activités de recherche entre parenthèses durant mon mandat de chef de département et jusqu'à ma nomination en septembre 2003 sur un poste d'enseignant-chercheur à l'école des mines d'Albi-Carmaux.

1.6.2. Une nouvelle responsabilité dès mon arrivée à l'École des Mines d'Albi

Mon intégration à l'école des Mines d'Albi-Carmaux en tant que "jeune" enseignant-chercheur (de 40 ans !) au Centre Génie Industriel (CGI) ne s'est cependant pas vraiment déroulée comme je l'imaginais. Je pensais en effet pouvoir consacrer une partie de ma charge à la recherche, mais mon expérience passée dans l'enseignement m'a sans doute rendu initialement plus attractif pour le Directeur des études que pour le Directeur du CGI. C'est ainsi que, quelques mois après mon arrivée, Jacques Schwarzentruber[69] m'a demandé de prendre la responsabilité de la cellule NTE[70] devant être mise en place à Albi, comme dans toutes les écoles des Mines. Après avoir recruté un jeune docteur pour me seconder dans cette tâche, Fabien Baillon[71], je me suis donc investi pour découvrir et faire découvrir à mes collègues enseignants-chercheurs ces nouvelles technologies éducatives. Avec Fabien, nous avons pu notamment expérimenter des outils numériques d'édition de contenus pédagogiques, à une époque où le polycopié de cours sous un format papier semblait être la référence absolue pour permettre à chaque enseignant-chercheur de diffuser son savoir. Le chemin a été long, et nous nous sommes heurtés à beaucoup de résistance avant de convaincre un premier enseignant qui a servi de cobaye (moi-même !), puis quelques autres qui se sont comptés sur les doigts… d'une main pour expérimenter ces nouveaux moyens pédagogiques. Le déclic a sans doute eu lieu grâce à la plateforme pédagogique Moodle, baptisée Campus dans les écoles des Mines, que nous avons testée pour la première fois à Albi en 2005. Nous avons pu valoriser notre travail grâce à une communication[72].

Aujourd'hui, cette plateforme est plus que jamais en place et très largement utilisée par la totalité des enseignants, permanents et vacataires. La cellule NTE s'est encore développée après nous, pour devenir aujourd'hui une cellule de support pédagogique composée d'une équipe de trois permanents à plein temps. Grâce à l'expérience acquise avec la plateforme Moodle Campus depuis plus de 15 ans, je suis convaincu que durant les périodes de confinement de 2020 et 2021 dues à la crise sanitaire du Covid, les enseignants et les élèves ont pu s'adapter sans grande difficulté et avec une très grande réactivité pour assurer des cours à distance de très bonne qualité pédagogique.

1.6.3. Un autre défi : la formation d'ingénieurs par la voie de l'apprentissage

Cette période s'étale sur une durée de 6 ans (de 2007 à 2013) et constitue une étape très motivante et enrichissante en tant qu'enseignant. Personne ne peut contester mon investissement, au moins à plein temps, pour construire et piloter cette formation durant ces 6 années, mais cela ne m'a apporté aucune reconnaissance. C'est un choix que j'ai fait en connaissance de cause, acceptant le risque d'une perte de valorisation potentielle, sans doute irrémédiable, au profit d'un projet de montage, puis de pilotage, d'une formation d'ingénieurs par la voie de l'apprentissage dont je suis encore très fier aujourd'hui. Mon profil initial de professeur agrégé, enseignant de formation, et riche d'une expérience de près de vingt années de pédagogie et de management en lycée, IUT et écoles

[69] Directeur des études de l'école des Mines d'Albi-Carmaux de 1998 à 2006
[70] Nouvelles Technologies Éducatives
[71] Aujourd'hui enseignant-chercheur à IMT Mines Albi / Rapsodee
[72] Fontanili, F., Baillon, F., Lamothe, J. (2005). Une expérience d'intégration des nouvelles technologies éducatives par les élèves ingénieurs dans le cadre de travaux de veille documentaire. 3ème Colloque" Questions de pédagogie dans l'enseignement supérieur". p. 44-47. École Centrale de Lille.

d'ingénieurs, m'a poussé à saisir une telle opportunité. J'ai donc pu réaliser un rêve d'enseignant, grâce au soutien du directeur de l'école des mines d'Albi d'alors, M. Bruno Verlon[73], que je remercie encore aujourd'hui pour la confiance qu'il m'a accordée alors que d'autres auraient été beaucoup plus réticents et résistants face à un tel défi. Ce projet ambitieux a émergé et s'est concrétisé grâce aussi à une équipe soudée de collègues enseignants-chercheurs d'autres centres de recherche (Fabienne Espitalier, Cendrine Gatumel, Christine Boher, Gérard Bernhardt, Henri Berthiaux), ou de collègues assurant des fonctions supports au niveau de la scolarité (Isabella Dufour-Baumgardner, Christine Arancet, Fabien Baillon), et enfin de "nouveaux" recrutés plus spécifiquement pour cette formation (Christel Cabieces, Julie Teil, Lauriane Ordronneau, Nathalie Veuillez). Avec eux, pendant plus d'une année en tant que chef de projet, j'ai progressivement structuré et détaillé les contenus et objectifs pédagogiques de cette nouvelle filière d'ingénieurs en formation initiale par l'apprentissage (IFIA), en m'appuyant bien sûr sur la filière existante sous statut étudiant (IFIE), afin de déposer un dossier de demande d'habilitation auprès de la CTI en décembre 2007.



Figure 18. Remise des diplômes de la 1ère promotion IFIA en 2011 avec mon équipe (de gauche à droite) : Christel Cabieces, Julie Teil, Lauriane Ordronneau, Nathalie Veuillez, Fabienne Espitalier, Cendrine Gatumel, Christine Boher et Henri Berthiaux.
(Crédit photo : Henri-Claude Gras, 2011)

Il faut aussi souligner qu'en 2007, parmi les sept Écoles des Mines, seule celle de Saint-Etienne proposait une telle filière en alternance. En effet, l'ouverture des Grandes Écoles à des publics d'apprentis, issus pour la plupart de DUT ou même de BTS, n'était pas acquise comme cela l'est aujourd'hui. L'apprentissage s'est depuis démystifié dans l'enseignement supérieur et a conquis ses lettres de noblesse, même dans les plus grandes écoles d'ingénieurs et de commerce, mais les obstacles ont été nombreux avant d'y parvenir. Démarrer une telle filière à l'École des Mines d'Albi pouvait donc s'apparenter à un pari, d'autant plus que, contrairement à Saint-Etienne et à la plupart des autres écoles, nous avons choisi de délivrer à nos apprentis le même diplôme d'ingénieur généraliste que celui délivré à nos étudiants et à nos élèves en formation continue. Qui plus est, la responsabilité de la cellule NTE que j'avais prise, peu de temps après mon arrivée à l'école en 2003 (voir 1.6.2), m'a poussé à profiter de cette occasion pour instiller une dose non négligeable (à

[73] Directeur de l'école des Mines d'Albi-Carmaux de 2003 à 2012.

hauteur de 30% du volume des enseignements, soit plus de 500 heures réparties sur 3 ans) d'enseignements dits "NTE", en asynchrone et à distance, c'est-à-dire se déroulant dans l'entreprise de l'apprenti, avec des supports prévus pour un travail en autonomie. Il a donc fallu convaincre les enseignants de transformer une partie de leurs cours habituels en présentiel dans un nouveau format de "*blended learning*", mixant cours présentiels à l'école en synchrone et cours à distance dans l'entreprise en asynchrone, avec des supports essentiellement numériques. Il a aussi fallu convaincre les apprentis, qui, comme tout apprenant, sont naturellement plus enclins à suivre, souvent passivement, des cours face à un enseignant, plutôt que de se former en autonomie de façon nécessairement plus active. C'est en grande partie grâce à cette filière par l'apprentissage que nous avons développé à Albi, dès 2008, de façon prémonitoire pourrait-on dire aujourd'hui, les enseignements à distance via la plateforme Moodle-Campus.

En mars 2008, la CTI a habilité pour la première fois cette formation, et nous avons donc démarré la promotion et la sélection de candidats pour une ouverture en octobre 2008. À partir de cette date, et jusqu'en septembre 2013, j'ai assuré la responsabilité de cette nouvelle filière en m'impliquant aussi dans le démarrage simultané du CFA MidiSup, dirigé par Germain Lacoste. J'ai eu l'honneur de remettre les diplômes aux trois premières promotions (voir Figure 18, promotion 2011). Durant ces cinq années, j'ai aussi été invité à présenter les évolutions de cette filière dans les conseils d'administration et les comités des études de l'école des mines d'Albi-Carmaux.

1.6.4. La responsabilité de l'axe de recherche appliquée IOS

En octobre 2013, je me trouve à la croisée des chemins. J'ai 50 ans, et deux options s'offrent à moi : soit je reste dans la formation et le management de la formation en tirant un trait définitif sur la recherche, soit je reviens au CGI pour m'investir dans l'encadrement de chercheurs.

J'aime les projets, et le changement ne me fait pas peur. J'ai donc choisi la deuxième option, non sans un gros pincement au cœur. Pendant une à deux années, j'ai traversé une période de doutes, parfois de regrets, et souvent d'interrogations sur mes capacités à rebondir. "*Ce qui ne te tue pas te rend plus fort*" disait Nietzshe… J'ai surtout été soutenu et encouragé par quelques jeunes collègues. Tout d'abord Matthieu Lauras et Jacques Lamothe, qui m'ont proposé de participer à l'encadrement de la thèse de Romain Miclo (#3) qu'ils co-dirigeaient (voir section 1.3.5). Romain a été scientifiquement et humainement un doctorant exceptionnel, et je le remercie aussi car il m'a permis de me remettre en confiance sur mes capacités d'encadrement. Il y a aussi, et même surtout, Elyes Lamine. Maître de conférences au Centre Universitaire Jean-François Champollion d'Albi et affecté à l'école d'ingénieurs ISIS[74] de Castres, il avait rejoint le CGI en tant que chercheur associé au milieu des années 2000. Elyes a été pendant plusieurs années le seul chercheur du CGI à se consacrer exclusivement au domaine de la Santé. Ses travaux portaient principalement sur les systèmes d'information pour la santé et il est aujourd'hui un expert reconnu dans l'ingénierie dirigée par les modèles pour la transformation numérique du système de santé. Il a soutenu en 2019 son habilitation à diriger les recherches sur cette thématique en l'appliquant aux parcours des usagers[75].

[74] Ingénieurs en Système d'Information pour la Santé.

[75] Lamine, E. (2019). Ingénierie dirigée par les modèles de la transformation numérique du système de santé - Application aux parcours d'usagers. Habilitation à Diriger les Recherches. INP Toulouse. Spécialité Systèmes Industriels.

Grâce à lui, je me suis irrémédiablement senti attiré par ce domaine vers lequel j'ai décidé d'orienter mes projets de recherche à mon retour au CGI. Avec l'expérience et l'expertise d'Elyes, j'ai petit à petit découvert et mieux appréhendé la complexité du système de santé français, puis j'ai tenté de définir plus précisément les sujets sur lesquels je pouvais m'investir. Les parcours patients sont ainsi devenus l'élément prédominant de nos projets communs. Ma complémentarité avec Elyes, en m'appuyant sur mes champs disciplinaires de prédilection, la modélisation et la simulation de processus notamment, nous a permis de progressivement faire monter en puissance et en reconnaissance le domaine de la santé au sein du CGI.

C'est ainsi qu'à partir de 2016, nous avons lancé les sept thèses (#4 à #10) présentées précédemment dans la section 1.4. La tâche n'était pas facile dans un laboratoire de recherche historiquement voué au génie industriel, et notre visibilité dans le monde de la santé était loin d'être acquise.

À force de persévérance, de recherche de financements pour des thèses et des projets, de rencontres avec des professionnels de santé, de collaborations avec des industriels et des éditeurs de solutions pour la santé, nous avons petit à petit acquis une reconnaissance qui a conduit le jeune directeur du CGI fraîchement nommé en 2018, Xavier Lorca, à nous accorder sa confiance pour créer un nouvel axe de recherche en ingénierie de la santé dans la future organisation du centre, à l'occasion de la campagne d'évaluation de 2019-2020 du HCERES. Cela a aussi été facilité par une conjonction avec la stratégie globale de l'Institut Mines Télécom (IMT), puisque la santé avait été présentée comme l'une des thématiques phares. C'est ainsi que nous avons défini les contours de l'axe *Ingénierie Organisationnelle pour la Santé* (IOS) qui allait se concrétiser à partir de janvier 2020.

Pourquoi utiliser le terme "ingénierie organisationnelle pour la santé ?

(Ortiz Bas 2016[76]) présente une synthèse du terme "*Organizational Engineering*" qui a émergé au milieu des années 2010. Comme le souligne cet auteur, on peut considérer que c'est un synonyme de "*Industrial Engineering*" (Génie Industriel), largement plus répandu dans la communauté internationale. Mais dans certains pays, le Génie Industriel a un sens qui englobe toutes les branches de l'ingénierie telles que le génie mécanique, le génie électrique, le génie des procédés, etc. De mon côté, les expériences personnelles que j'ai eues lorsque j'ai commencé, en 2012-2013, à approcher des acteurs du domaine de la santé et en me présentant comme enseignant-chercheur en Génie Industriel, m'ont fait penser que ce terme aurait des connotations qui pourraient s'avérer rédhibitoires. "… *Vous n'allez quand même pas traiter nos patients dans les hôpitaux comme des voitures fabriquées dans une usine*…" m'a lancé en mars 2013 un personnel soignant du CHU de Toulouse après une conférence que je venais de faire dans cet établissement sur le Lean Hospital. Cette remarque négative m'a interpellé et m'a poussé à remettre en question mon approche. En effet, cela m'a déjà permis de réaliser que mon discours pouvait être mal compris ou mal interprété, car bien évidemment, loin de moi l'idée de considérer des patients comme des produits manufacturés. Mais le simple fait d'évoquer la transposition de techniques et de démarches industrielles, telles que le Lean, dans le monde de la santé peut fausser les pistes et brouiller le signal reçu. Pourtant, tout usager ou professionnel du système de santé, en France comme dans

[76] Ortiz Bas, A. (2016). Understanding Organisational Engineering. International Journal of Production Management and Engineering, 4(1), 1.

de nombreux autres pays développés, peut témoigner de difficultés organisationnelles rencontrées de façon plus ou moins importantes. Il me semble donc plus pertinent que nos travaux de recherche, en particulier s'ils s'intéressent aux parcours patients, mettent l'accent sur l'organisation, soit parce qu'elle est défaillante et qu'il faut l'améliorer, soit parce qu'il faut en concevoir une nouvelle.

C'est pour ces raisons que je suis progressivement arrivé à revendiquer pour nos travaux au CGI le terme d'*ingénierie organisationnelle pour la santé*, plutôt que génie industriel qui demeure parfaitement adapté à toutes les branches des industries de la santé : développement et fabrication de médicaments humains et vétérinaires, de dispositifs médicaux et autres technologies médicale.

Quel est l'objectif de l'axe IOS ?

Proposer de nouveaux modes d'organisation du système de santé, de plus en plus robustes, coopératifs et performants, est l'un des défis majeurs des prochaines années. Ils devront être capables de s'adapter aux attentes des usagers avec des impératifs d'agilité et de personnalisation tout en garantissant une efficience médico-économique. La loi Ma Santé 2022 (loi n° 2019-774 du 24 juillet 2019 relative à l'organisation et à la transformation du système de santé[77]) ambitionne de répondre à ce besoin sociétal. Elle incite les structures sanitaires à opérer de profondes mutations organisationnelles et technologiques.

Dans cette perspective, la maîtrise des parcours patients[78], qu'ils soient intra ou extra-hospitaliers, caractérisés par l'incertitude liée au facteur humain, ainsi que la grande variété et la grande variabilité des activités qui les composent, constitue l'un des leviers à actionner. C'est dans ce contexte, et dans l'optique d'apporter des éléments de réponse à cet enjeu, que viennent se positionner les travaux de l'axe Ingénierie Organisationnelle pour la Santé.

L'objectif est de proposer des méthodes outillées d'ingénierie organisationnelle et de management permettant aux organisations de santé de configurer, de diagnostiquer, d'améliorer, et de piloter de façon agile et prédictive les parcours de patients dans le temps et dans l'espace.

Cela implique de modéliser les parcours patients comme des instances de processus, avec un niveau de granularité permettant de prendre en compte le déroulement, la coordination et les interactions entre les différentes activités, qu'elles concernent la prise en charge médicale (diagnostics, examens, traitements), mais aussi les attentes, les déplacements ou les transports, et les prises en charge administratives ou d'accompagnement. En prenant en compte les préférences des patients, la performance des parcours pourra être analysée suivant une perspective centrée sur l'expérience patient dans sa globalité, et pas uniquement sur le vécu des actes de soins.

Quels sont les verrous scientifiques que nous souhaitons lever dans l'axe IOS ?

Les connaissances actuelles permettent de recourir à de multiples outils d'ingénierie organisationnelle, mais ceux-ci sont le plus souvent cloisonnés et surtout inadaptés aux spécificités des parcours patients. Pour atteindre l'objectif général de l'axe IOS, plusieurs verrous scientifiques

[77] https://www.legifrance.gouv.fr/dossierlegislatif/JORFDOLE000038124322/

[78] Je reviendrai plus en détail sur les définitions des parcours patients dans la partie 2 de ce manuscrit.

doivent être levés afin d'enrichir ces outils, puis de les intégrer dans différentes méthodes d'ingénierie.

- ***Verrou 1 : Comment identifier et représenter les connaissances permettant de caractériser et décrire les parcours patients et les représenter sous la forme de modèles de processus, voire même de modèles de simulation, en confrontant plusieurs sources de données et d'information ?*** Cette question est centrale puisque les parcours patients sont rarement formalisés, ce qui est pourtant un acte préliminaire à toute démarche d'ingénierie.

- ***Verrou 2 : Comment enrichir les algorithmes de découverte et de conformité de processus afin qu'ils soutiennent une aide au diagnostic ?*** Cette question vise à dépasser les limites des algorithmes actuels qui s'arrêtent le plus souvent à l'objectivation des "symptômes" (ou des effets, en langage plus industriel) grâce à des rapports statistiques et à la mise en évidence de processus de référence.

- ***Verrou 3 : Comment évaluer l'impact organisationnel d'événements inattendus afin de permettre un pilotage agile et prédictif des parcours patients ?*** L'arrivée d'un patient non programmé dans un service de consultation, une durée opératoire plus longue que prévue au bloc ou une analyse biologique non terminée sont des exemples d'événements qui nécessitent de prendre des décisions en temps réel, sans moyen d'évaluer, ni l'impact de l'événement, ni celui de la décision prise.

Quelles sont les disciplines scientifiques impliquées dans l'axe IOS ?

Chacun de ces verrous met en évidence l'implication d'une ou de plusieurs des quatre disciplines scientifiques. La Science des données (data crunching, data mining, machine learning) permet de collecter, croiser et fusionner les données disponibles dans le Système d'Information Hospitalier (SIH) avec les observations et interviews des parties prenantes. Les données issues de la géolocalisation ou du tracking des patients et des ressources impliquées dans les parcours constituent une source complémentaire à intégrer, mais avec des difficultés à prendre en compte, tant sur le plan technologique que sur celui de l'acceptabilité par les usagers. Une fois que les données sont disponibles et au format souhaité, ce sont les outils et techniques de l'Ingénierie des connaissances (ontologies, arbres de décision, Case-Based Reasonning CBR) et de l'Ingénierie des modèles (principalement BPMN et Process Mining) qui sont mobilisés afin de modéliser et diagnostiquer les parcours, tout en s'inspirant aussi d'autres disciplines utilisées dans le domaine du diagnostic médical ou technique. À cela s'ajoutent des techniques issues de la Recherche Opérationnelle, notamment pour le développement d'un double numérique à base de simulation à événements discrets. L'objectif est de disposer d'une véritable réplique digitale des parcours patients, alimentée en permanence par des données captées dans le monde réel, permettant à tout moment de connaître et maîtriser la situation des patients, des personnels, des équipements. Ce double numérique doit aussi être un véritable cadre d'aide à la décision permettant de se projeter dans un futur proche pour évaluer les conséquences d'événements inattendus ou de changements organisationnels, pour ensuite proposer des scenarios de retour à la normale.

1.7. Activités d'expertise technique et scientifique

1.7.1. Thèses de 3ème cycle en sciences pour l'ingénieur

J'ai eu l'honneur d'être invité comme membre du jury de deux thèses de doctorat en tant qu'examinateur (voir Tableau 18).

La première, celle d'Olivier Cardin, portait sur un sujet sur lequel j'étais aussi en train de travailler dans le cadre de la thèse de Samieh Mirdamadi (#1). Le directeur de cette thèse, Pierre Castagna, qui est, avec Henri Pierreval, l'un des experts français les plus connus dans le domaine de la simulation de processus, me connait bien. Il a été, tout comme moi, chef d'un département OGP (à l'IUT de Nantes pour ce qui le concerne), et il suit mes travaux de recherche sur la simulation depuis ma thèse. Je le remercie de m'avoir fait partager une partie de ses connaissances, car il est un érudit de la simulation, et de m'avoir convié au jury de thèse d'Olivier Cardin, qui ne doit pas être très loin aujourd'hui de dépasser son maître. J'ai beaucoup d'estime pour le travail de l'un et de l'autre dans notre communauté scientifique.

Plus récemment, j'ai été examinateur dans le jury de la thèse de Cléa Martinez. J'avais eu l'occasion de suivre les travaux de Cléa grâce à sa directrice de thèse, Maria Di Mascolo, avec qui le CGI entretient une relation de longue date. Je connais pour ma part Maria depuis 2013 puisqu'elle avait rapporté dans la thèse de Marie Falcon (#2) que je co-dirigeais avec Lionel Dupont. J'ai ensuite accentué ma collaboration avec elle grâce à la thèse de Cléa, car simultanément, je co-dirigeais la thèse de Liwen Zhang (#7) avec Hervé Pingaud, et les deux sujets étaient très proches. Nous avons donc organisé plusieurs réunions d'échange et nous avons eu l'occasion d'assister à des présentations mutuelles de nos doctorants entre 2018 et 2020. J'apprécie beaucoup le travail qu'a mené Cléa et la contribution qu'elle a apporté dans le domaine de la planification des intervenants pour la prise en charge à domicile. À tel point que j'ai tenté de la convaincre de rejoindre le CGI de IMT Mines Albi dans l'axe IOS quand un poste d'enseignant-chercheur s'est ouvert fin 2020. Je suis heureux et fier d'avoir réussi, et je me réjouis qu'elle travaille aujourd'hui à mes côtés.

Tableau 18. Membre (examinateur) du jury de deux thèses de doctorat d'université

Nom, prénom	Sujet	Directeur	Date
CARDIN, Olivier	Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production - Application à un système flexible de production	CASTAGNA, Pierre	26/10/2007
MARTINEZ, Cléa	Considération de la dimension humaine dans l'optimisation de tournées de soins et services à domicile soumises à des perturbations	DI MASCOLO, Maria	02/11/2020

1.7.2. Thèses de 3ème cycle en santé

Cela ne représente pas la même implication, ni la même valeur scientifique, mais j'ai aussi eu l'opportunité d'être membre d'un nombre significatif de thèses d'exercice pour le titre de docteur en pharmacie. En effet, depuis la fin des années 90, l'école des Mines d'Albi-Carmaux propose aux étudiants en pharmacie qui sont admis en 6ème et dernière année de leur faculté, de passer en deux ans un double diplôme de Pharmacien et Ingénieur. Nous avons donc chaque année un vivier d'une douzaine de pharmaciens, à la fois dans la filière étudiante, mais aussi dans la filière en

apprentissage. Comme le résume le Tableau 19, j'ai été sollicité par plusieurs d'entre eux au fil des ans pour non seulement les aider sur les sujets qu'ils avaient choisis en rapport avec mes compétences, et aussi être membre de leur jury de thèse. Cela a été une expérience très riche pour moi, car elle a contribué à enrichir mon profil dans le domaine de la santé, même s'il s'agit ici de sujets s'intéressant essentiellement à la production industrielle ou à la logistique de médicaments, plus qu'aux parcours patients.

Tableau 19. Membre du jury de huit thèses d'exercice de docteur en pharmacie

	NOM, prénom	Sujet	Faculté	Année
1	DUPONT, Arnaud	Processus d'amélioration continue sur un site de production pharmaceutique	Tours	2014
2	LANDOIS, Romain	Lean Management en production pharmaceutique et utilité d'un logiciel de simulation de production	Paris Descartes	2015
3	DECUPERE, Claire	Mise en place du Lean sur un site de production pharmaceutique en France : remettre l'homme au cœur de la démarche.	Chatenay-Malabry	2016
4	CHARRIER, Laure	Le Lean Manufacturing au service de la chaîne logistique - Mise en application sur une ligne de production pharmaceutique	Bordeaux	2016
5	COLTIER, Vincent	Ingénierie organisationnelle à la pharmacie d'officine : une aide au développement de la PDA	Rennes	2017
6	VERNEAU, Maya	L'amélioration par l'erreur : application à la production pharmaceutique	Montpellier	2017
7	MALRIN-FOURNOL, Audrey	Amélioration continue dans le domaine de la santé - contrôle qualité d'un site de production pharmaceutique et dans des institutions de soins	Chatenay-Malabry	2018
8	TESSIER, Sylvain	Fonctionnement de la BlockChain et son intérêt pour le monde pharmaceutique.	Bordeaux	2019

1.7.3. Autres activités d'expertise

Le Tableau 20 résume mes autres activités d'expertise scientifique et technique.

Je détaille à la suite uniquement celles qui présentent le plus d'intérêt ou d'originalité (en gras dans le tableau).

Tableau 20. Résumé des autres activités d'expertise technique et scientifique

	Activité
1	Membre du jury du CAPET Technologie entre 1989 et 1992
2	Reviewer pour le journal Artificial Intelligence in Medecine
3	Reviewer pour le journal Computers and Industrial Engineering
4	Reviewer pour le journal Enterprise Information Systems
5	Reviewer pour le journal Simulation Transactions
5	Reviewer pour la conférence MOSIM (animateur de la session "Simulation Tools" à MOSIM Toulouse en 2018)
6	Reviewer pour la conférence ProVE'16
7	Plusieurs activités de conseil avec des entreprises depuis 1994
8	Membre du Comité Opérationnel de la thématique phare "Santé" de l'IMT
9	**Expert Lean dans l'action partenariale Diapason ARACT-MIDACT entre 2014 et 2016**
10	**Plusieurs études menées pour des établissements de santé depuis 2013**
11	**Mission d'expertise et d'accompagnement pour la mise en place d'une formation d'ingénieurs par l'apprentissage à l'école d'ingénieurs ISIS à Castres, département de formation de l'Université J.F. Champollion d'Albi (avril 2013 à mars 2014)**
12	**Conseil scientifique pour le dossier de demande de Jeune Entreprise Innovante de la société LogPickR en 2019**

Activité #9 : Entre 2014 et 2016, j'ai eu l'occasion de collaborer avec des ergonomes (académiques et consultants) dans le cadre d'une action partenariale Diapason ARACT-MIDACT[79] portant sur l'articulation réelle de la performance des entreprises et de la santé des salariés dans les démarches de type Lean. Je faisais partie du comité d'experts chargé de suivre et donner un avis sur les actions menées par des binômes de consultants (un expert Lean et un expert Ergonomie) dans six entreprises de la région Midi-Pyrénées. Il s'agissait d'essayer de trouver une approche permettant un équilibre entre performance et santé (voir Figure 19).

Ce travail m'a conduit à faire une communication au congrès de la SELF 2015, avec publication dans les actes :

(1) Franck Fontanili, Max Léon, Jean-Luc Gaubert, Vanina Mollo. (2015). Produire plus, tout en améliorant les conditions de travail, rêve ou réalité ? Une application à la conception d'une ligne de conditionnement de parfums de luxe. Actes du congrès de la SELF (Société d'Ergonomie de Langue Française), Paris 2015.

J'ai aussi eu l'occasion d'intervenir lors de la journée de restitution de cette action (6 octobre 2016) pour faire une communication conjointe avec une ergonome, Maria-Sol Perez-Toralla, et conclure sur cette définition librement inspirée de l'agriculture raisonnée[80] : "*En s'articulant avec l'ergonomie, la mise en œuvre raisonnée du Lean dans des entreprises de production de biens et de services*

[79] Association régionale pour l'amélioration des conditions de travail en Occitanie

[80] https://fr.wikipedia.org/wiki/Agriculture_raisonnée

devient une démarche qui prend en compte la protection de l'environnement, la santé et le bien-être au travail, en plus de l'amélioration de la performance productive".

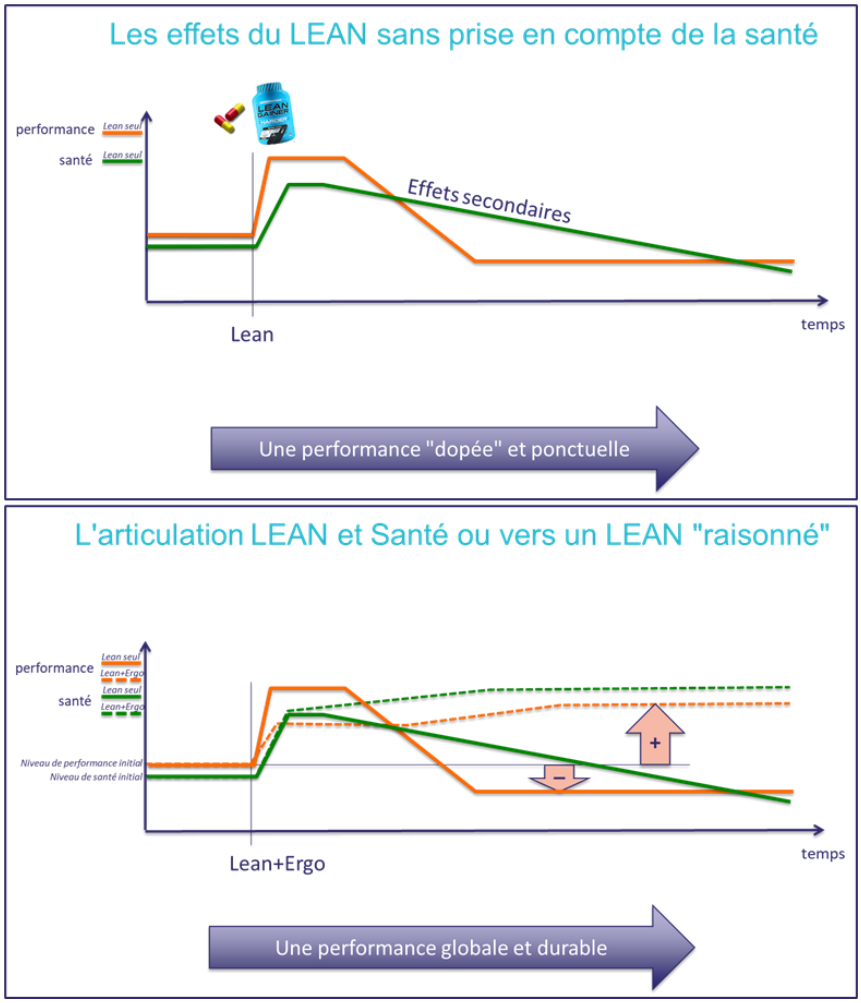


Figure 19. Comparaison entre Lean seul et articulation (Lean + Ergonomie) sur la durabilité de la performance et les effets sur la Santé. Action partenariale DIAPASON (Midact, 2016)

Activité #10 : Mon implication en recherche dans le domaine de la santé est très étroitement liée à ma volonté d'être dans le concret, proche du terrain opérationnel et des problématiques métiers. Pour cette raison, mon travail de recherche est souvent guidé par une démarche inductive, et je trouve souvent mon inspiration initiale grâce à l'observation et à l'analyse de problèmes réels. L'émergence de questions de recherche dans le domaine de la santé s'est donc faite en grande partie sur la base des études menées à partir de 2013 avec des établissements de santé afin de diagnostiquer ou d'améliorer certains processus. Celles qui ont le plus d'impact sur mes travaux ultérieurs de recherche sont les suivantes :

- Étude des flux d'appels téléphoniques au SAMU 81.
- Étude des flux de patients au CHU de Toulouse, plateau de consultations de Purpan.
- Étude des flux de patients au CHU de Toulouse, plateau de consultations de Rangueil.
- Étude des flux logistiques des échantillons vers le laboratoire ANAPATH du CHU Toulouse (site de l'IUC).
- Étude de l'organisation du service de consultation d'écho-cardiographie du CHU de Toulouse.

Activité #11 : Grâce à l'expérience acquise durant le montage et le pilotage de la formation d'ingénieurs par apprentissage à l'école des Mines d'Albi-Carmaux, j'ai été sollicité entre avril 2013 et mars 2014 par Bernard Rigaud, directeur d'ISIS[81] entre 2007 et 2018, pour mener une mission d'expertise et d'accompagnement afin de mettre en place une formation d'ingénieurs par l'apprentissage dans cette école. J'ai ainsi contribué à ce qu'ISIS obtienne l'habilitation de la CTI pour ouvrir cette nouvelle filière qui fonctionne depuis 2014.

Activité #12 : Fin 2018, j'ai été sollicité par Fabrice Baranski, pdg de la jeune start-up LogPickR[82] qui édite le seul logiciel français de Process Mining. Mes activités de recherche dans le domaine de la modélisation de processus m'ont conduit à m'intéresser de plus près à cette technologie récente, d'abord dans le cadre de la thèse de Romain Miclo (#3) durant laquelle nous avons pu rédiger une première publication faisant appel au Process Mining[83], puis avec la thèse de Quentin Schoen (#5) et une publication dans la conférence CIGI 2017[84], et enfin de façon plus approfondie avec la thèse de Sina Namaki-Araghi (#4) avec plusieurs publications à la clé. Après une première tentative infructueuse en 2018 lors du dépôt de la demande de statut de Jeune Entreprise Innovante (JEI) lui permettant de bénéficier d'un allégement d'impôt, Fabrice m'a demandé de l'aider à rédiger la partie scientifique du dossier. J'ai ainsi contribué à ce que LogPickR obtienne le statut de JEI en février 2019.

1.8. Ingénierie de plusieurs plateformes expérimentales pour l'enseignement et la recherche

> *"La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi !".*

Que j'aime cette citation d'Albert Einstein !

J'y adhère pleinement, pas seulement parce qu'il a été un grand savant plein d'humour et de finesse, mais surtout parce que je suis souvent confronté à cette situation qu'il résume si bien dans sa dernière phrase… Et je crois que c'est un peu pour cela que je fais de la recherche.

Mes mains sont le prolongement de mon cerveau et je ne ferais pas de la recherche si je ne pouvais pas concrétiser, toucher, visualiser le monde réel. La simulation, à condition qu'elle soit visuelle et interactive, m'apporte un niveau intermédiaire de perception et de virtualisation du monde réel. Grâce à elle, la frustration que j'ai parfois en menant des travaux pour lesquels je ne suis pas en interaction avec le monde réel, est très nettement atténuée. À condition qu'elle soit appliquée, la recherche que je mène prend tout son sens.

---

[81] École d'ingénieurs en Informatique et Systèmes d'Information pour la Santé, CUFR JF Champollion.

[82] https://www.logpickr.com

[83] Miclo, R., Fontanili, F., Marques, G., Bomert, P., Lauras, M. (2015). RTLS-based Process Mining: Towards an automatic process diagnosis in healthcare. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, Gothenburg, 1397–1402.

[84] Schoen, Q., Fontanili, F., Lauras, M., Truptil, S., Anquetil, A.-G. (2017). Diagnostic de processus automatisé via le Physical Internet : application à la chaîne logistique des produits sanguins. CIGI 2017 - 12ème Congrès International de Génie Industriel. Université de technologie de Compiègne, Compiègne, France, 8 p

1.8.1. Une cellule de fabrication robotisée avec des équipements didactiques : MiniFlex-T

Tout jeune professeur certifié de Génie Mécanique, j'obtiens un poste dans un centre de formation de professeurs de technologie au CFPT de Montlignon que j'occupe entre 1988 et 1992. J'ai la chance d'arriver dans un établissement de formation qui vient de recevoir une dotation importante de machines à commande numérique et de robots. Je m'investis pleinement pour proposer aux futurs professeurs de technologie des formations leur permettant de maîtriser ces moyens techniques que l'on peut trouver dans les collèges ou dans des lycées techniques. C'est aussi l'époque où les premiers ateliers flexibles apparaissent dans l'industrie. Alors, m'inspirant de ce que j'avais vu durant ma formation dans les ateliers et laboratoires de l'ENSET à Cachan (au LURPA en particulier), j'imagine et je réalise un prototype d'une cellule de tournage numérisée pour les cours de technologie au collège intégrant plusieurs composants indépendants : un tour à commande numérique (Toyo), un robot 5 axes (Youpi) et un carrousel de chargement/déchargement des pièces fabriqué sur mesure. Grâce au soutien de son PdG, Jean-Marc Daubard, cette cellule a été présentée sur le stand de la société JD Productique lors du salon Educatec 1991. Elle m'a surtout permis d'illustrer des concepts de commande distribuée et centralisée puisque chacun des composants disposait de sa propre partie commande, avec un "orchestrateur" à événements discrets que j'avais réalisé à partir d'un automate programmable.

1.8.2. Une Ligne Flexible Expérimentale avec des composants industriels : la LFE

Après ma nomination comme PRAG à l'IUT de Cergy-Pontoise en 1996, j'ai eu une nouvelle opportunité de réalisation, à une bien plus grande échelle. Le département OGP dans lequel j'étais en poste venait d'être créé, et une dotation, sous la forme d'un budget d'équipement de plusieurs centaines de milliers de francs, était à la libre disposition de l'équipe pédagogique. J'ai ainsi pu concevoir et réaliser une Ligne Flexible Expérimentale (LFE) à base de convoyeurs à accumulation pour le transfert asynchrone de produits entre 6 postes de travail, manuels ou robotisés. Avec l'aide d'un collègue, Michel Verhaegen, j'ai conçu ce système "pédago-industriel" et assemblé les composants de l'architecture mécanique (la partie opérative), ainsi que de la partie commande : 6 automates programmables Télémécanique TSX-21 connectés sur un réseau local industriel à un ordinateur avec le logiciel de supervision Induscreen[85]. L'investissement était de plus d'1,5 millions de francs à l'époque, soit environ 200 k€. J'ai du mal à imaginer que l'on confierait aujourd'hui un tel budget à un jeune professeur pour réaliser un équipement pédagogique qui n'existe pas… Cette ligne flexible expérimentale, composée exclusivement de composants industriels afin de former les étudiants dans des conditions proches de l'entreprise[86], est toujours utilisée aujourd'hui pour la formation des étudiants du DUT-BUT QLIO[87] (voir Figure 20). Cette ligne a aussi servi à plusieurs formations d'une trentaine d'heures par an que j'ai réalisées entre 1997 et 2004 pour des élèves-ingénieurs de plusieurs écoles : ECAM-EPMI à Cergy-Pontoise (95), ISAE-Supméca anciennement ISMCM-CESTI à Saint-Ouen (93) et l'École des Ponts-Paritech. Entre 1998 et 2003, j'ai aussi été

[85] Toujours édité par la société française Ordinal Software : https://www.ordinal.fr/fr/induscreen.htm

[86] Voir p12-13 du magazine Intersections de Schneider Electric, novembre 1999 (https://www.yumpu.com/fr/document/read/23458748/les-formations-initiales-de-la-transitique-et-de-la-manutention-501-ko

[87] Voir passage entre 1:45 et 2:15 de cette vidéo promotionnelle datant de 2021 sur https://www.facebook.com/iutcergypontoise/videos/visite-virtuelle-du-d%C3%A9partement-qlio-sur-le-site-dargenteuilne-manquez-pas-la-co/137793168103588/

sollicité par Pierre Dejax pour réaliser plusieurs formations sur cette ligne dans le cadre du Mastère spécialisé en Génie Industriel qu'il dirigeait à l'École Centrale de Paris.



Figure 20. Étudiants du département OGP de l'IUT de Cergy-Pontoise en travaux pratiques sur la LFE (Crédit photo : F. Fontanili, 2001)

Ce que je voudrais rappeler et souligner, c'est que cette ligne expérimentale a aussi été le terrain d'application de mes travaux de recherche menés durant la thèse de doctorat entre 1995 et 1999 comme je l'ai présenté dans la section 1.2. J'ai en particulier réalisé plusieurs modèles de simulation de cette ligne, couplés à des algorithmes génétiques, afin de déterminer ses paramètres optimums de pilotage. J'ai pu donc vérifier, valider et confronter à la réalité les résultats fournis par le couplage simulation et optimisation. Je ne voulais pas faire une thèse purement théorique, et grâce à cette ligne que j'avais conçue moi-même, j'ai pu, tel un chimiste à sa paillasse avec ses éprouvettes, réaliser des expérimentations qui m'ont permis d'observer, d'analyser, et d'ajuster mes modèles et algorithmes.

1.8.3. Le projet e-MAC (e-Manufacturing for Advanced Control)

Peu de temps après mon arrivée à l'école des Mines d'Albi-Carmaux, grâce à mon expérience passée à l'IUT, j'ai eu l'occasion de participer à la conception d'une nouvelle ligne de production automatisée dans le cadre du projet e-MAC (e-Manufacturing for Advanced Control). Cette ligne était installée dans les locaux de la plateforme technologique (PFT) du Lycée Rascol à Albi, mais contrôlable et pilotable à distance par un MES (Manufacturing Execution System) que nous avions développé avec l'outil GlobalScreen d'Ordinal Technologies (voir Figure 21 et Figure 22).

J'ai fait une publication présentant cette ligne qui figure dans les actes du congrès IFAC 2008 à Séoul (SK) :

(1) F. Fontanili and T. Van-oudenhove, An Experimental Platform for e-Manufacturing and Advanced Control, 17th IFAC World Congress, 2008. DOI : 10.3182/20080706-5-KR-1001.02309.

Lors de la présentation de cet article, j'avais pu faire une démonstration, depuis Séoul, en lançant et en contrôlant une production sur cette ligne pourtant installée à des milliers de kilomètres.



Figure 21. Ligne de production du projet e-MAC : e-Manufacturing for Advanced Control (Crédit photo : Henri-Claude Gras, 2008)

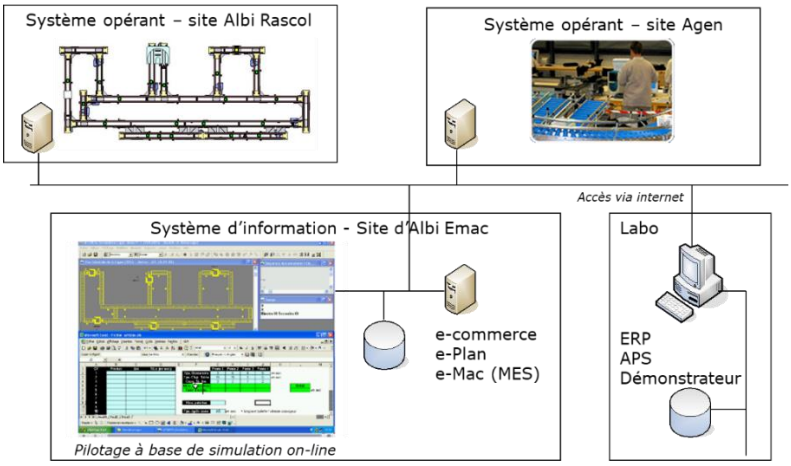


Figure 22. Projet e.MAC réalisé en collaboration avec le lycée Rascol (2006) et présenté lors des journées IODE en mars 2007

Grâce à ce prototype, une dizaine d'années avant l'arrivée d'Industrie 4.0, j'ai tenté de promouvoir l'utilisation d'usines pédagogiques numérisées dans l'enseignement supérieur et la recherche

comme le recommandait le comité d'experts Productique du GdR-MACS en 2007, constitué de Pierre Baptiste, Alain Bernard, Jean-Paul Bourrières, Pierre Lopez, Gérard Morel, Henri Pierreval et Marie-Claude Portmann dans la section 6 du rapport sur les opportunités de développement de plateformes " *…Si une large part de la recherche en Productique s'appuie sur des partenariats industriels ou sur des modèles théoriques, ceci s'avère peu réaliste si la recherche menée doit intégrer, par exemple, des caractéristiques liées à la nature des installations de production, aux produits, au système d'information, à l'ergonomie, ou à l'occurrence de défaillances. Pour prendre en compte les technologies récentes de production (machines, transitique, ERP, MES, RFID), des plates-formes offrant aux chercheurs l'accès à des moyens de production proches de ceux rencontrés (ou qui seront rencontrés) dans l'industrie peuvent favoriser des recherches plus réalistes, plus facilement communicables et démontrables, et plus vite transférables sur sites industriels. Parmi les problématiques concernées par des plates-formes on peut noter celles liées au pilotage d'ateliers ou de chaînes logistiques, aux systèmes intégrés (ERP/APS/MES, réseaux, RFID), à la conception intégrée et au PLM (Product Life Management), à la maintenance et fiabilité, aux nouvelles technologies de production (UGV, micromécanique, etc.)*".

J'ai pu convaincre le directeur du CGI d'alors, Lionel Dupont, de libérer des fonds pour me permettre de développer cette plateforme expérimentale, bien avant l'émergence et la diffusion très large du concept d'Industrie 4.0 que nous vivons aujourd'hui dans l'industrie et la recherche. Je regrette de ne pas avoir réussi à convaincre mes collègues et ma direction de pousser plus loin cette expérimentation, que ce soit en enseignement ou en recherche en génie industriel.

1.9. Production scientifique

Mes premières années au CGI ont été laborieuses en termes de publications pour les raisons que j'ai tenté d'expliquer précédemment, notamment une dispersion sur d'autres activités que la recherche.

En résumé, à ce jour je suis auteur ou co-auteur de :

- 10 articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture (ACL) dont 7 référencés WoS et/ou Scopus
- 54 communications dont 31 communications avec actes dans des congrès internationaux (C-ACTI) référencés WoS et/ou Scopus
- 9 chapitres d'ouvrages scientifiques (OS) dont 5 publiés en anglais.

Les trois figures suivantes présentent les copies d'écran des rapports des publications référencées Scopus[88] (Figure 23), Web of Science[89] (Figure 24), ou Google Scholar (Figure 25).

[88] Requête sur https://www.scopus.com: AU-ID("Fontanili, Franck" 6507954741)

[89] Requête sur Web of Science : https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/98fd6e5a-eb69-4ec8-a41f-8a9a0f059af0-34d59760/relevance/1

Il y a, de toute évidence, un trou conséquent entre 2000 et 2016 dans ma cadence de publications, et je l'assume en arguant les responsabilités collectives que j'ai prises et mon investissement presque total dans la formation durant cette période. Avec un rôle plus récent d'enseignant-chercheur à plein temps, les cinq dernières années montrent une cadence beaucoup plus soutenue dans ma production scientifique.

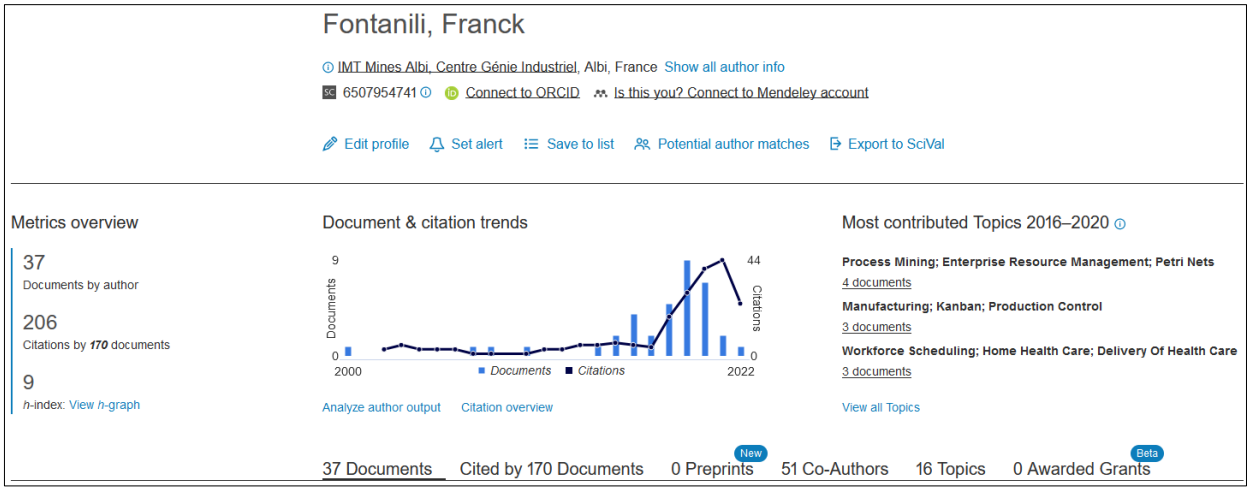


Figure 23. Rapport des publications référencées Scopus

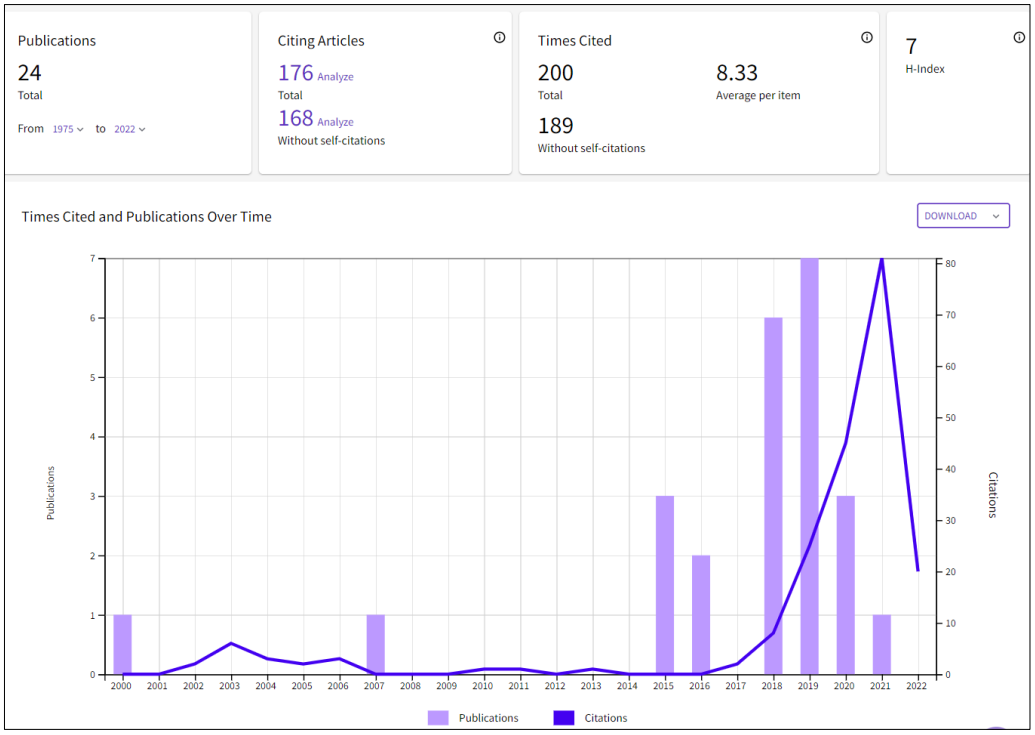


Figure 24. Rapport des publications référencées Web of Science (WoS)

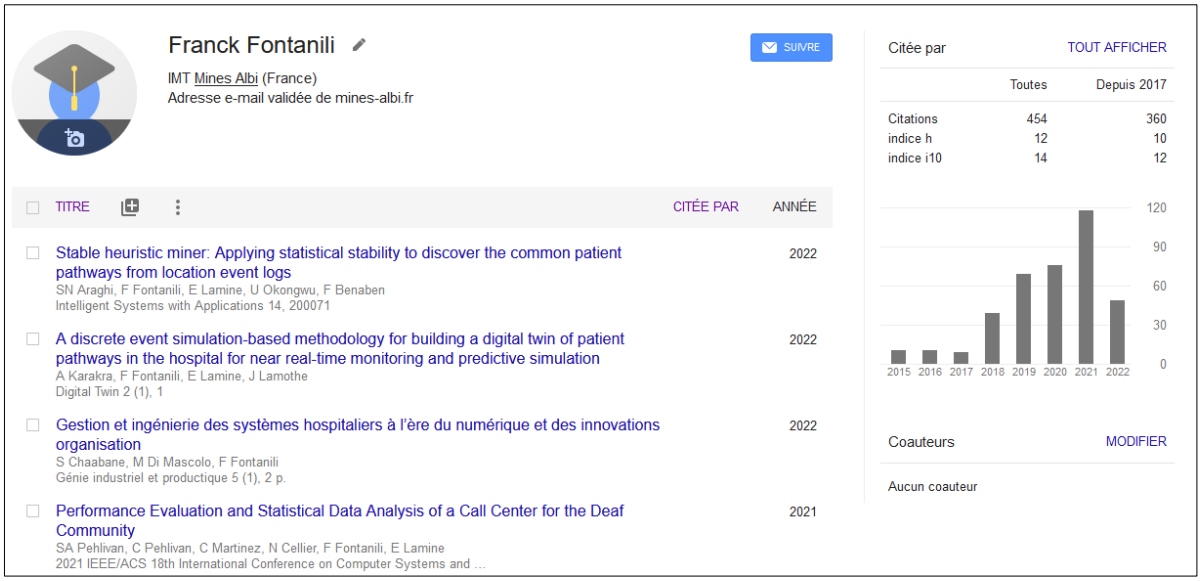


Figure 25. Rapport des publications référencées Google Scholar

1.9.1. Dix articles dans des revues avec comité de lecture (ACL)

J'espère pouvoir revenir sur une moyenne plus significative de mes indicateurs en essayant de rester sur le rythme que j'ai depuis 2018, puisque je suis co-auteur de 6 articles dans des revues internationales indexées WoS et/ou Scopus, soit en moyenne 1 article/an.

1	Namaki Araghi, S., Fontanili, F., Lamine, E., Benaben, F. (2022). Miniscule Movements of Business Processes (Mmp): An Approach to Diagnose Deviations in Patients' Pathways. Rapport, Social Science Research Network, Rochester, NY, , SSRN Scholarly Paper, No. 4074880	
2	Araghi, S.N., Fontanili, F., Lamine, E., Okongwu, U., Benaben, F. (2022). Stable Heuristic Miner: applying statistical stability to discover the common patient pathways from location event logs. Intelligent Systems with Applications, 8 March 2022, DOI 10.1016/j.iswa.2022.200071.	Scopus
3	Karakra A, Fontanili F, Lamine E et al. (2022). A discrete event simulation-based methodology for building a digital twin of patient pathways in the hospital for near real-time monitoring and predictive simulation [version 1; peer review: 1 approved with reservations]. Digital Twin Journal, 2:1 (https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17454.1)	
4	Rifi, L., Fontanili, F., Di Mascolo, M., Martinez, C. (2021). Framework for a retrospective analysis of operating room schedule execution. International Journal of Healthcare Technology and Management, 1, 1. DOI: 10.1504/IJHTM.2021.10042376	Scopus - WoS
5	Petitdemange, E., Fontanili, F., Lamine, E., Lauras, M., Okongwu, U. (2020). A Tool-Based Framework to Assess and Challenge the Responsiveness of Emergency Call Centers. Ieee Transactions on Engineering Management, 67(3), 568–581.	Scopus - WoS
6	Lamine, E., Thabet, R., Sienou, A., Bork, D., Fontanili, F., Pingaud, H. (2020). BPRIM: An integrated framework for business process management and risk management. Computers in Industry, 117, 103199.	Scopus - WoS
7	Miclo, R., Lauras, M., Fontanili, F., Lamothe, J., Melnyk, S.A. (2019). Demand Driven MRP: assessment of a new approach to materials management. International Journal of Production Research, 57(1), 166–181.	ScopuS - WoS
8	Schoen, Q., Sanchis, R., Poler, R., Lauras, M., Fontanili, F., Truptil, S. (2018). Categorisation of the Main Disruptive Events in the Sensitive Products Transportation Supply Chains. International Journal of Production Management and Engineering, 6(2), 79–89.	Scopus - WoS
9	Fontanili, F., Vincent, A., Ponsonnet, R. (2000). Flow simulation and genetic algorithm as optimization tools. International Journal of Production Economics, 64(1–3), 91–100.	Scopus - Wos
10	Fontanili, F., Vincent, A. (1997). Comment optimiser le fonctionnement d'un atelier avec la simulation de flux ? Revue Française de Gestion Industrielle, 16(3), 29–46.	

Par ailleurs, deux articles ont été récemment soumis dans des revues ACL WoS et sont en attente du rapport des reviewers :

- 1 article soumis par Liwen Zhang en décembre 2021 dans la revue Health Systems (WoS) : "Novel OptaPlanner-Oriented CSP Model Considers the Satisfaction of All Stakeholders in Home Health Care Coordination".
- 1 article soumis par Abdallah Karakra en mars 2022 dans la revue Health Care Management Science (WoS) : "A Novel Application of Discrete Event Simulation as a Digital Twin for Monitoring Patient Pathways in a Hospital in Real Time".

1.9.2. Neuf chapitres d'ouvrages (OS)

J'ai participé à la rédaction de neuf chapitres d'ouvrage, dont quatre en tant qu'auteur principal.

1	Fontanili, F., Di Mascolo, M. (2022). Impact des systèmes cyber-physiques sur le système de santé. Chapitre 16 de l'ouvrage Digitalisation et contrôle des systèmes industriels cyber-physiques, coordonné par O. Cardin, W. Derigent, D. Trentesaux. Version anglaise : ISBN 9-781-78945-085-9. Cardin, O., Derigent, W. and Trensaux, D. (eds) (2022).	ISTE Ltd, John Wiley & Sons
2	Fontanili, F., Di Mascolo, M. (2022). Impact of Industrial Cyber-Physical Systems on the Health System, ISBN 9-781-78945-085-9. Cardin, O., Derigent, W. and Trensaux, D. (eds) (2022). Digitalization and Control of Industrial Cyber-Physical Systems	ISTE Ltd, John Wiley & Sons
3	Rifi., L., Fontanili, F., Jeanney, M. (2022). Démarche outillée d'analyse du déroulement du programme au bloc opératoire : application à la régulation. Chapitre 12 de l'ouvrage "Ingénierie de la santé", coordinateurs : S. Chaabane, E. Cousein et P. Wieser.	ISTE Editions
4	Rifi., L., Fontanili, F., Jeanney, M. (2022). Tool-based Approach to Analyze Operating Room Schedule Execution: Application to Online Management.	ISTE Editions
5	Maria Di Mascolo, Sondes Chaabane, and Franck Fontanili (2022). Editorial - Gestion et ingénierie des systèmes hospitaliers à l'ère du numérique et des innovations organisationnelles. Génie industriel et productique, 5 (Numéro spécial Gestion et ingénierie des systèmes hospitaliers).	ISTE OpenScience
6	Lamine, E., Guédria, W., Rius Soler, A., Ayza Graells, J., Fontanili, F., Janer-García, L., Pingaud, H. (2017). An Inventory of Interoperability in Healthcare Ecosystems: Characterization and Challenges. Dans Enterprise Interoperability. 167–198.	John Wiley & Sons, Ltd
7	Miclo, R., Lauras, M., Fontanili, F., Lamothe, J., Bornert, P., Revenu, G. (2014). Enhancing Collaborations by Assessing the Expected Financial Benefits of Improvement Projects. Dans Proceedings of the I-ESA Conferences. 189–200.	Springer Professional
8	Fontanili, F., Castagna, P., Yannou, B. (2008). Les outils de simulation. Extrait de: La simulation pour la gestion des chaînes logistiques (chap. 10)/sous la dir. de C. THIERRY, A. THOMAS et G. BEL, Hermes-Lavoisier, p. 339-382, 978-2-7462-1843-7.⟨ hal-01730576⟩	Hermes - Lavoisier
9	Fontanili, F., Castagna, P., Yannou, B. (2008). Software tools for simulation. Extrait de: Simulation for supply chain management (chap. 10)/sous la dir. de C. THIERRY, A. THOMAS et G. BEL, John Wiley; ISTE, p. 295-337, 2008, 978-1-84821-090-5.⟨ hal-01729260⟩	John Wiley; ISTE

1.9.3. Plus de trente communications avec actes dans des congrès internationaux (C-ACTI)

Ces communications sont référencées Scopus et/ou WoS :

1	Pehlivan, S.A., Pehlivan, C., Martinez, C., Cellier, N., Fontanili, F., Lamine, E. (2021). Performance Evaluation and Statistical Data Analysis of a Call Center for the Deaf Community. Dans 2021 IEEE/ACS 18th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA). 2021 IEEE/ACS 18th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA). 1–6.
2	Zhang, L., Fontanili, F., Lamine, E., Bortolaso, C., Derras, M., Pingaud, H. (2021). Stakeholders' Tolerance-based Linear Model for Home Health Care Coordination. IFAC-PapersOnLine, 54(1), 269–275.
3	Zhang, L., Lamine, E., Fontanili, F., Bortolaso, C., Sargent, M., Derras, M., Pingaud, H. (2020). BLPAD.Core: A Multi-Functions Optimizer towards Daily Planning Generation in Home Health Care. Dans Proceedings of

	IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA. Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA.
4	Petitdemange, E., Lamine, E., Fontanili, F., Lauras, M. (2020). Enhancing Emergency Call Centers' Performance Through a Data-driven Simulation Approach. Proceedings of the 17th ISCRAM Conference – Blacksburg, VA, US2020, 218-227.
5	Karakra, A., Lamine, E., Fontanili, F., Lamothe, J. (2020). HospiT'Win: A digital twin framework for patients' pathways real-time monitoring and hospital organizational resilience capacity enhancement. Dans 9th International Workshop on Innovative Simulation for Health Care, IWISH 2020. 9th International Workshop on Innovative Simulation for Health Care, IWISH 2020. 62–71.
6	Zhang, L., Fontanili, F., Lamine, E., Bortolaso, C., Derras, M., Pingaud, H. (2020). A systematic model to model transformation for knowledge-based planning generation problems. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 12144 LNAI, 140–152.
7	Araghi, S.N., Fontanili, F., Lamine, E., Salatge, N., Benaben, F. (2020). Interpretation of Patients' Location Data to Support the Application of Process Mining Notations Proceedings of the 13th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies. Cabitza, F., A. Fred, and H. Gamboa (eds.)
8	López, E.C., Marmier, F., Fontanili, F. (2019). Bus Fleet Size Dimensioning In an International Airport Using Discrete Event Simulation. Dans 2019 Winter Simulation Conference (WSC). 2019 Winter Simulation Conference (WSC). 464–475.
9	Zhang, L., Lamine, E., Fontanili, F., Bortolaso, C., Derras, M., Pingaud, H. (2019). A decision-making support system for operational coordination of Home Health Care services. Dans 2019 Ieee/Acs 16th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA 2019).
10	Zhang, L., Bouchet, P.-Y., Lamine, E., Fontanili, F., Bortolaso, C., Derras, M., Pingaud, H. (2019). Home Health Care Daily Planning Considering the Satisfaction of all the Stakeholders. Dans Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM 2019.
11	Schoen, Q., Fontanili, F., Lauras, M., Truptil, S. (2019). Improving parcels transportation performance by introducing a hitchhiker parcel model 2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (iciea).
12	Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., Lamothe, J. (2019). HospiT'Win: A Predictive Simulation-Based Digital Twin for Patients Pathways in Hospital 2019 Ieee Embs International Conference on Biomedical & Health Informatics (bhi).
13	Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., Lamothe, J., Taweel, A. (2019). Pervasive Computing Integrated Discrete Event Simulation for a Hospital Digital Twin. Dans Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA.
14	Araghi, S.N., Fontanili, F., Lamine, E., Salatge, N., Lesbegueries, J., Pouyade, S.R., Benaben, F. (2019). Evaluating the process capability ratio of patients' pathways by the application of process mining, SPC and RTLS. BIOSTEC 2019. HEALTHINF . 302–309.
15	Petitdemange, E., Fontanili, F., Lamine, E., Lauras, M. (2018). Skill-based routing problem in emergency call centers: Toward an improvement of response time. 7th International Workshop on Innovative Simulation for Health Care, IWISH 2018. 43–51.
16	Schoen, Q., Truptil, S., Lauras, M., Fontanili, F., Conges, A. (2018). A New Approach for Supply Chain Management Monitoring Systems Adapted to Crisis. Dans Collaborative Networks of Cognitive Systems. CamarinhaMatos, L. M., H. Afsarmanesh, and Y. Rezgui (eds.) 512–523.
17	Araghi, S.N., Fontanili, F., Lamine, E., Tancerel, L., Benaben, F. (2018). Monitoring and analyzing patients' pathways by the application of Process Mining, SPC, and I-RTLS. IFAC-PapersOnline, 51(11), 980–985.
18	Araghi, S.N., Fontanili, F., Lamine, E., Tancerel, L., Benaben, F. (2018). Applying process mining and rtls for modeling, and analyzing patients' pathways. BIOSTEC 2018. HEALTHINF 2018. 540–547.
19	Araghi, S.N., Fontaili, F., Lamine, E., Salatge, N., Lesbegueries, J., Pouyade, S.R., Tancerel, L., Benaben, F. (2018). A Conceptual Framework to Support Discovering of Patients' Pathways as Operational Process Charts. 2018 IEEE/ACS 15th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA). 1–6.
20	Schoen, Q., Truptil, S., Lauras, M., Fontanili, F., Conges, A. (2018). A New Approach for Supply Chain Management Monitoring Systems Adapted to Crisis. Dans Collaborative Networks of Cognitive Systems. CamarinhaMatos, L. M., H. Afsarmanesh, and Y. Rezgui (eds.) 512–523.
21	Schoen, Q., Pinon-Baca, D., Lauras, M., Fontanili, F., Truptil, S. (2018). A new transport management system design considering the upcoming logistics environment and the sensitive products supply chains. Information Systems, Logistics and Supply Chain, Proceedings. ILS 2018. 286–295.
22	Schoen, Q., Truptil, S., Fontanili, F., Lauras, M., Anquetil, A.-G. (2017). Tracking in real time the blood products transportations to make good decisions. Proceedings of the International ISCRAM Conference. 173–180.
23	Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., Milian, B. (2015). MRP vs. Demand-Driven MRP: Towards an Objective Comparison International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (iesm). Framinan, J. M., P. P. Gonzalez, and A. Artiba (eds.)
24	Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., Milian, B. (2016). An empirical comparison of MRPII and Demand-Driven MRP. IFAC-PapersOnline, 49(12), 1725–1730.

25	Schoen, Q., Lauras, M., Truptil, S., Fontanili, F., Anquetil, A.-G. (2016). Towards a Hyperconnected Transportation Management System: Application to Blood Logistics. Dans Collaboration in a Hyperconnected World. Afsarmanesh, H., L. M. CamarinhaMatos, and A. L. Soares (eds.) 3–12.
26	Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., Milian, B. (2016). An empirical study of demand-driven MRP. Dans ILS 2016 - 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain.
27	Miclo, R., Fontanili, F., Marques, G., Bomert, P., Lauras, M. (2015). RTLS-based Process Mining: Towards an automatic process diagnosis in healthcare. 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, Gothenburg, 1397–1402.
28	Lamine, E., Fontanili, F., Di Mascolo, M., Pingaud, H. (2015). Improving the Management of an Emergency Call Service by Combining Process Mining and Discrete Event Simulation Approaches. Dans Risks and Resilience of Collaborative Networks. CamarinhaMatos, L. M., F. Benaben, and W. Picard (eds.) 535–546.
29	Falcon, M., Fontanili, F. (2010). Process modelling of industrialized thermal renovation of apartment buildings. Dans eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction - Proceedings of the European Conference on Product and Process Modelling 2010. 363–368.
30	Fontanili, F., Van Oudenhove, T. (2008). An experimental platform for e-manufacturing and advanced control. Dans IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline).
31	Mirdamadi, S., Fontanili, F., Dupont, L. (2007). Discrete event simulation-based real-time shop floor control Zelinka, I., Z. Oplatkova, and A. Orsoni (eds.) 21st European Conference on Modelling and Simulation Ecms 2007: Simulations in United Europe.

Autres communications dans des conférences internationales avec actes :

1	Namaki Araghi, S., Fontanili, F., Lamine, E., Benaben, F. (2017). An automatized data extraction approach for process mining and business process analysis. 20th World congress of the International Federation of Automatic Control. IFAC (ed.) 20th IFAC World Congress. IFAC, Toulouse, France, p.9580-9584.
2	Schoen, Q., Fontanili, F., Truptil, S., Lauras, M., Anquetil, A.-G. (2017). Improving the labile blood products transportation processes using physical Internet, complex event processing and process mining. 20th World congress of the International Federation of Automatic Control. IFAC (ed.) IFAC, Toulouse, France, p.7232-7236.
3	Coulama, M., Wang, L., Fontanili, F. (2017). Cluster of demand for a Chinese logistics company using K-Mean and genetic algorithm. 20th World congress of the International Federation of Automatic Control. IFAC (ed.), Toulouse, France, p.9575-9579.
4	Schoen, Q., Truptil, S., Fontanili, F., Lauras, M., Anquetil, A.-G. (2017). Tracking in real time the blood products transportations to make good decisions. Dans Proceedings of the International ISCRAM Conference. Proceedings of the International ISCRAM Conference. 173–180.
5	Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., Milian, B. (2016). An empirical study of demand-driven MRP. Dans ILS 2016 - 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain.
6	Fontanili, F., Lauras, M., Lamine, E. (2013). Ensuring the overall performance of a new hospital facility through discrete event simulation. Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World. 3920-3920
7	Fontanili, F. (2007). Discrete events simulation and genetic algorithm-based manufacturing execution. Dans IMSM 2007, International Modeling and Simulation Multiconference. IMSM 2007, International Modeling and Simulation Multiconference. Buenos Aires, Argentine.
8	Fontanili, F., Vincent, A., Soriano, T., Ponsonnet, R. A ring-shaped mechanical assembly line optimized by a genetic algorithm. Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering'98. Springer. 431-438

1.9.4. Quatorze communications dans des conférences francophones avec actes (C-ACTN)

1	Zhang, L., Pingaud, H., Lamine, E., Fontanili, F., Bortolaso, C., Derras, M. (2021). Etude prospective d'un environnement d'aide à la decision rendu configurable par des modèles. Dans CIGI-Qualita21 : 14ème Conférence Internationale Génie Industriel QUALITA. Grenoble (à distance), France, 93–101.
2	Rifi, L., Fontanili, F., Jeanney, M. (2020). Proposition d'une démarche outillée d'analyse rétrospective du déroulement du programme au bloc opératoire : application à la régulation. GISEH 2020, 10ième Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des SystEmes Hospitaliers. Valenciennes, France.
3	Schoen, Q., Lauras, M., Fontanili, F., Truptil, S., Machado-Alves, A. (2018). L'indispensable évolution des "transport management system" pour le pilotage des flux de produits sensibles. MOSIM'18 - ISAE and IMT Mines Albi, Toulouse, France, 8 p.
4	Zhang, L., Fontanili, F., Lamine, E., Pingaud, H., Bortolaso, C., Derras, M. (2018). Une approche systémique de caractérisation des connaissances sur la coordination opérationnelle d'une prise en charge à domicile. GISEH 2018, Genève, Suisse, 9.

5	Petitdemange, E., Fontanili, F., Lamine, E., Lauras, M. (2018). Centres d'appel d'urgence français (SAMU) : une démarche dirigée par les modèles pour l'examen de leur fonctionnement. MOSIM'18 - 12ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation. ISAE and IMT Mines Albi, Toulouse, France, 8 p.
6	Schoen, Q., Fontanili, F., Lauras, M., Truptil, S., Anquetil, A.-G. (2017). Diagnostic de processus automatisé via le Physical Internet : application à la chaîne logistique des produits sanguins. CIGI 2017 - 12ème Congrès International de Génie Industriel. Université de technologie de Compiègne, Compiègne, France, 8 p.
7	Gholizadeh Tayyar, S., Falcon, M., Fontanili, F., Dupont, L., Lamothe, J., Thuillier, A. (2014). Scheduling model for a building renovation project with re-add and storage of resource types under supplier limited production capacity. MOSIM 2014. Nancy, France.
8	Lamine, E., Fontanili, F. (2010). Modélisation et simulation des appels téléphoniques d'un service d'aide médicale d'urgence (SAMU 81). 8ème Conférence Internationale de MOdélisation et SIMulation. MOSIM 2010, Hammamet, Tunisie.
9	Mirdamadi, S., Autefage, R., Fontanili, F., Dupont, L. (2008). Complémentarité des approches analytique et simulatoire pour le dimensionnement d'un atelier manufacturier. MOSIM'08 -7ème Conférence internationale de Modélisation et Simulation. TEC & DOC -LAVOISIER, Paris, France, p.1337-1346.
10	Mirdamadi, S., Dupont, L., Fontanili, F. (2007). Pilotage d'un atelier de production en temps réel à base de simulation de flux à événements discrets. 7ème Congrès international de génie industriel, 2007. Unversité du Québec à Trois Rivières.
11	Fontanili, F., Lamothe, J., Dupuy, M., Nexon, C. (2006). Étude dynamique de l'ordonnancement d'un laboratoire de contrôle qualité pharmaceutique. MOSIM 06, 6e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation. Rabat (Maroc).
12	Fontanili, F., Baillon, F., Lamothe, J. (2005). Une expérience d'intégration des nouvelles technologies éducatives par les élèves ingénieurs dans le cadre de travaux de veille documentaire. 3ème Colloque" Questions de pédagogie dans l'enseignement supérieur". p. 44-47. Ecole Centrale de Lille.
13	Aldanondo, M., Paris, JL., Fontanili, F., Hadj-Hamou, K., Pierreval, H. (2004). Vers une intégration du produit, des modes opératoires et du système de production: une approche combinant la configuration sous contraintes et la configuration via simulation. Actes de la 5ème conférence francophone de MOdélisation et de SIMulation.
14	Aldanondo, M., Paris, JL., Fontanili, F., Hadj-Hamou, K., Pierreval, H. (2004). Prospective d'une utilisation conjointe de la configuration sous contraintes et de la configuration via simulation pour optimiser la diversité en production. MOSIM 2004-5ème Conférence francophone de modélisation et simulation. P 115-122.

1.10. Interactions avec l'environnement scientifique, social et économique

1.10.1. Participation à des comités scientifiques et actions de vulgarisation scientifique

J'ai participé à une vingtaine de comités scientifiques et actions de vulgarisation pour des conférences ou des manifestions nationales ou internationales.

1	Membre du comité scientifique GOL 2022 (Strasbourg)
2	Intervention à la journée annuelle du SAMU et des Urgences de France, Paris 14/12/2021, https://www.youtube.com/watch?v=xVbw0EYL58A
3	Intervention au workshop de la NAFEMS sur le jumeau numérique, Paris 09/12/2021, https://www.nafems.org/publications/resource_center/s_dec_21_france_1/
4	Co-coordinateur avec Sondes Chaabane et Maria Di Mascolo du numéro spécial sur "Gestion et Ingénierie des systèmes hospitaliers" paru dans le vol. 22-5 de la revue en ligne OpenScience "Génie Industriel et Productique" en 2021
5	Membre du comité scientifique MOSIM' 2018 (Toulouse)
6	Membre du comité scientifique ISCRAM 2017 (Albi)
7	Lauréat "coup de cœur" de l'appel à manifestation d'intérêt (AMI) Hôpital Numérique du Futur AP-HP CHU de Nantes en 2017. https://www.youtube.com/watch?v=0ueKlFb08_U
8	Membre du comité scientifique Pro'VE 2016 (Albi)
9	Intervention à la conférence des utilisateurs francophones de Witness : La Value Stream Mapping (VSM) associée à Witness pour le diagnostic et l'amélioration de processus. Paris, mars 2016
10	Invitation à présenter le "Lean Hospital" au congrès de la Fédération Hospitalière de France (FHF) à Toulouse en octobre 2012
11	Intervention au congrès de la Société Française des Sciences et Techniques Pharmaceutiques (SFSTP) : De la modélisation à la simulation de processus : application à un processus logistique de préparation de commandes, Toulouse, mai 2011

12	Intervention à la conférence des utilisateurs francophones de Witness : Optimisation des flux d'appels d'un SAMU. Paris, novembre 2011
13	Intervention à la conférence des utilisateurs francophones de Witness, en collaboration avec Vincent Pomponne, Directeur du Centre d'Expertise Industriel et Logistique de Pierre Fabre SA : Modélisation et simulation du centre de distribution de Pierre Fabre, site de Muret. Paris, octobre 2009
14	Auteur du chapitre 9 de l'ouvrage WEKA "Comment optimiser et piloter un système logistique par la simulation de flux ?", éditions Weka, 2009.
15	Intervention à la Czech Witness Conference : Integration of Witness with an MES to control a workshop in real-time. Prague (CZ), juin 2008
16	Intervention à la Lanner Users Conference : Integration of Witness with an MES to control a workshop in real-time. Birmingham (UK), février 2008
17	Intervention à la conférence des utilisateurs francophones de Witness : Intégration de Witness avec un MES pour piloter un atelier en temps réel. Paris, octobre 2007
18	Intervention (formation) à l'école d'été JDMACS de Reims les 11 et 12 juillet 2007 : Aperçu des possibilités de couplage d'un outil de simulation de flux : Witness
19	Intervention dans le GDR VENDOME : Les outils de simulation pour la logistique et la supply chain. Paris, décembre 2006
20	Intervention au congrès de la Société Française des Sciences et Techniques Pharmaceutiques (SFSTP) : La Simulation de Flux : un outil d'aide à la décision. Toulouse, novembre 2004

1.10.2. Relations internationales

J'ai participé au montage de trois projets H2020 ou Horizon Europe avec parfois plus d'une vingtaine de partenaires européens :

1	En 2020 : ARCH (porteur principal Philips Healthcare ND, 19 partenaires européens) dans le call AI for Smart Hospital. Projet non retenu (score 11,5/15).
2	En 2020 : SAHARA (porteur principal Université de Stuttgart, 18 partenaires européens) dans le call Coronavirus - Behavioural, social and economic impacts of the outbreak response. Projet non retenu (score 13,5/15).
3	En 2021 : AEROSOL (porteur principal Université de Stuttgart, 28 partenaires européens) dans le call Research infrastructure services for rapid research responses to COVID-19 and other infectious disease epidemics. Projet non retenu (score 8,5/15).

J'ai aussi établi un partenariat (Memorandum of Understanding) mis en place en 2021 avec l'Université de Birzeith (Palestine) et avec l'équipe de recherche du professeur Adel Taweel. Cette collaboration a été menée dans le cadre de la thèse d'Abdallah Karakra et elle a permis de concrétiser un séjour de 4 mois (janvier à avril 2021) réalisé par le doctorant dans le laboratoire du Pr. Adel Taweel. Le Pr. Adel Taweel a ensuite été membre du jury de la thèse d'Abdallak Karakra, soutenue en octobre 2021. D'autres collaborations sont envisagées avec l'Université de Birzeit puisque Abdallah Karakra est recruté comme associate professor depuis février 2022. En particulier, une collaboration tripartite est en cours de préparation avec l'Université de Birzeit, l'équipe du Pr. Bernard P. Ziegler de l'Université d'Arizona (Arizona Center for Integrative Modeling and Simulation) et l'axe IOS de IMT Mines Albi dans la suite des travaux de thèse d'Abdalah Karakra.

Pour terminer, j'ai collaboré avec le Dr. Canan Pehlivan, associate professor à l'Université Yeditepe d'Istambul (Turquie), Industrial Engineering Department, à l'encadrement d'un stage de mastère et la rédaction d'un article pour la conférence AICCSA'21, Tanger (Maroc) :

(1) Pehlivan, S.A., Pehlivan, C., Martinez, C., Cellier, N., Fontanili, F., Lamine, E. (2021). Performance Evaluation and Statistical Data Analysis of a Call Center for the Deaf Community. Dans 2021 IEEE/ACS 18th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA). 2021 IEEE/ACS 18th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA). 1–6.

1.10.3. Montage et coordination de projets avec des partenaires économiques

Je rapporte ici uniquement les projets dans lesquels je suis impliqué en interaction avec des acteurs du monde de la santé (industriels ou établissements de santé).

Je coordonne actuellement quatre projets financés :

1	Coordinateur scientifique et ressource du projet PREPS (financé par la DGOS) CallSAMU en collaboration avec les SAMU de la Région Pays de la Loire (Coordination générale assurée par le CHU de Nantes) entre 2020 et 2022 (en cours) à la suite de la thèse d'Eva Petitdemange (voir section 1.4.3)
2	Coordinateur et ressource principale du projet HospiT'Win (financé par la DGOS) entre 2020 et 2022 avec le GHT Aude Pyrénées (en cours) à la suite de l'AMI "Hôpital numérique du futur" et de la thèse d'Abdallah Karakra (voir section 1.4.5)
3	Coordinateur du projet BL-Sim avec Berger-Levrault entre 2022 et 2025 (en cours) à la suite de la thèse de Liwen Zhang (voir section 1.4.4)
4	Responsable scientifique et coordinateur du projet ACDC en collaboration avec la société Ivès-Elioz (financement par le dispositif Graine de la Région Occitanie entre 2021 et 2024 (en lien avec la thèse de Samer Alsamadi, voir section 1.4.7)

Autres projets financés ou montage d'appels à projet :

1	Coordination et participation à plusieurs projets avec le CHU Toulouse (plusieurs contrats directs pour formation IOS + études consultations PPR Purpan, Rangueil, logistique ANAPATH) entre 2013 et 2018
2	Coordination et participation au projet BL-PAD financé par la société Berger-Levrault en 2016
3	Coordination et ressource principale d'un projet avec la société Elioz Toulouse (contrat direct) en 2018-2019
4	Coordinateur du projet Logipharma (financé par la DGOS) en 2020
5	Plusieurs participations/coordination de montage de dossiers pour des AAP ANR (aucun financé)
6	Participation/coordination d'un AAP du fonds FHF sur innovation organisationnelle en collaboration avec le CH Albi (non financé)
7	Deux participations/coordination de montage de dossiers pour des AAP FUI (aucun financé)

Je pilote plusieurs partenariats formalisés par des conventions signées avec des institutionnels et des industriels.

1	Convention cadre avec le CHU de Toulouse depuis 2015
2	Convention de laboratoire commun avec la société Ivès-Elioz (2021-2023)
3	Convention de partenariat dans le cadre du Plan de Relance avec la société Berger-Levrault (2022-2025)

Partie 2

Perspectives scientifiques et projet de recherche

Perspectives scientifiques et projet de recherche

2.1. Introduction

Les quatre thématiques phares que je souhaite adresser dans un futur proche apparaissent dans mes perspectives scientifiques et dans mon projet de recherche, en se combinant les unes avec les autres :

- La modélisation des parcours patients,
- La conception de double numérique des parcours patients à l'hôpital,
- Le diagnostic organisationnel centré sur les flux de patients,
- L'aide au pilotage de flux prédictif en temps réel.

Dans cette partie, je vais commencer par présenter le système de santé, et de façon un peu plus détaillée, la production de soins à l'hôpital qui constitue l'espace de problèmes sur lequel je souhaite focaliser mes travaux.

J'aborderai ensuite la transition numérique en santé en développant ce qui constitue les deux clés de mon projet scientifique : les systèmes cyber-physiques (CPS) et les doubles numériques utilisés en santé. Je détaillerai plus particulièrement l'apport de ces paradigmes appliqués au diagnostic organisationnel et au pilotage prédictif des parcours patient en temps réel.

> Ayant déjà travaillé sur le diagnostic organisationnel, **c'est sur le pilotage des parcours patient que j'aimerais bâtir mon projet de recherche**. Pour cela, je vais développer une vision selon laquelle un CPS à base de doubles numériques pourrait compléter le potentiel d'un centre de commande hospitalier en apportant notamment une dimension prédictive au pilotage des flux de patient afin d'exploiter intelligemment les informations sur le passé, sur l'état courant, et aussi sur l'état du système dans un futur proche (quelques heures).

2.2. Un espace de problèmes délimité par la production de soins à l'hôpital

2.2.1. Le système de santé et la production de soins

Par "*système de santé*", on entend l'ensemble des organisations, des institutions, des ressources et des personnes dont l'objectif principal est d'identifier et de satisfaire les besoins de la population en matière de santé[90].

Trois grandes classes d'acteurs constituent le système de santé français :

1. Les producteurs de soins.
2. Les institutions chargées de l'organisation administrative et financière.
3. La population en tant qu'utilisatrice.

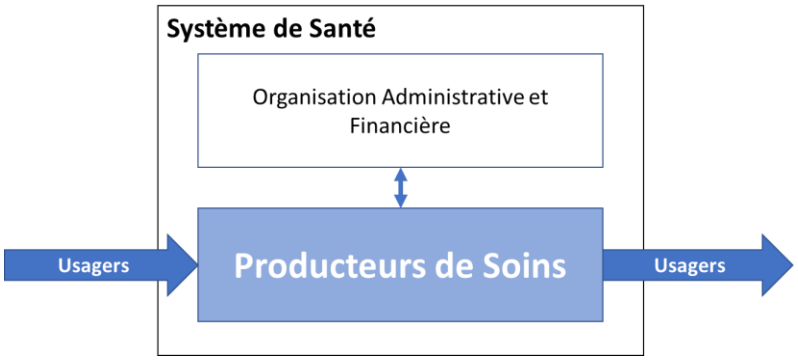


Figure 26. Les interconnexions entre les trois classes d'acteurs du système de santé

L'organisation administrative et financière étant en dehors de mon champ de recherche, l'espace de problèmes sur lequel je souhaite développer mon projet est mis en évidence sur la Figure 26 et concerne essentiellement la production de soins, au service de la population ou des usagers.

En France, la production de soins se déroule dans de multiples structures assurant une prise en charge sanitaire, médico-sociale, et sociale :

- Plus de 3 000 établissements hospitaliers, publics et privés, qui délivrent des soins généraux dits MCO (Médecine, Chirurgie, Obstétrique), et/ou spécialisés à près de 13 millions de patients chaque année. En plus de l'hospitalisation complète avec un hébergement traditionnel sur plusieurs jours, ces établissements développent de plus en plus la chirurgie ambulatoire (56% des interventions en 2019), avec une hospitalisation de jour et un retour au domicile dans la journée de l'intervention[91]. Dans chaque département, au moins un établissement public est en charge de la médecine d'urgence avec un service d'accueil des urgences (SAU), un service d'aide médicale d'urgence (SAMU) et un service mobile d'urgence et de réanimation (SMUR).

[90] OMS : https://www.who.int/healthsystems/about/fr/
[91] ATIH Santé, Hospitalisation Chiffres clés 2019, https://www.atih.sante.fr/chiffres-cles-de-l-hospitalisation

- Plus de 35 000 cabinets libéraux, des maisons ou centres de santé regroupant plusieurs professionnels, sous la forme de structures de ville, dites ambulatoires (à ne pas confondre avec la chirurgie ambulatoire évoquée plus haut),
- Plus de 10 000 établissements médico-sociaux, regroupant notamment les EHPAD[92], destinés à l'accompagnement et à la prise en charge des personnes dites fragiles, en situation de précarité, d'exclusion, de handicap ou de dépendance.
- Des réseaux de soins et d'hospitalisation à domicile (SSIAD, HAD, etc.),
- Des structures d'accueil ou de prévention (consultations anti-douleur, maisons départementales pour personnes handicapées, centres de protection maternelle et infantile, médecine scolaire, service de santé au travail, etc.).

Les industries pharmaceutiques, les pharmacies, et les laboratoires d'analyses font aussi partie de cet ensemble complexe et pas forcément très lisible pour l'usager, surtout quand la prise en charge de ce dernier nécessite de faire appel à plusieurs structures ou plusieurs professionnels à l'occasion d'un ou plusieurs séjours. En particulier, la coordination ville-hôpital entre le médecin traitant (ou référent), les spécialistes, et les hôpitaux publics est loin d'être satisfaisante, que ce soit pour les professionnels, qui la jugent insatisfaisante à 70%, ou pour les usagers (44% d'insatisfaits) comme le montre les résultats du sondage Odoxa paru en septembre 2017[93].

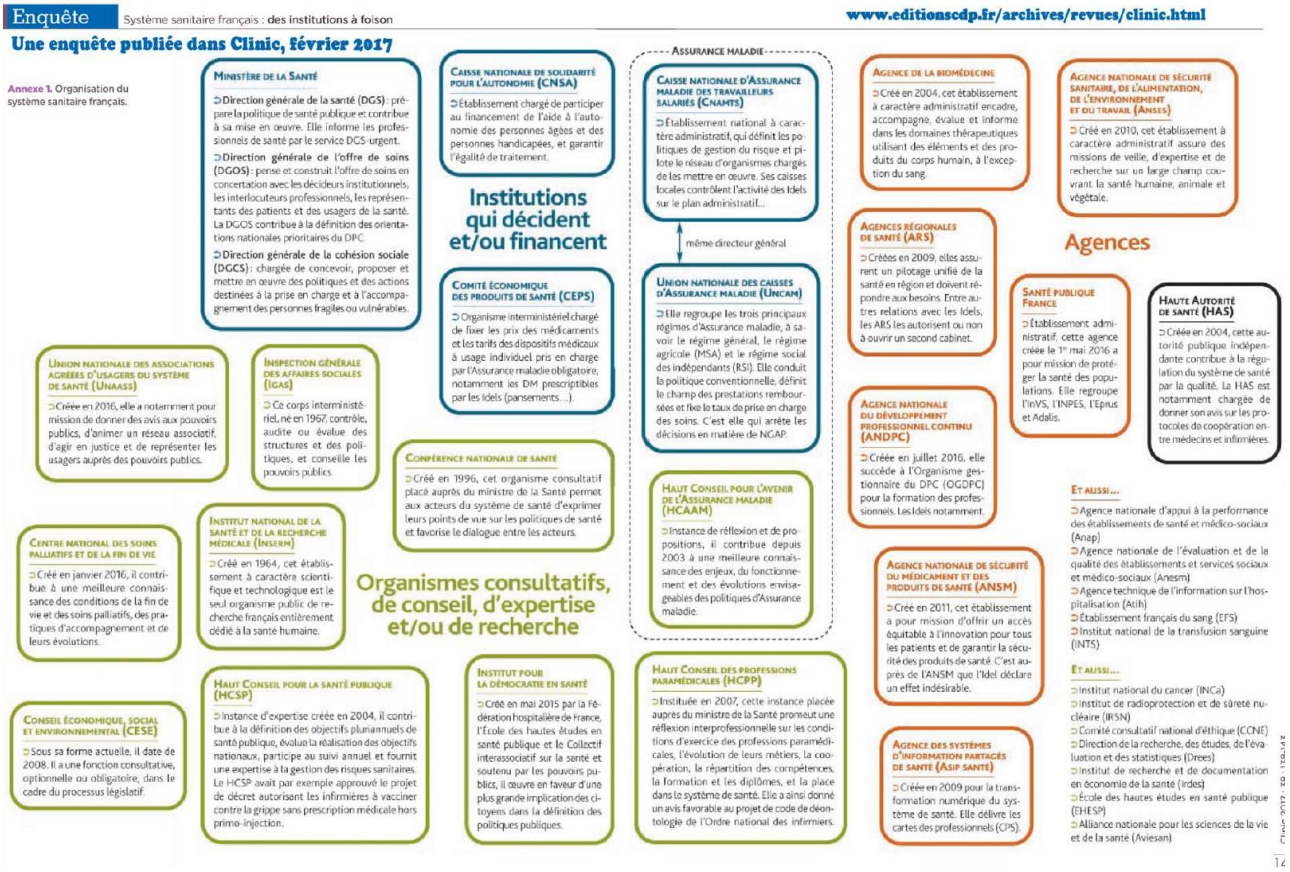


Figure 27. Aperçu de institutions, organismes et agences qui constituent le système de santé en France (source https://www.editionscdp.fr/img/NL/enquete-clinic-fevrier-institutions.pdf)

[92] Établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes

[93] Baromètre Santé 360 - Les Français et l'hôpital de demain sur http://www.odoxa.fr/sondage/barometre-sante-360-francais-lhopital-de-demain/ voir en particulier pages 33 et 34

En ce qui concerne le pilotage du système de santé français, il est composé de plusieurs couches, que l'on pourrait qualifier de mille-feuilles, chacune structurée en de multiples organismes et agences, à l'image du diagramme de la Figure 27. À destination des étrangers devant se faire soigner en France, le Centre des Liaisons Européennes et Internationales de la Sécurité Sociale (CLEISS) propose une description très claire et synthétique, mais exclusivement littérale, de notre système de santé, sans faire une quelconque tentative de schématisation, ce qui en dit long sur la difficulté à comprendre les liens entre les couches et acteurs et à visualiser une telle organisation[94].

2.2.2. Les parcours patients sous toutes leurs formes

Les différentes structures de production de soins devraient, si possible de façon coordonnée, participer à l'accueil et à la prise en charge de patients en s'appuyant sur des *parcours de soins*.

D'après la HAS, Un **parcours de soins** est "*une séquence d'activités réalisées par différentes compétences professionnelles (personnel médical, paramédical, administratif et technique) à l'aide de moyens matériels (équipements) et liées directement ou indirectement aux soins : consultations, actes techniques ou biologiques, traitements médicamenteux et non médicamenteux, prise en charge des épisodes aigus (décompensation, exacerbation), autres prises en charge (médico-sociales notamment, mais aussi sociales)*"[95].

On voit donc qu'un parcours de soins peut être conceptuellement assimilé à un *processus* au sens de la norme ISO 9000:2015 et du Business Process Management (BPM), sachant que ces approches et techniques sont encore peu utilisées en santé comme le souligne (Andellini *et al.* 2017)[96].

Le ministère des Solidarités et de la Santé propose une approche plus large du parcours qui s'entend comme la prise en charge globale, structurée et continue des patients, au plus près de chez eux. Concrètement, cela suppose l'intervention coordonnée et concertée des professionnels de santé et sociaux, tant en ville qu'en établissement de santé, médico-social et social, en cabinet libéral, en maison de santé ou en centre de santé, en réseau de santé, et intégrant les facteurs déterminants de la santé que sont l'hygiène, le mode de vie, l'éducation, le milieu professionnel et l'environnement[97]. Trois grands types de parcours sont ainsi définis : parcours de soins, parcours de santé et parcours de vie.

S'inscrivant donc au-delà du parcours de soins, le ***parcours de santé*** est l'ensemble des étapes et le cheminement parcourus par un usager dans un système sanitaire et social organisé, dans un temps et un espace donnés. Il apporte une réponse aux besoins de prévention, sociaux et médico-sociaux.

Quant à lui, le ***parcours de vie*** intègre les parcours de soins et de santé. Il est une réponse aux besoins de la personne dans son environnement. Il intègre l'ensemble des acteurs de la sphère

[94] https://www.cleiss.fr/particuliers/venir/soins/ue/systeme-de-sante-en-france.html

[95] https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2012-05/quest-rep_parcours_de_soins.pdf

[96] Andellini, M., Fernandez Riesgo, S., Morolli, F., Ritrovato, M., Cosoli, P., Petruzzellis, S., Rosso, N. (2017). Experimental application of Business Process Management technology to manage clinical pathways: a pediatric kidney transplantation follow up case. BMC Medical Informatics and Decision Making, 17(1), 151.

[97] Lexique des parcours, ARS, 2012 https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/2016-01-11_lexique_vf.pdf

sociétale et notamment, les interactions avec l'éducation et l'emploi. Il correspond ainsi à une prise en charge globale de l'usager, prenant en compte ses choix, en coordination avec l'ensemble des acteurs (voir Figure 28).

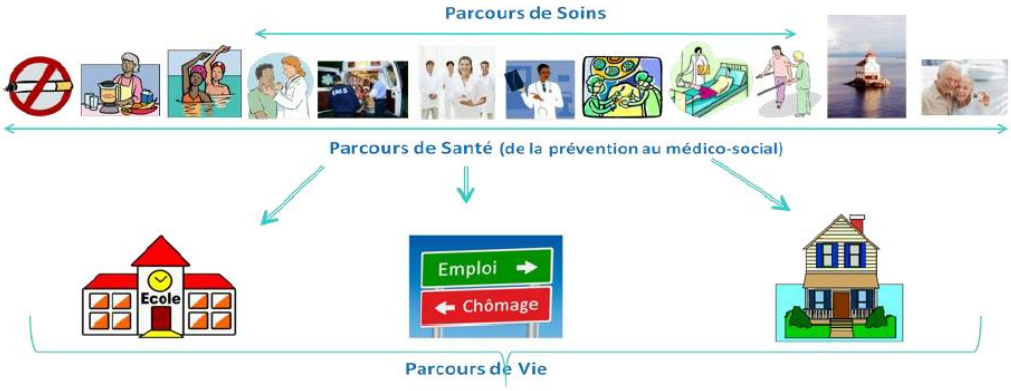


Figure 28. Parcours de soins, parcours de santé et parcours de vie (d'après ARS Languedoc-Roussillon, 2015)

Ces différentes déclinaisons des parcours apparaissent aussi dans la littérature sous le terme plus général de ***parcours patient*** (patient pathway en anglais). La traduction du dictionnaire médical Segens[98] est la suivante : "*Trajectoire empruntée par un patient dès le premier contact avec un membre du personnel (généralement son médecin généraliste) jusqu'à la fin du traitement. Le parcours couvre également la période allant de l'entrée dans un hôpital ou un centre de traitement jusqu'à la sortie. Il s'agit d'une séquence chronologique dans laquelle chaque événement lié au traitement peut être saisi, telles que les consultations, le diagnostic, le traitement, les médicaments, le régime alimentaire, l'évaluation, l'enseignement et la préparation à la sortie de l'hôpital. Le parcours fournit un aperçu des événements susceptibles de se produire et peut être utilisé à la fois pour informer le patient et pour planifier les services en tant que modèle pour les services et opérations communs.*"

Dans un périmètre limité à l'hôpital qui correspond à celui sur lequel je souhaite concentrer mes travaux, j'adhère plus particulièrement à la définition proposée par (Conte, 2008)[99] qui repose sur la vision processus déjà évoquée plus haut : "*L'organisation hospitalière est constituée d'un ensemble d'entités, chacune spécialisée dans un domaine particulier. Si l'on compare l'hôpital à un système de production et si l'on considère que la prise en charge du patient s'effectue selon un processus qui engage l'hôpital en tant qu'organisation productrice de services*[100]*, nous pouvons parler communément de processus de prise en charge du patient dont l'ensemble concourt à atteindre les missions de l'établissement. Ce système, calqué sur celui de l'industrie, permet de qualifier le processus comme un système d'activités qui utilise des ressources pour transformer des éléments d'entrée et de sortie aboutissant à la production d'un bien et d'un service avec une valeur pour le client. Les processus sont généralement classés en trois catégories : les processus de management,*

[98] *Segen's Medical Dictionary*. S.v. from https://medical-dictionary.thefreedictionary.com/patient+pathway
[99] Conte, V. (2008). Optimisation du parcours de l'usager à l'hôpital : un processus à construire. Rôle du Directeur des Soins. Mémoire de l'EHESP. 2008, 49.
[100] Claveranne, J.P., Pascal, C., Coulomb, A. (2004). Repenser les processus à l'hôpital. Une méthode au service de la performance. Paris Editions Médica, 242 p.

les processus de support et les processus centraux. À l'hôpital, le processus de soins est un processus central qui peut s'entendre comme une succession de tâches réalisées à l'aide de moyens humains et matériels accompagnée de la transmission des informations et de procédures formalisées dont le patient est le principal bénéficiaire. Le parcours du patient est considéré comme partie intégrante des processus centraux. Certains auteurs analysent le parcours patient pour une hospitalisation à caractère chirurgical réglé. Ils proposent d'établir un processus d'hospitalisation qui retient les étapes standards de soins, décrit les ressources humaines, matérielles et administratives. Au sein de ce processus, ils décrivent d'autres processus tels que des processus de soins, administratif, logistique. Ils sont complémentaires et interdépendants. Les points de contact entre les différents processus sont communément appelés interfaces. C'est un lieu d'échanges de matière, de service, d'informations, de compétences analogues aux « nœuds » décrits dans les réseaux. C'est là que chaque activité se coordonne avec la suivante et que les acteurs des différents processus se croisent. La qualité des interactions au sein des processus mais aussi des interfaces est un élément essentiel au maintien de la cohérence globale du parcours de soins de la personne hospitalisée."

La production de soins hospitaliers occupe aujourd'hui une place prépondérante dans la consommation de soins et de biens médicaux : 47% en France en 2019, soit 97 milliards d'euros, +2,4% par rapport à 2018[101]. Cette évolution très importante de la production de soins a débuté dans les années 1970. En effet, l'hôpital public s'est transformé de façon profonde et est passé d'une fonction d'accueil des plus démunis à une véritable fonction de production de soins, avec le développement de plateaux techniques (bloc opératoire, techniques anesthésistes, chirurgicales, techniques de diagnostic, etc.) et d'une professionnalité hospitalière[102]. L'hôpital est donc un véritable système de production très complexe dans lequel une grande diversité de flux de patients, au centre du système, s'entremêle avec des flux d'informations, de visiteurs, de médicaments, de dispositifs médicaux, de personnels, de déchets, de repas, etc[103].

Mais contrairement à un système de production de biens où une erreur de production affecte le produit, mais n'affecte pas le client dans sa chair, dans un système de production de soins, le patient subit directement les erreurs médicales ou les dysfonctionnements organisationnels. Les erreurs médicales étant heureusement extrêmement rares[104], je souhaite développer dans mon projet de recherche, au travers de l'axe IOS, essentiellement la **dimension organisationnelle de la production de soins** dans le système de santé, souvent reléguée au second plan, mais dont l'impact n'est pourtant pas négligeable sur les dépenses de santé comme sur la perception globale de la qualité des soins par les patients[105]. Le sondage ODOXA réalisé en mars 2018 montre ainsi que le sentiment d'un déroulement satisfaisant du parcours de soin est en baisse préoccupante : en mai 2015, 69% des Français se déclaraient satisfaits du parcours de soin entre leur médecin et

[101] Les dépenses de santé en 2019 en France et perspectives internationales, DREES 2020, page 9.
[102] Fargeon, V. (2014). Chapitre 4. La production publique de soins : le secteur hospitalier en mutations, Introduction à l'économie de la santé. Sous la direction de Fargeon Valérie. Presses universitaires de Grenoble, 2014, pp. 81-95.
[103] http://www.h360.fr/dossiers/la-logistique-hospitaliere/
[104] En l'absence de statistiques officielles, on les estime à environ 1% des actes réalisés, dont 2% déboucheraient sur un décès.
[105] Millien C., Chaput H., Cavillon M., (2018). La moitié des rendez-vous sont obtenus en 2 jours chez le généraliste, en 52 jours chez l'ophtalmologiste, Études et Résultats, DREES n°1085, octobre 2018.

l'hôpital, alors qu'ils n'étaient plus que 30% en mars 2018. Désormais, seule une minorité de Français (49%), estime que le parcours de soins se déroule bien[106].

2.2.3. Le diagnostic organisationnel et le pilotage prédictif des parcours patient

Pour rendre l'organisation performante et efficiente, il faut déjà disposer d'une répartition des ressources adaptée au besoin, de manière qualitative et quantitative. Il s'agit d'un problème délicat, très bien posé par (Georges-Tarragano et al., 2015)[107], puisque la performance, en termes de qualité de soins, et l'efficience économique, sont très difficiles à concilier dans le domaine de la santé. Il y a cependant plusieurs approches qui tentent d'apporter des réponses à ce problème, comme le présentent (Aguasca et al., 2016)[108] dans leur rapport de synthèse. Mais la capacité minimale en ressources n'est pas toujours disponible actuellement dans les établissements, non seulement parce qu'il y a eu dans un passé récent une politique de maitrise des dépenses (réduction du nombre de lits, non remplacement de soignants, etc.), et aussi parce que la crise du Covid a sans doute fait empirer la situation, surtout dans le public, avec 2 à 5% de postes vacants chez les soignants[109], avec pour conséquence des lits fermés fautes de soignants[110]. Même si je tiens à mentionner en préambule cette difficulté de plus en plus prégnante que connait une grande majorité d'établissements en France, ce n'est pas sur ce problème politico-économique que j'ambitionne d'apporter une quelconque contribution scientifique.

Même si cela peut paraître illusoire aujourd'hui, je fais l'hypothèse, pour mon projet de recherche, que l'on dispose d'une capacité en ressources permettant d'assurer la qualité de soins visée. Il faut donc pouvoir les coordonner et les utiliser de façon rationnelle[111]. Ce dernier aspect est non seulement crucial, mais il rend en plus la production de soins beaucoup plus complexe que la production de biens. En effet, produire des soins implique un ensemble d'actions, d'actes médicaux ou paramédicaux, réalisé par un ensemble de médecins ou de soignants sur un patient. Il s'agit donc d'un processus essentiellement humain, qui par conséquent présente ces deux spécificités :

1. Une variabilité bien plus importante que celle d'un processus industriel mécanisé ou automatisé.
2. Une multitude d'événements imprévisibles avec des causes essentiellement humaines.

L'une et l'autre nécessitent donc des décisions médicales et organisationnelles fréquentes et à prendre très souvent en "temps réel".

---

[106] Sondage ODOXA réalisé en mars 2018, Baromètre Santé 360 - Nouveaux usages en santé, http://www.odoxa.fr/sondage/barometre-360-sante-numerique-permettra-t-de-redresser-satisfaction-recul/

[107] Georges-Tarragano, C. (2015). Soigner (l')humain. Manifeste pour un juste soin au juste coût. Presses de l'EHESP, « Controverses », 2015, ISBN : 9782810903962.

[108] Aguasca, K., Berion, C., Claire, C.D.J., Duforeau, R., Ecourtemer, E., Guigou, O., Iberraken, M., Nanceau, B. (2016). « Qualité et sécurité des soins dans les établissements de santé : quels ratios d'effectifs dans les services de soins et comment sont-ils calculés ?». Module interprofessionnel de santé publique, EHESP, 2016, 61.

[109] Attractivité paramédicale et difficultés de recrutement, enquête de la FHF, octobre 2019, https://www.fhf-hdf.fr/wp-content/uploads/2019/10/RHF_Enqu%C3%AAteFHFAttractivit%C3%A9_2019.pdf

[110] Annexe 3 de Delfraissy, J.-F., Atlani-Duault, L., Benamouzig, D., Bouadma, L., Cauchemez, S., Chirouze, C., Consoli, A., Druais, P.L., Fontanet, A., Grard, M.-A., Guérin, O., Hoang, A., Lefrançois, T., Lina, B., Malvy, D., Yazdanpanah, Y. (2021). Avis du conseil scientifique Covid-19 - 5 octobre 2021 - Une situation apaisée : Quand et comment alléger ? 2021, 53.

[111] Thèse de Norly Germain, "Contribution à l'ingénierie des systèmes de production de soins dans les pays en voie de développement : vers un système sans murs en Haïti". (2012). Université Paul Verlaine de Metz.

Or, la qualité des décisions organisationnelles est en grande partie conditionnée par la connaissance de la situation du système hospitalier à l'instant où la décision doit être prise, mais aussi dans le passé proche ou plus lointain, ainsi qu'idéalement par une projection dans le futur proche. Autrement dit, il faudrait disposer d'informations permettant, pour chaque patient, (Q1) de savoir quelle est la situation courante, (Q2) de savoir ce qui s'est passé avant, et (Q3) de prédire ce qui va se passer plus tard.

Pour cela, la localisation des patients et l'occupation des ressources (salles, équipements, personnels) sont les deux grandes catégories d'information nécessaires. Or, elles sont rarement disponibles, du moins pas actualisées à haute fréquence.

C'est ainsi que gérer les flux de patients dans un hôpital aujourd'hui, c'est un peu comme si l'on demandait à un conducteur d'une voiture de se rendre à une destination, sans trop savoir par où il doit passer, sans jauge d'essence lui permettant de connaitre le niveau de carburant disponible, et avec un compteur kilométrique lui indiquant non pas sa vitesse instantanée, mais celle à laquelle il était la veille… Le risque de panne ou d'accident serait particulièrement élevé.

À l'hôpital, cela se traduit par une dépense d'énergie et de temps non consacré aux soins pour tenter de rassembler les informations nécessaires, et par un régime nominal particulièrement instable car il n'est pas sous contrôle. Par exemple, un médecin urgentiste peut passer près d'un tiers de son temps au téléphone pour trouver des places ou des lits dans différents services ou d'autres hôpitaux.

> Pour mon projet de recherche, je souhaite donc orienter mes travaux sur le pilotage prédictif des parcours en temps réel, afin de proposer aux "*pilotes de flux de patients*" (cadres de santé, chefs de pôle, chefs de service, etc.)[112] un outil d'aide à la décision permettant de répondre aux trois questions (Q1 à Q3) préalablement posées. Ce projet vient en complément de ce que je fais déjà sur le diagnostic organisationnel et l'amélioration des parcours patients (minimisation des attentes, des déplacements et de toutes les activités inutiles ou redondantes pour les patients).

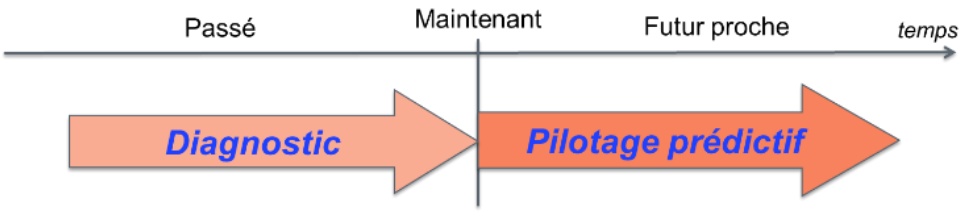


Figure 29. Positionnement temporel du diagnostic organisationnel et du pilotage prédictif

Sur une échelle de temps marquée par l'instant présent, le diagnostic organisationnel est une activité qui s'intéresse à tout ce qui s'est déroulé avant, alors que le pilotage prédictif va permettre de se

[112] Cette fonction de "pilote" ou de gestionnaire des flux de patients est encore peu repandue dans nos établissements de santé.

projeter dans un futur proche tout en ayant une connaissance de la situation courante et passée (voir Figure 29).

Mes travaux passés ont porté en grande partie sur le diagnostic organisationnel des parcours patient, pour lequel j'ai bien sûr fait appel à la simulation, mais aussi plus récemment au Process Mining (voir en sections 1.3.5, 1.4.1 et 1.4.2 les thèses de Romain Miclo, Quentin Schoen et Sina Namaki Araghi). Pour mon projet de recherche, je souhaite travailler davantage sur le pilotage prédictif, tout en assurant une continuité et une cohérence avec le diagnostic organisationnel. Pour ces deux activités de diagnostic et de pilotage, je m'appuie en effet sur trois fonctions de base qui leur sont communes et qui sont interdépendantes : (1) capter les données nécessaires, (2) modéliser les parcours, puis (3) simuler les flux de patients dans un hôpital.

Le diagnostic organisationnel et l'amélioration des parcours patients : L'acquisition de données relatives aux parcours patients dans un ou plusieurs services afin de mesurer la performance (temps de séjour total et temps passé dans chaque étape du parcours, distance parcourue au total et entre chaque étape du parcours, etc.) est un vrai défi. En effet, une collecte de données menée de façon conventionnelle, par observations et interviews, ne présente pas une garantie d'exhaustivité et de qualité suffisante, sans parler du temps consommé pour y parvenir. Impossible en effet de placer un "observateur" derrière chaque patient pour collecter les données de son parcours. Il s'agit donc plutôt de viser l'extraction, la fusion et la validation des données existantes dans les bases des outils informatiques du système d'information hospitalier (SIH) : gestion des consultations, des urgences, du bloc opératoire, etc. Cette approche constitue une première difficulté car l'accès à cette masse de données, même non médicales, d'un hôpital est très réglementé en France, pour des raisons à la fois de respect de la vie privée et de sécurité informatique. De plus, la proportion de données collectées par une saisie manuelle d'une infirmière, d'une assistante ou d'un médecin, est souvent très importante. Cela a pour effet une probabilité d'avoir des données manquantes ou incohérentes non négligeable, ce qui nécessite des traitements complémentaires à base d'algorithmes de vérification et de déduction. Sans parler des nombreux établissements qui disposent encore d'outils informatiques non interopérables, avec en particulier des identifiants de séjour ou de patient pouvant être différents d'un service à l'autre, ou entre deux établissements d'un même GHT[113]. Si l'on veut en plus modéliser finement un parcours intra-hospitalier, en incluant notamment les attentes des patients (assis, debout, couché) dans ou en dehors des salles d'attente, ainsi que leurs déplacements, il faut disposer d'un système d'acquisition de données complémentaires basé sur la géolocalisation indoor. Cela constitue un premier verrou, à la fois technologique, scientifique et aussi sociologique sur lequel j'ai déjà travaillé (voir thèse de Romain et de Sina avec le Real Time Location System ou RTLS) et que j'ai la chance de pouvoir tester durant l'année 2022 sur deux terrains expérimentaux réels, avec des technologies et des utilisations différentes : (1) le tracking de brancards entre le service d'urgence et les services d'imagerie du CHU de Saint-Etienne avec une solution proposée par la société Cartobat[114] (projet FindMed Carnot-Mines mené en collaboration avec Mines Saint-Etienne et IMT Mines Alès), et (2) le tracking de patients devant être hospitalisés dans un service aval après leur passage au service d'urgence au CH de Perpignan avec une solution de la société Alcatel Lucent Enterprise[115] (projet HospiT'Win GHT financé par la DGOS, voir Figure

[113] Groupement Hospitalier de Territoire, voir https://solidarites-sante.gouv.fr/professionnels/gerer-un-etablissement-de-sante-medico-social/groupements-hospitaliers-de-territoire/
[114] https://cartobat.fr/
[115] https://www.al-enterprise.com/fr-fr/produits/asset-tracking

30). Disposer de ces données laisse entrevoir des perspectives, mais aussi de nouveaux verrous à lever, pour le diagnostic organisationnel des parcours tels que la construction et la mise à jour automatique d'un double numérique des parcours patients à base de simulation à événements discrets, notamment en s'appuyant sur des techniques de fouille de processus (Process Mining) et en particulier d'algorithmes de découverte des parcours (Process Discovering). Ainsi, des mesures obtenues pour chaque parcours patient (temps de séjour total et temps passé dans chaque étape du parcours, distance parcourue au total et entre chaque étape du parcours) pourront être comparées à des valeurs "références" ou obtenues avec le simulateur, et permettront ainsi de mettre en évidence des dysfonctionnements. Tout écart significatif entre une mesure et une valeur cible sera traité par une base de connaissance afin de faire ressortir un diagnostic organisationnel visant à identifier les causes. Des solutions types obtenues grâce à de l'apprentissage automatique (Machine Learning) pourront alors être implémentées et évaluées d'abord sur le simulateur, avant leur mise en œuvre dans le monde réel avec une garantie de réussite élevée.

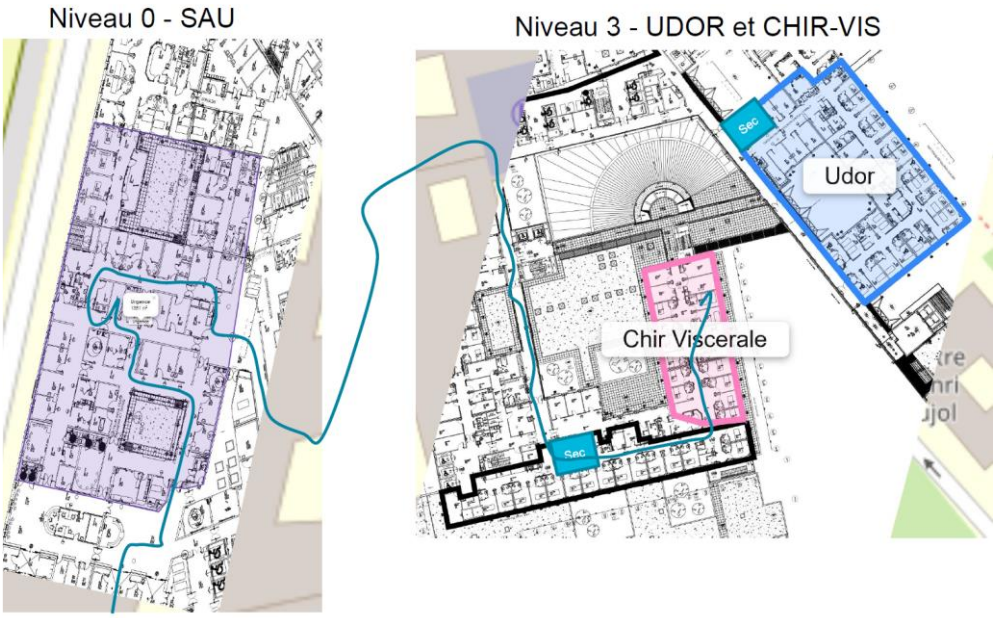


Figure 30. Périmètre du pilote expérimental de tracking patients au CH Perpignan. La ligne bleue correspond à la trace enregistrée du parcours d'un patient entre le SAU et le service CHIR-VIS

☞ *Je présenterai plus en détail les capteurs permettant de collecter des données sur les parcours patients dans la section 2.6.3.*

Le pilotage prédictif des parcours en temps réel : Dans cette autre phase, la perspective consiste à transformer le simulateur off-line en un double numérique servant d'outil de pilotage prédictif en temps réel. L'un des verrous techniques et scientifiques concerne l'initialisation et l'actualisation du double à partir de données ou d'événements captés dans le monde réel afin de garantir qu'à tout instant le double numérique soit une image fidèle du réel. L'extraction de données et plus précisément la captation d'événements devront donc être réalisées en temps réel afin de mettre à

jour le double numérique. À chaque instant, il sera important de minimiser les écarts entre la situation du monde réel et la situation modélisée par le double numérique. L'utilisation du double numérique devrait constituer une innovation importante puisqu'il permettra de se projeter virtuellement dans un futur proche (quelques heures ou sur un horizon de travail significatif) en accélérant le temps suite à l'apparition d'un événement inattendu ou d'une dérive (arrivée d'un patient non programmé dans un service de consultation, durée opératoire plus longue que prévue au bloc, analyse biologique non terminée, etc.) puis de tester virtuellement différents scenarii permettant d'y pallier au mieux avant de mettre en œuvre la solution la plus performante dans le monde réel. La fonction "pilotage" opérationnel de l'activité et des flux de patients, aujourd'hui très peu outillée, hormis partiellement au bloc opératoire, pourra alors être déployée grâce à ce double numérique. À condition que le modèle soit adapté, le "pilote" pourra avoir une idée précise des conséquences d'un événement inattendu et pourra utiliser le double numérique pour évaluer des décisions visant à limiter les impacts de cet événement. L'autre verrou scientifique portera donc sur l'aide à la décision en temps réel pour maintenir la performance de l'organisation à son niveau optimal.

☞ *Je reviendrai plus en détail sur le pilotage prédictif des parcours dans la suite de ce manuscrit (à partir de la section 2.5) puisque cela constitue l'élément majeur de mon projet personnel de recherche.*

Mes travaux doivent donc faire fortement appel à des technologies et des outils numériques, certains déjà existants mais pas nécessairement déployés dans les hôpitaux, comme le RTLS par exemple, et d'autres totalement nouveaux et à développer, comme le double numérique pour le pilotage des parcours.

Dans les sections qui suivent, je vais tenter de décrire l'évolution numérique dans la production de soins, en mettant en perspective les systèmes cyber-physiques (CPS), très intimement liés ou associés aux doubles numériques précédemment évoqués.

2.3. L'évolution de l'hôpital avec le développement du numérique dans la production de soins jusqu'aux systèmes cyber-physiques en santé (CPS-S)

2.3.1. Frise chronologique de deux siècles d'évolution de la médecine et de l'hôpital, et développement récent du numérique

La médecine a considérablement évolué depuis la fin du 18ème siècle qui marque l'obligation de disposer du titre de docteur en médecine pour exercer, alors qu'il y avait auparavant une liberté complète d'exercer. C'est aussi une période de réforme de l'hôpital, qui devient établissement communal alors qu'il était sous la tutelle de l'église. Durant le 19ème siècle, l'hôpital devient le lieu où les médecins pratiquent des autopsies de masse sur des malades pauvres, ce qui leur permet de faire considérablement progresser leurs connaissances du lien entre les symptômes et les lésions des organes et des tissus.

Le 20ème siècle est d'abord marqué par l'apport de la biologie, de la chimie et de la physique, avec la découverte des rayons X. La cancérologie émerge grâce à des innovations thérapeutiques conduites par des médecins qui sont aussi des chercheurs. Il en est de même pour la pédiatrie, avec

l'essor de la vaccination. La 2ème moitié du 20ème siècle correspond à une période de profondes mutations de l'hôpital avec plusieurs réformes majeures. La loi de 1941 fait que l'hôpital devient un service public ouvert à l'ensemble de la population, et pas seulement aux pauvres. Au sortir de la guerre, en 1945, la sécurité sociale, sous la forme qu'on lui connait encore aujourd'hui, est créée. En 1958, la réforme Debré débouche sur la création des CHU, sur la refonte des études médicales avec une "alternance" entre recherche en biologie humaine et pratique clinique au chevet des malades. Les étudiants en médecine, qui suivent des études longues et difficiles, ont donc une grande partie de leur formation qui se déroule en "apprentissage", depuis bien plus longtemps que nos ingénieurs !

La fin du 20ème siècle voit les techniques médicales progresser considérablement avec les greffes d'organes qui se banalisent et le recours de plus en plus systématique aux équipements d'imagerie médicale évolués qui sont souvent couplés à des traitements numériques d'analyse et de diagnostic : échographie, scanner, IRM. Parallèlement, les réformes hospitalières se sont succédées à un rythme tel que l'on a du mal à imaginer leur application opérationnelle : la loi hospitalière de 1991, les ordonnances "Juppé" de 1996, le "programme de médicalisation des systèmes d'information" (PMSI) lancé en 1996 qui permet à la France de disposer d'une base de données médico-économiques de l'ensemble des assurés sociaux, les plans "Hôpital 2007" puis "Hôpital 2012", la loi "Bachelot" ou "Hôpital, Patients, Santé et Territoires (HPST)" en 2009, la "tarification à l'activité" (T2A) lancée en 2004, le recours aux partenariats public/privé (PPP) en 2007, le regroupement des services hospitaliers en "pôles", le virage ambulatoire en 2013, etc. (Safon 2021) [116].

[116] Safon, M.O. (2021). « Les réformes hospitalières en France : aspects historiques et réglementaires », Centre de documentation de l'IRDES, 2021, 68.

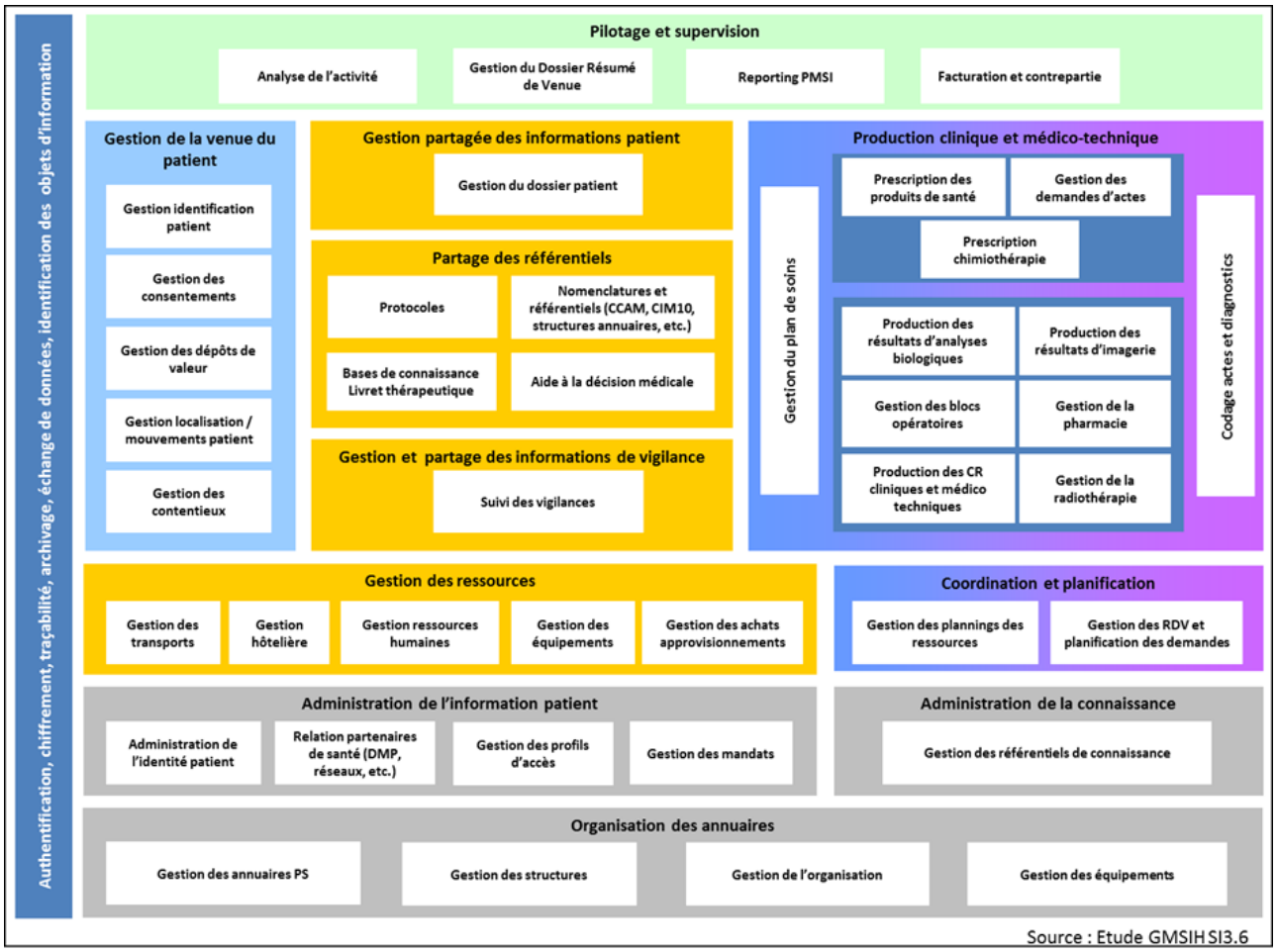


Figure 31. Cartographie fonctionnelle d'un SIH
(tirée de Segmentation fonctionnelle du SIH, ANAP 2012[117])

Même si le numérique occupe une place de plus en plus importante à l'hôpital, mes observations sur le terrain montrent que de nombreux établissements travaillent encore avec beaucoup de papiers, de dossiers physiques, disposent de peu d'espaces numériques partagés et sécurisés, ou ne maitrisent pas bien leurs outils numériques qui sont parfois peu ergonomiques ou mal adaptés au besoin réel. La complexité de l'hôpital déjà évoquée a pour conséquence un système d'information hospitalier (SIH) tout aussi complexe et difficile à appréhender dans son ensemble, comme le montre la Figure 31 qui présente une cartographie fonctionnelle théorique.

☞ *Je reviendrai plus loin (section 2.6.1) sur l'absence ou la faiblesse de solutions techniques et informatiques pour réaliser certaines de ces fonctions permettant d'assurer le suivi organisationnel des parcours patients.*

[117] Disponible sur https://ressources.anap.fr/numerique/publication/346-connaitre-les-grandes-fonctions-d-un-sih/310-introduction

Pourtant, depuis le début du 21ème siècle, la médecine se transforme pour devenir de plus en préventive, prédictive, personnalisée et participative avec le concept de *santé 4 P* (Hood 2013)[118]. Plusieurs extensions ont même été proposées pour aller au-delà des 4 P : pertinente, parcours de soins, patient-centrée, précise, pervasive, etc. Cette évolution se fait notamment grâce aux données, le plus souvent générées par les patients eux-mêmes, et enregistrées dans le SIH par un tiers (médecin, infirmière, agent administratif). La production de soins entraine ainsi une production de données considérable, même à l'échelle d'un établissement. La transformation numérique du système de production de soins permet de susciter et de favoriser l'évolution à la fois de dispositifs médicaux, de pratiques médicales, et permet aussi d'envisager de nouvelles approches de l'ingénierie pour le pilotage des flux de patients. Au niveau institutionnel, le ministère des Solidarités et de la Santé a lancé par exemple plusieurs programmes (MaSanté 2022, HOP'EN, e-Parcours, etc.) afin de développer la e-santé, la télésanté et la télémédecine. Depuis le 3 février 2022, l'ouverture à la population de Mon Espace Santé[119] permet à chacun de stocker et partager ses documents et ses données de santé de façon gratuite et sécurisée. En mars 2018 déjà, près de 80% des Français pensaient que le développement des outils et services numériques dans le domaine de la santé permettra d'améliorer le parcours patient à l'hôpital[120]. La crise sanitaire du Covid-19 a certainement fait franchir un palier culturel et organisationnel qui permet à ces nouveaux outils d'être mieux connus, acceptés, et même plébiscités par une très large frange de la population. "*La crise n'a pas fait apparaitre des choses nouvelles par rapport à ce qui avait déjà été identifié, elle a plutôt accéléré leur mise en route et le virage numérique de l'hôpital. [...] La crise a été également un vecteur d'acculturation globale des patients autour du numérique en santé*", selon les propos de Jacques Léglise, Directeur Général de l'Hôpital Foch, rapportés dans le rapport du SESAN[121].

Comme le montre la Figure 32, il est donc aisé de faire le rapprochement entre ces quatre grandes périodes d'évolution de la médecine et de l'hôpital avec les quatre révolutions industrielles qui sont exposées dans le concept Industrie 4.0. Selon (Afferni *et al.* 2018)[122], l'Hôpital 4.0 (ou la Santé 4.0), qui s'en inspire, et qui fait largement appel aux techniques et outils numériques, intègre plusieurs champs, dont la e-Santé, les objets connectés, l'intelligence artificielle et les ***systèmes cyber-physiques (CPS)***. Comme dans le domaine industriel, mais sans doute avec beaucoup moins de maturité, les CPS en Santé (CPS-S) sont un élément clé dans l'évolution et la modernisation du système de santé. Toutefois, il est délicat et risqué d'imaginer une transposition directe des CPS-I (industriels) sans prendre en compte les spécificités du système de santé.

[118] Hood, L. (2013). Systems Biology and P4 Medicine: Past, Present, and Future. Rambam Maimonides Medical Journal, 4(2), e0012.

[119] https://www.monespacesante.fr/

[120] Page 21, sondage ODOXA, Baromètre Santé 360, Nouveaux usages en santé, mars 2018.

[121] Ce que la Covid-19 a vraiment montré en matière de e-santé, retour d'expérience en Ile-de-France. Rapport du GCS SESAN, https://www.sesan.fr/wp-content/uploads/2020/10/GCS_SESAN_REX_Covid-19-vF2web.pdf

[122] Afferni, P., Merone, M., Soda, P. (2018). Hospital 4.0 and Its Innovation in Methodologies and Technologies. Dans 2018 IEEE 31st International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS). 2018 IEEE 31st International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS). IEEE, Karlstad, 333–338. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://ieeexplore.ieee.org/document/8417260/.

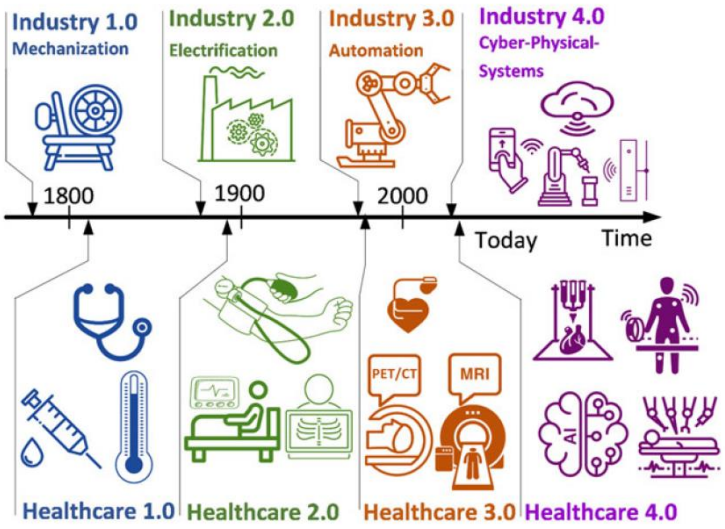


Figure 32. Corrélation temporelle entre Industrie 4.0 et Hôpital/Santé 4.0
(d'après Pang *et al.* 2018)[123]

La Figure 32 démontre la place croissante des données et une mise sous contrôle du système de production de soins liée aux progrès incessants de la médecine.

2.3.2. Qu'est-ce qu'un CPS, et quelle est son architecture ?

Les CPS semblent avoir été définis pour la première fois en 2006 dans (Lee 2006)[124], et depuis, les chercheurs du monde entier ne cessent d'apporter des contributions nouvelles à ce paradigme des futurs systèmes de pilotage, visant à être à la fois résilients et adaptatifs. Les CPS comportent une partie physique et une partie cyber qui communiquent. Jusque-là, il n'y a rien de bien différent en apparence par rapport à ce que Lemoigne a défini dès 1977 dans sa théorie du système général pour décrire les relations entre (1) un système physique ou système opérant, et (2) un système de décision ou système de pilotage, conduisant à une boucle de rétroaction (Lemoigne 1994)[125]. En y regardant de plus près, le concept de CPS présente de réelles avancées qui tirent parti de toutes les technologies récentes du numérique : objets connectés et capteurs, 5G, cloud et edge computing, Big Data, etc. ainsi qu'en matière de traitement : algorithmes d'intelligence artificielle et d'apprentissage (machine learning, deep learning), logique floue, aide à la décision multicritère, algorithmes d'optimisation, etc.

[123] Pang, Z., Yang, G., Khedri, R., Zhang, Y.-T. (2018). Introduction to the Special Section: Convergence of Automation Technology, Biomedical Engineering, and Health Informatics Toward the Healthcare 4.0. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 11, 249–259.
[124] LEE, Edward A, 2006. Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate? Position Paper for NSF Workshop On Cyber-Physical Systems. Austin, Texas. P. 9.
[125] Lemoigne, J.L. La théorie du système général– théorie de la modélisation, éd. Presses universitaires de France, 1ère éd. 1977, 4ème éd. 1994.

Récemment, (Putnik 2019)[126] a présenté un spectre de définitions des CPS et, plus intéressant encore de mon point de vue, différents modèles architecturaux de CPS, particulièrement dans le cadre d'Industrie 4.0 et de la production de biens. Tout d'abord, il est important de souligner que la partie physique d'un CPS comporte non seulement le processus opérant, mais aussi le processus de pilotage. Quant à la partie cyber d'un CPS, on y trouve un module d'apprentissage automatique entre un module de simulation et un module d'aide à la décision. On peut aussi noter que l'humain y occupe une place prépondérante (concept de "*human in-the-loop*") notamment pour l'aspect décisionnel, ce qui signifie que toute décision de correction ou de reconfiguration du système opérant ou du système de pilotage de la partie physique ne peut être faite que par un humain, même si elle a été élaborée par les modules d'apprentissage et de simulation.

La Figure 33 propose une illustration de cette architecture. La principale différence entre un système de production traditionnel et un système de production de type CPS réside dans l'adaptabilité, la reconfigurabilité, la réactivité et la robustesse, grâce à des fonctionnalités supplémentaires des boucles de rétroaction où les processus physiques affectent les calculs.

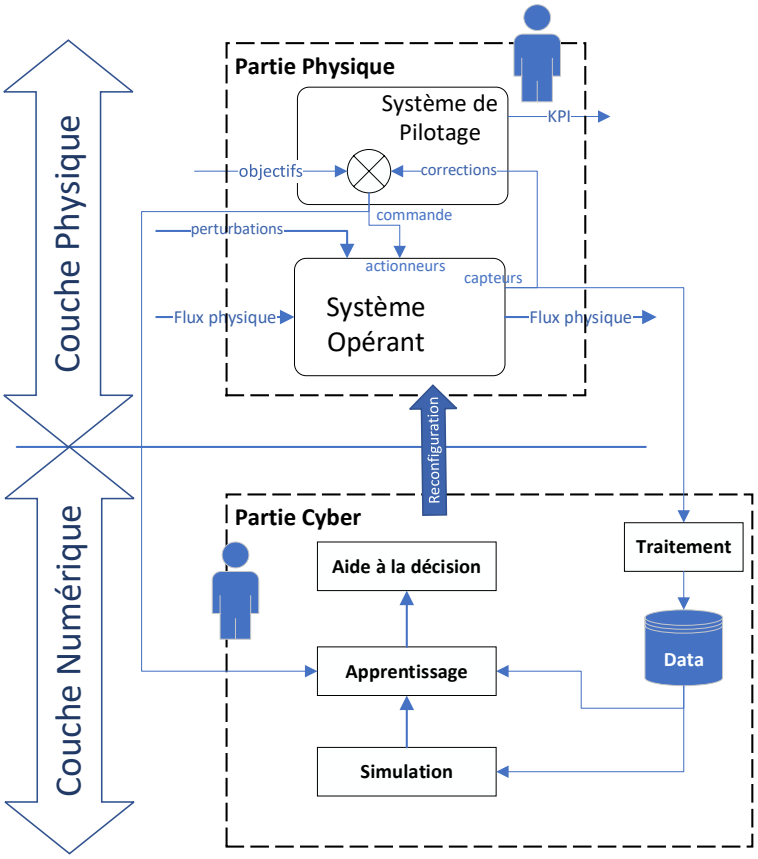


Figure 33. Architecture d'un système cyber-physique (CPS), inspiré de (Putnik, 2019)

Cette architecture met en évidence que la simulation de la partie physique, incluant donc le système opérant et le système de pilotage, est un composant de base de la partie cyber d'un CPS. En effet, la réalisation de simulations permet une évaluation permanente de la partie physique au fil du temps

[126] Putnik, G., Ferreira, L., Lopes, N., Putnik, Z. (2019). What is a Cyber-Physical System: Definitions and models spectrum. FME Transactions, 47(4), 663–674.

(simulation continue) ou selon l'apparition d'événements (simulation discrète). Pour cela, chaque simulation doit être considérée comme une nouvelle instance de la partie physique, et doit être initialisée dans l'état courant, en prenant en compte de nouvelles conditions d'environnement, prévues (écarts forcés) ou pas (perturbations).

2.3.3. Liens entre CPS et double numérique

La transition du CPS vers le double numérique (Digital Twin = DT) que je vais développer plus loin (section 2.5) me semble très naturelle, même si des chercheurs comme (Tao *et al.* 2019)[127] établissent des différences ou des distinctions entre DT et CPS, que je trouve parfois réduites à un périmètre purement terminologique ou selon des critères assez subjectifs.

J'adhère en revanche totalement au fait qu'un DT s'entend comme le pendant virtuel et informatisé de la partie physique d'un CPS. Il peut être utilisé pour le simuler à diverses fins, exploitant une synchronisation en temps réel des données captées provenant du terrain (Negri *et al.* 2017)[128] (Cimino *et al.* 2019)[129].

De la même façon, la notion de "*CPS à base de DT*" (DT-based CPS = DT-CPS) proposée par (Lee *et al.* 2020)[130] ou dans le chapitre 12 de (Tao, Zhang 2019)[131] est proche de la vision que j'ai de ces deux concepts qui s'entremêlent. Un DT-CPS doit constamment acquérir, intégrer, analyser, simuler et synchroniser des données à plusieurs étapes du cycle de vie du produit pour fournir des services prédictifs à la demande à différents utilisateurs dans les espaces physiques et cybernétiques. Les caractéristiques clés d'intégration d'un DT dans un CPS sont :

- ***Une connectivité omniprésente (ubiquitous connectivity) avec des objets intelligents*** : les actifs (biens) doivent être équipés de capteurs intelligents capables de surveiller en temps réel et d'échanger des données avec d'autres éléments du réseau. Ces transactions de données constantes nécessitent une plate-forme sécurisée, fiable et à grande vitesse.
- ***Des analyses avancées*** : il est essentiel d'automatiser l'ensemble du processus de prétraitement, de perception, d'analyse, d'apprentissage et d'exécution des données sans nécessiter d'interférences humaines importantes, ni d'ingénierie manuelle des fonctionnalités. Ce processus apporte des fonctionnalités d'auto-configuration, d'auto-adaptation et d'auto-apprentissage aux systèmes de production, ce qui augmente la productivité, la vitesse, la flexibilité et l'efficacité.
- ***Une prise de décision coopérative*** : les données provenant de plusieurs ressources et les limitations en temps réel doivent être prises en compte pour parvenir à une solution

[127] Tao, F., Qi, Q., Wang, L., Nee, A.Y.C. (2019). Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. Engineering, 5(4), 653–661.
[128] Negri, E., Fumagalli, L., Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. Procedia Manufacturing, 11, 939–948.
[129] Cimino, C., Negri, E., Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. Computers in Industry, 113, 103130.
[130] Lee, J., Azamfar, M., Singh, J., Siahpour, S. (2020). Integration of digital twin and deep learning in cyber-physical systems: towards smart manufacturing. IET Collaborative Intelligent Manufacturing, 2(1), 34–36.
[131] Tao, F., Zhang, M. (2019). Digital twin driven smart manufacturing, Academic Press , ISBN 978-0-12-817630-6.
.

optimale à l'échelle globale. Dans ce processus, la faisabilité, l'efficacité et les plans d'exécution de différentes commandes sont évalués.

- ***Une construction et des mises à jour de modèles autonomes et rapides*** : la synchronisation des données et la cartographie avancée des modèles entre les systèmes virtuels et physiques garantissent la différence minimale entre les composants virtuels et leurs homologues physiques, ce qui est essentiel pour le contrôle, l'optimisation, la prévision en temps réel, etc.
- ***Une gestion autonome des perturbations et un contrôle de la résilience*** : les systèmes de production doivent réagir de manière autonome et résiliente aux défaillances, afin d'éviter des perturbations opérationnelles catastrophiques.

2.4. Les systèmes cyber-physiques (CPS) utilisés en santé, les CPS-S

2.4.1. Vue d'ensemble des CPS-S

Les CPS utilisés en santé (CPS-S) combinent l'utilisation de biocapteurs intelligents et d'objets connectés divers avec l'accès aux données du dossier de santé du patient, ceci afin de faciliter l'aide à la décision, qu'elle soit médicale ou organisationnelle. (Haque, 2014)[132] propose une taxonomie des CPS-S présentée sous la forme d'un arbre avec 8 branches principales : (1) Applications, (2) Architecture, (3) Captation des données, (4) Gestion des donnés, (5) Traitement des données, (6) Communication, (7) Sécurité et (8) Contrôle-action. Dans cette taxonomie, ce sont surtout les branches des applications, de la captation des données, et des contrôles-actions qui présentent des spécificités sensiblement différentes des CPS utilisés dans l'industrie. Pour les applications, les auteurs, ainsi que dans (Dey, 2018)[133] distinguent deux grandes catégories :

1. Les applications d'assistance (*assisted*) ou de télésurveillance. Elles permettent l'acquisition en temps réel de données physiologiques collectées grâce à des capteurs ou biocapteurs associés à la prise en compte des besoins médicaux de personnes menant une vie normale à leur domicile ou dans des résidences de services. De telles applications facilitent le suivi et les soins de personnes âgées indépendantes dont le domicile a été transformé en habitat intelligent, appelé dans la littérature *Ambiant Assisted Living* (AAL) selon (El murabet *et al.* 2020)[134] et (Rodrigues et al. 2018)[135].
2. Les applications en environnement "contrôlé" (controlled) telle qu'une unité de soins intensifs à l'hôpital où un support médical est disponible en permanence. Les données provenant de multiples sources, telles que des systèmes de monitoring, des biocapteurs et des observations cliniques, sont combinées pour fournir aux praticiens hospitaliers des informations leur permettant de prendre des décisions éclairées sur les interventions possibles.

[132] Haque, S.A., Aziz, S.M., Rahman, M. (2014). Review of Cyber-Physical System in Healthcare. International Journal of Distributed Sensor Networks, 10(4), 217415.
[133] Dey, N., Ashour, A.S., Shi, F., Fong, S.J., Tavares, J.M.R.S. (2018). Medical cyber-physical systems: A survey. Journal of Medical Systems, 42(4), 74.
[134] El murabet, A., Abtoy, A., Touhafi, A., Tahiri, A. (2020). Ambient Assisted living system's models and architectures: A survey of the state of the art. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 32(1), 1–10.
[135] Rodrigues, J.J.P.C., De Rezende Segundo, D.B., Junqueira, H.A., Sabino, M.H., Prince, R.M., Al-Muhtadi, J., De Albuquerque, V.H.C. (2018). Enabling Technologies for the Internet of Health Things. IEEE Access, 6, 13129–13141.

Dans cette même référence, les auteurs décrivent une cartographie des CPS-S s'appuyant sur la taxonomie proposée. Ils recensent notamment une vingtaine de références présentant différentes applications des CPS-S, comme par exemple une application destinée à alimenter automatiquement le dossier patient informatisé avec des données issues d'un réseau de capteurs sans fil pour collecter les signes vitaux, ou une autre comportant un algorithme de détection de huit types de chutes tout en étant capable d'identifier sept types d'activité (marcher, sauter, courir, etc.). Cette cartographie relève aussi plusieurs architectures sécurisées de collecte de données de santé "*à la maison*" (smart living) ainsi que de leur stockage dans le cloud pour faciliter par exemple la télémédecine.

L'utilisation et la combinaison d'applications assistées et contrôlées transforment progressivement le système de santé en un système cyber-physique complexe, étendu, et pouvant être critique pour la sécurité, mais présentant de nombreux avantages et posant des défis (Insup Lee *et al.* 2012)[136].

Si l'on étudie plus en détail les branches (3) Captation des données et (8) Contrôle-action de la taxonomie présentée précédemment, on peut voir que, comme dans l'industrie, les CPS-S ont pour principe de base une connexion entre le monde physique et le monde cyber ou virtuel. La Figure 34 tirée de (Pang, 2018)[137] illustre cette connexion et présente une vue d'ensemble des CPS-S qui met l'accent sur le suivi médical, le bien-être et la prévention.

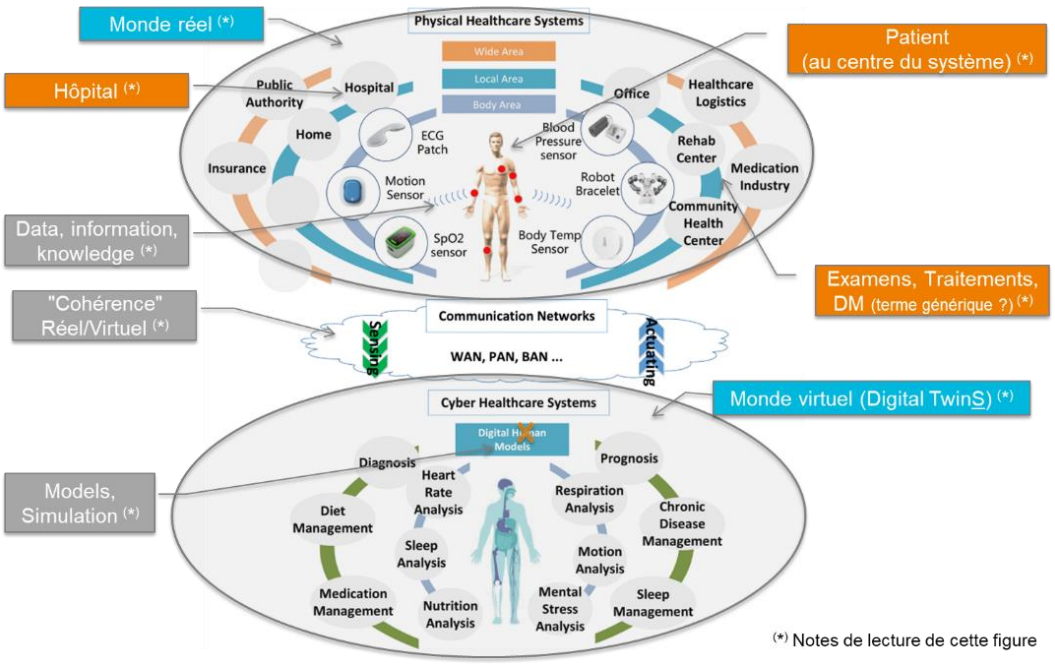


Figure 34. Vue d'ensemble des CPS-S pour le suivi médical, la prévention et le bien-être (d'après Pang, 2018)

[136] Insup Lee, Sokolsky, O., Sanjian Chen, Hatcliff, J., Eunkyoung Jee, BaekGyu Kim, King, A., Mullen-Fortino, M., Soojin Park, Roederer, A., Venkatasubramanian, K.K. (2012). Challenges and Research Directions in Medical Cyber–Physical Systems. Proceedings of the IEEE, 100(1), 75–90.

[137] Pang, Z., Yang, G., Khedri, R., Zhang, Y.-T. (2018). Introduction to the Special Section: Convergence of Automation Technology, Biomedical Engineering, and Health Informatics Toward the Healthcare 4.0. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 11, 249–259.

Dans le domaine de la production de soins, le monde réel est peuplé de patients qui évoluent dans différents environnements : hôpital, domicile, pharmacie, etc. Les CPS-S s'appliquent, de façon séparée ou intégrée (système de systèmes) au patient seul, à son environnement seul, ou aux deux combinés, à des fins qui sont le plus souvent médicales, et plus rarement organisationnelles, comme je vais tenter de le montrer par la suite.

Dans les sections 2.4.2 et 2.4.3, je vais commencer par faire une rapide revue de littérature sur les classes de CPS-S les plus fréquemment rencontrées : celle destinée au suivi médical d'un patient, et celle destinée au bien-être et à la prévention d'un individu en bonne santé.

2.4.2. Les CPS-S pour le suivi médical

Pour le suivi médical des patients, les composants physiques qui permettent cette connexion du monde réel vers le monde virtuel peuvent être des capteurs placés sur la peau, ou parfois sous la peau, afin de mesurer des marqueurs biologiques (taux de glycémie par exemple) ou des signaux physiologiques : battements du cœur, état de tension des muscles, ondes cérébrales, réponse électrique des photorécepteurs excités, résistance galvanique de la peau, etc. Les biocapteurs implantables dans le corps humain, dits *in vivo,* constituent indiscutablement les dispositifs les plus disruptifs et prometteurs tout en suscitant encore de multiples interrogations, notamment sur leur caractère intrusif et sur l'atteinte à la vie privée de chacun si le droit à la "déconnexion" n'est pas possible. Basés sur la captation de signaux physiologiques transmis par des sources biologiques (cellule, enzyme, etc.), ils permettent une surveillance en continue de biomarqueurs associés à des maladies chroniques ou aigues avec des formes graves : diabète, maladies cardio-vasculaires, troubles neurologiques, cancers, maladies infectieuses, etc. (Montrose 2013)[138]. En associant ces capteurs à des applications numériques accessibles par le patient lui-même et/ou le personnel médical, ces CPS-S peuvent ainsi intervenir dans l'optimisation des traitements médicamenteux, grâce par exemple à un ajustement personnalisé de la posologie administrée. Ils peuvent aussi jouer un rôle préventif ou de dépistage précoce, notamment auprès de personnes ayant des facteurs de risque d'une maladie.

2.4.3. Les CPS-S pour le bien-être et la prévention

L'essor des objets connectés pour le bien-être et la santé (appelés aussi "*smart objects*") constitue l'aspect le plus perceptible aujourd'hui. Une multitude de capteurs "portables" ("*wearable*") et intégrés à des bracelets, des montres, des lunettes, des vêtements, des chaussures, permettent à chacun de suivre des constantes telles que le rythme cardiaque, la pression artérielle, le taux d'oxygène dans le sang, ou plus basiquement l'activité physique (capteurs de mouvement, de chute, podomètre, accéléromètre). D'autres capteurs, pour des usages plus préventifs et dont les données nécessitent d'être analysées par un médecin, peuvent être utilisés : électrocardiogrammes,

[138] Montrose, A. (2013). Développement d'un immunocapteur impédimétrique pour la détection et la quantification d'une sous-population cellulaire : application au diagnostic précoce des infections. Thèse de doctorat, Toulouse 3. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.theses.fr/2013TOU30033.

électroencéphalogrammes, électromyogrammes, spiromètres, etc. Quant aux composants cybers ou virtuels, ils sont le plus souvent sous la forme d'applications informatiques, mobiles ou fixes, capables de visualiser, de traiter et d'analyser les données transmises par les capteurs implantés sur la partie physique. Cette classe de CPS-S constitue donc, pour les individus qui en sont équipés comme pour les acteurs du système de santé (médecins et soignants), une solution innovante d'aide à la décision médicale pour les soins ou la prévention.

La Figure 35, tirée de (Rodrigues, 2018)[139], est une illustration de la chaîne de transmission de données entre les capteurs positionnés sur la partie physique (ici un patient, à droite de la figure) et la partie cyber d'un CPS-S pour le suivi médical et la prévention à distance (à gauche de la figure).

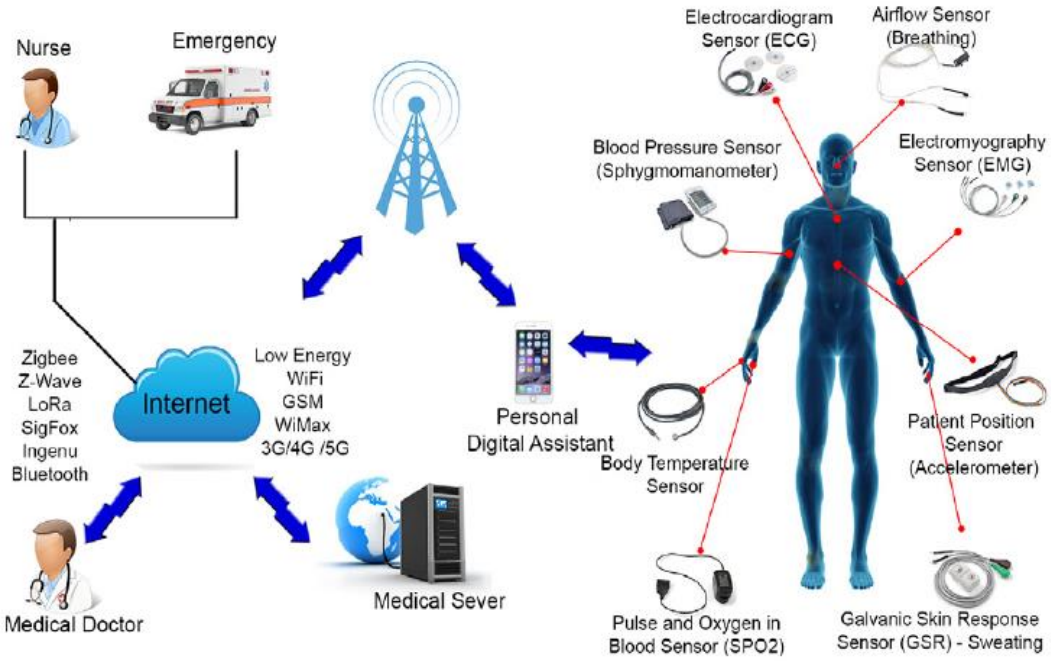


Figure 35 : Chaîne de transmission des données entre partie physique et partie cyber (d'après Rodrigues, 2018)

> Dans la section 2.5, je vais développer plus en détail la classe de CPS-S qui correspond à mon projet de recherche : celle permettant le suivi organisationnel et le pilotage des parcours de soins ou de santé. Bien qu'elle s'inspire davantage de CPS utilisés pour la production de biens, cette classe est aujourd'hui bien moins répandue que les deux précédentes et ne fait pas encore l'objet de beaucoup de travaux de recherche et de publications.

[139] Rodrigues J. J. P. C. Rodrigues et al., « Enabling Technologies for the Internet of Health Things », IEEE Access, vol. 6, p. 13129-13141, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2789329

2.5. L'apport d'un double numérique dans un CPS-S pour le pilotage prédictif

2.5.1. Mais qu'entend-on par "Double Numérique" en général ?

Tout d'abord, je précise que j'utilise dans ce manuscrit le terme "*double numérique*" sans distinction avec "*jumeau numérique*" que l'on rencontre aussi fréquemment dans la littérature francophone. Dans les publications en langue anglaise, le terme "Digital Twin" est unique, et c'est donc celui que j'ai utilisé pour réaliser une étude bibliométrique de bas niveau avec Scopus selon cette requête : *TITLE-ABS-KEY (digital PRE/ twin) AND PUBYEAR < 2022*[140].

Depuis 1973 (première publication mentionnant le terme "*Digital Twin*") jusqu'à fin 2021, Scopus recense un total de plus de 6000 références scientifiques utilisant ce terme dans le titre, le résumé ou les mots-clés, dont plus de 3300 références comportant "*Digital Twin*" dans le titre seul. Entre l'article de (Bernues, Bolle 1973)[141] à qui l'on peut attribuer la paternité du terme "*Digital Twin*" et la publication d'une équipe française de l'Université de Paris XI Orsay comportant aussi ce terme (Koren et al. 1993)[142], il s'est écoulé 20 ans sans aucune autre publication faisant référence au Digital Twin.

Mais dans ces deux publications, Digital Twin est utilisé avec un sens très éloigné de celui d'aujourd'hui, tel que proposé en synthèse par (Semeraro et al. 2021)[143]: "*Un double numérique est un ensemble de modèles adaptatifs qui émulent le comportement d'un système physique dans un système virtuel en obtenant des données en temps réel pour se mettre à jour tout au long de son cycle de vie. Le double numérique reproduit le système physique pour prédire les défaillances et les opportunités de changement, pour prescrire des actions en temps réel, pour optimiser et/ou atténuer les événements inattendus, pour observer et évaluer le profil de fonctionnement du système*".

De façon plus synthétique, (Zhuang et al. 2018)[144] définissent un double numérique comme un modèle virtuel et dynamique qui est totalement cohérent avec son équivalent physique du monde réel. Il peut simuler le comportement et les performances de son homologue physique sur une période de temps souhaitée.

Dans un deuxième temps, j'ai donc filtré les références pour ne garder que celles postérieures à 1993 (TITLE-ABS-KEY (digital PRE/ twin) AND PUBYEAR > 1993 AND PUBYEAR < 2022) ayant un sens proche de ces définitions.

En 1994, une équipe médicale française de l'hôpital cardiologique de Lyon (Hôpital Louis Pradel des HCL) publie un article présentant la conception d'un "fantôme" anthropomorphique du système

[140] Signifie que Digital précède Twin dans le titre, le résumé et les mots-clés, et avec une date de publication inférieure à 2022 (donc jusqu'à 2021 inclus).
[141] Bernues, F.J., Bolle, D.M. (1973). The Digital Twin-Ferrite-Toroid Circular Waveguide Phaser. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-21(12), 842–845.
[142] Koren, G., Polack, F., Joyeux, D. (1993). Digital twin-image elimination in soft x-ray in-line holography. Dans Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 260–274.
[143] Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. Computers in Industry, 130, 103469.
[144] Zhuang, C., Liu, J., Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96(1–4), 1149–1163.

artériel et veineux. Selon ma propre analyse, (Renaudin *et al.* 1994)[145] donnent une définition qui a le sens du double numérique reproduisant un objet physique réel *: "… Each phantom is composed of the physical object and its digital 'twin.'…*". En réalité, ce que les auteurs appellent à cette époque un double numérique, est en fait un objet physique construit à l'aide de techniques numériques de CFAO et de stéréolithographie.

Dix années s'écoulent encore (2004) avant de voir apparaître de nouveau le terme "*Digital Twin*" dans une publication s'intéressant au démantèlement des installations industrielles. Dans cet article, (Roux 2004)[146] s'intéresse au maintien de la corrélation entre l'usine réelle et son double numérique. On peut cependant penser qu'il s'agit là plus d'un concept proche du "*Digital Mockup*" ou "*maquette numérique*", qui était utilisé à cette époque, que du concept de "*Digital Twin*" qui émerge aujourd'hui avec d'autres particularités qui seront développées plus loin.

Entre 2004 et 2012, il y a eu une vingtaine de publications, principalement dans le domaine de l'aéronautique et de l'aérospatial, qui ont contribué à l'émergence du terme "*Digital Twin*". Parmi celles-ci, celle de (Glaessgen, Stargel 2012)[147] est souvent considérée, à tort ou à raison, comme la référence originelle aujourd'hui avec près de 700 citations référencées dans Scopus. Ce qui est sans doute le mieux mis en évidence dans cette publication pour caractériser le "paradigme" de jumeau numérique concerne l'utilisation d'une simulation "haute-fidélité" couplée avec des données historiques collectées sur le jumeau "réel".

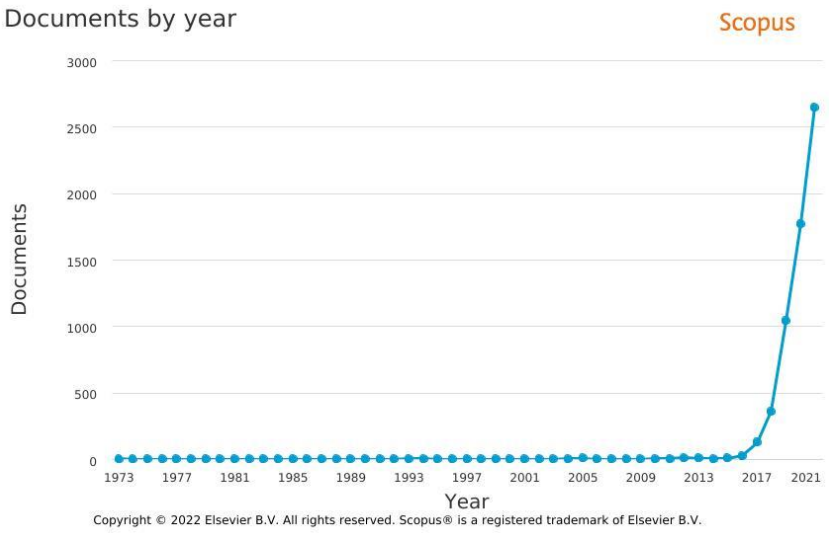


Figure 36. Évolution du nombre de références scientifiques référencées Scopus portant la mention "Digital Twin" dans le titre, le résumé ou les mots-clés (Scopus, mars 2022)

Depuis 2016-2017, le nombre de publications faisant référence au Digital Twin suit une expansion exponentielle (voir graphique de la Figure 36), à tel point que l'on peut considérer cette période

[145] Renaudin CP, Barbier B, Roriz R, Revel D, Amiel M. Coronary arteries: New design for three-dimensional arterial phantoms. Radiology 1994;190(2):579-582.
[146] Roux, J. 2004, Plants that come apart, Hydrocarbon Engineering, vol. 9, no. 6, pp. 66-69
[147] Glaessgen, E.H., Stargel, D.S. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. Dans 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 2012.

comme étant une véritable émergence et non pas comme un simple feu de paille. Mais on peut aussi s'interroger. Le double numérique constitue-t-il une réelle innovation technologique avec des fondements scientifiques originaux qui expliquent cet engouement ? Ou n'y a-t-il pas, en partie au moins, un phénomène de "*buzz word*" qui pourrait biaiser l'apport réel de ce concept ? La vérité est sans doute entre les deux et je ne m'aventurerai pas à faire une analyse critique de la valeur ajoutée réelle de chacune des 6000 références actuelles. Je vais simplement tenter d'exposer par la suite mon point de vue actuel, qui a évolué et évoluera sans doute encore, en me limitant à un périmètre applicatif des DT très réduit qui est celui des processus de production, que ce soit de biens, de services, et bien sûr plus particulièrement de soins.

Durant l'année 2021, il y a eu 2645 publications sur ce sujet, soit pratiquement 50 % de plus qu'en 2020 (1770 publications). Sans grosse surprise, près de 55% de ces références relèvent du domaine de l'Engineering et du Computer Science. Les huit autres domaines significatifs (Mathématiques, Energie, Matériaux, Physique, Chimie, Sciences Sociales, Aide à la décision, Management) représentent chacun moins de 8% des références. Enfin, tous les autres domaines représentent environ 10% des références. On peut noter que les publications du domaine de la médecine (140 documents) et des professions de santé (25 documents) ne représentent donc que 3% de l'ensemble. La Figure 37 détaille cette répartition des références par domaine.

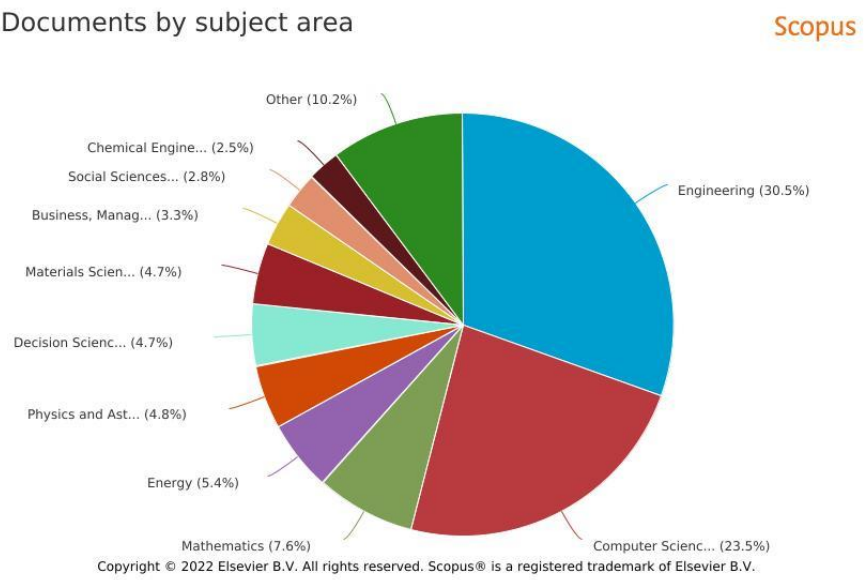


Figure 37. Répartition des références utilisant "Digital Twin" dans les principaux domaines scientifiques (Scopus, mars 2022)

Le graphique de la Figure 38 montre que la France n'est pas particulièrement à la pointe sur ce sujet, avec 5 fois moins de publications que l'Allemagne ou la Chine, qui sont actuellement les leaders mondiaux. Nous nous situons au 4ème rang européen derrière l'Allemagne, le Royaume-Uni et l'Italie.

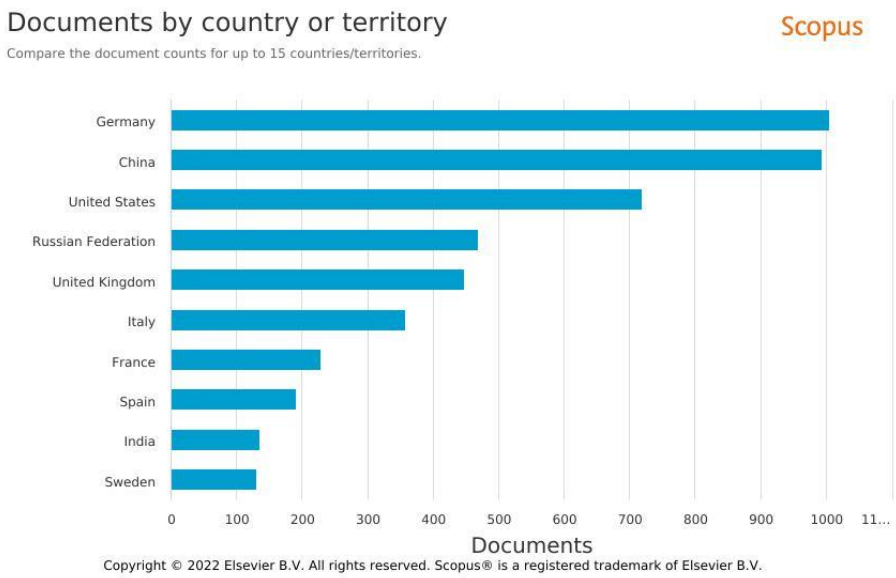


Figure 38. Répartition des publications "Digital Twin" par pays (Scopus, mars 2022)

Pour revenir au domaine de la santé, qui est très peu traité comme on l'a déjà vu, sur les quelques 6000 publications filtrées avec *TITLE-ABS-KEY (digital PRE/ twin) AND PUBYEAR > 2011* AND PUBYEAR < 2022 :

- 89 seulement incluent aussi le terme "*Healthcare*".
- 25 incluent aussi le terme "*Hospital*".
- 11 font apparaître le terme "*Patient Pathway*" dans le titre, dont les trois publications qu'Abdallah Karakra a publié durant ses travaux de thèse pour lesquelles je suis co-auteur (Karakra *et al.* 2019)[148] (Karakra et al. 2019)[149] (Karakra et al. 2020)[150].
- Huit publications incluent le terme "*Clinical Pathway*".

[148] Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., Lamothe, J., Taweel, A. (2019). Pervasive Computing Integrated Discrete Event Simulation for a Hospital Digital Twin. Dans Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA.

[149] Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., Lamothe, J. (2019). HospiT'Win: A predictive simulation-based digital twin for patients pathways in hospital. Dans 2019 IEEE EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics, BHI 2019 - Proceedings.

[150] Karakra, A., Lamine, E., Fontanili, F., Lamothe, J. (2020). HospiT'Win: A digital twin framework for patients' pathways real-time monitoring and hospital organizational resilience capacity enhancement. Dans 9th International Workshop on Innovative Simulation for Health Care, IWISH 2020. 62–71.

Parmi les autres publications dans le domaine de la santé, celles qui retiennent mon attention, car en rapport avec mes travaux, sont peu nombreuses : (Erol *et al.* 2020)[151], (Galli *et al.* 2019)[152], (Patrone *et al.* 2019)[153], (Liu *et al.* 2019)[154], (Augusto *et al.* 2018)[155].

Je souligne aussi le fait que le terme de "*double numérique*" est parfois utilisé pour désigner, dans la littérature scientifique mais surtout par des éditeurs de solutions, un modèle de simulation "*off-line*", autrement dit sans synchronisation d'événements avec le monde réel, même si son comportement dynamique en est très proche[156] [157].

2.5.2. Particularités des doubles numériques en santé

Dans le domaine de la santé, que le double numérique soit celui d'un patient, ou plus élémentairement d'un organe ou d'un des grands systèmes du corps humain, ou bien encore celui de l'environnement dans lequel les patients sont pris en charge (par exemple un hôpital avec ses ressources humaines et techniques), c'est dans tous les cas un modèle digital et dynamique du monde physique qu'il représente. Il doit être en effet capable de simuler ses états et son comportement le plus fidèlement possible. Cela lui confère à la fois une capacité de prédiction du comportement futur, comme par exemple de tester un traitement avant de l'administrer au patient (test "*in silico*") mais aussi de prédiction à court terme des effets d'un événement perturbateur sur le monde réel.

Il interagit avec le monde physique grâce aux couches de contrôle, de calcul et de communication qui caractérisent les CPS en général. Pour cela, des réseaux de capteurs doivent être installés dans le monde réel afin de collecter des données qui seront transmises et traitées par le double numérique pour sa synchronisation, si possible en temps réel.

Selon les cas, des actionneurs peuvent agir sur le système physique en terminaison d'une boucle de retour afin d'apporter automatiquement une correction calculée par la couche de contrôle du CPS.

Dans le monde de la santé, cette correction est exclusivement réalisée par le patient lui-même, son médecin, ou un gestionnaire des flux, par une action manuelle et donc humaine (concept de "*human-in-the-loop*") sur une ou plusieurs variables de pilotage du système physique : réglage du débit d'une

[151] Erol, T., Mendi, A.F., Doğan, D. (2020). The Digital Twin Revolution in Healthcare. 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). 1–7.
[152] Galli, G., Patrone, C., Bellam, A.C., Annapareddy, N.R., Revetria, R. (2019). Improving Process Using Digital Twin: A Methodology for the Automatic Creation of Models. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2019. WCECS 2019, 5.
[153] Patrone, C., Galli, G., Revetria, R. (2019). A State of the Art of Digital Twin and Simulation Supported by Data Mining in the Healthcare Sector. IOS Press Ebook, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. Volume 318: Advancing Technology Industrialization Through Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques.
[154] Liu, Y., Zhang, L., Yang, Y., Zhou, L., Ren, L., Wang, F., Liu, R., Pang, Z., Deen, M.J. (2019). A Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin. IEEE Access, 7, 49088–49101.
[155] Augusto, V., Murgier, M., Viallon, A. (2018). A modelling and simulation framework for intelligent control of emergency units in the case of major crisis. 2018 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, Gothenburg, Sweden, 2495–2506. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://ieeexplore.ieee.org/document/8632438.
[156] Voir par exemple https://www.gehccommandcenter.com/digital-twin pour un double numérique d'un hôpital
[157] Voir par exemple https://www.lanner.com/en-us/solutions/digital-twin.html pour un double numérique de processus industriels

pompe à insuline en fonction du taux de glycémie dans le sang (patient), analgésie contrôlée par le patient (infirmière et patient) en fonction du niveau de saturation d'oxygène dans le sang (voir Figure 39), réglage de fréquence et de courant de sortie atriale ou ventriculaire d'un stimulateur cardiaque externe (cardiologue), réglage du nombre de guichets à ouvrir au bureau des entrées de l'hôpital en fonction des arrivées de patients (gestionnaire de flux), etc.

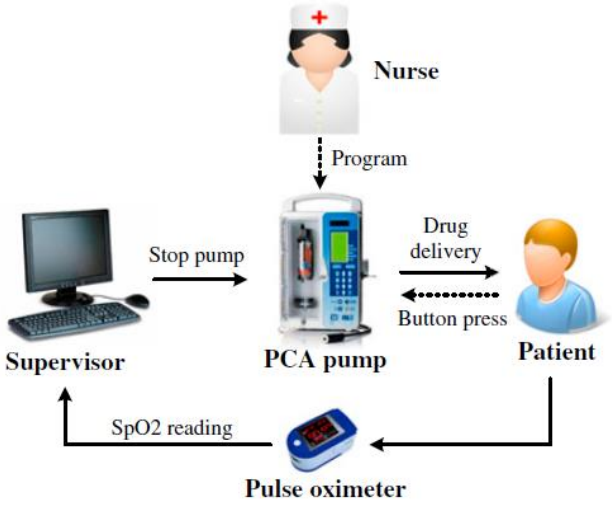


Figure 39 : CPS-S avec boucle de retour. Extrait de (Li *et al.* 2015)[158]

Pour les doubles numériques et CPS développés pour l'industrie, on peut envisager que la boucle de retour commande directement des actionneurs automatiques sans intervention ni contrôle humain. Dans la santé, que ce soit pour des applications médicales ou d'organisation, le cadre légal fixant les responsabilités des professionnels de santé impose que les actions correctives sur la partie physique ne peuvent être réalisées que par un humain. La boucle de retour est donc essentiellement du type "*human-in-the-loop*".

2.5.3. Modèle numérique, ombre numérique, ou double numérique ?

La définition d'un DT est sujette à de multiples interprétations, déclinaisons et controverses sur lesquelles je ne souhaite pas prendre parti en l'absence de tout standard établi et reconnu. Cependant, la classification proposée par (Kritzinger, 2018)[159] a le mérite de distinguer trois sous-catégories de doubles numériques selon le niveau d'intégration des données et elle semble être assez consensuelle puisqu'elle est citée en référence dans près de 1000 autres références :

- Le ***modèle numérique*** (Digital Model, Figure 40) : il n'implique aucune interaction entre les objets physiques et virtuels. Les données numériques des systèmes physiques existants peuvent être utilisées pour le développement de tels modèles, mais tous les échanges de données se font de manière manuelle. Un changement d'état de l'objet physique n'a pas d'effet direct sur l'objet numérique et inversement.

[158] Li, T., Cao, J., Liang, J., Zheng, J. (2015). Towards context-aware medical cyber-physical systems: design methodology and a case study. Cyber-Physical Systems, 1(1), 5–23.
[159] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022.

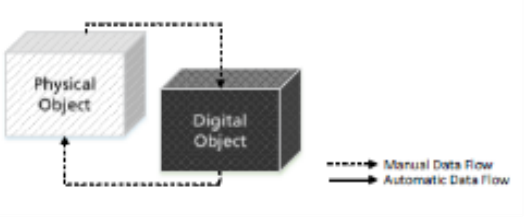


Figure 40. Modèle numérique.
(Tiré de Kritzinger, 2018)

- L'***ombre numérique*** (Digital Shadow, Figure 41) : Ici, seul l'objet physique envoie des données et met à jour l'objet virtuel. Il comprend la maquette numérique, les protocoles d'acquisition de données et le logiciel de simulation pour simuler la maquette numérique. Dans ce cas, l'interaction entre les modèles cyber et les objets physiques est monodirectionnelle.

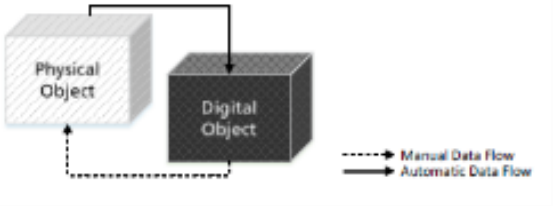


Figure 41. Ombre numérique
(Tiré de Kritzinger, 2018)

- Le ***double numérique*** (Digital Twin, Figure 42) : L'ombre numérique ne peut devenir un double numérique complet que lorsqu'une connexion vers le système réel est réalisée, donc lorsque le flux de données est bidirectionnel du système réel vers le DT et vice versa.

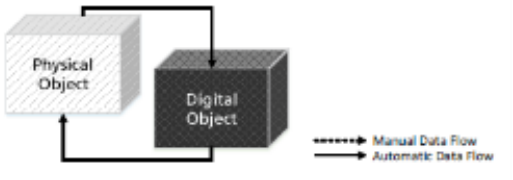


Figure 42. Double numérique
(Tiré de Kritzinger, 2018)

Même si une telle classification permet de caractériser et de distinguer ce qui peut s'apparenter à un modèle de simulation "*classique*" (Digital Model) ou à un DT-CPS, elle ne fait pas référence à deux aspects qui me semblent déterminants : (1) l'initialisation du modèle, de l'ombre ou du double, et (2) la synchronisation et le facteur de temps entre l'objet physique réel et l'objet virtuel. Par exemple, le modèle numérique peut très bien utiliser des données très "fraiches" et figées,

disponibles sur une copie de la base de données de production à laquelle il est automatiquement connecté, dans le but de lancer manuellement des simulations "off-line" par rapport au système réel, avec un ratio de temps très élevé, et en partant d'un état initial vide. Durant cette simulation en temps accéléré, qui pourra ne durer que quelques secondes, il n'y aura effectivement pas d'actualisation des données, puisque ce n'est pas vraiment utile dans ce cas. S'agissant de l'ombre numérique ou du double numérique, cette publication ne précise pas comment se fait leur initialisation et leur synchronisation avec le monde réel, ce qui me semble être propice à diverses interprétations.

L'ombre numérique peut permettre de suivre ou de monitorer en temps synchrone les évolutions du système réel. Le modèle numérique peut de son côté, permettre de simuler en temps asynchrone et ainsi prédire les évolutions dans le futur proche, à condition de pouvoir s'initialiser sur l'état courant du système réel. Enfin, le DT est le composant de simulation qui est intégré à un CPS en ayant, en plus des capacités du modèle numérique et de l'ombre numérique, une capacité de proposer au décideur humain des reconfigurations du processus physique ou de son système de pilotage permettant de les optimiser. Mais peut-on imaginer un modèle numérique ou une ombre numérique dépourvus d'un minimum de résultats de sortie à proposer à un décideur ? Je suis donc pour ma part un peu dans le doute sur la pertinence de cette typologie.

Je souhaite exprimer mon point de vue et définir ce que j'entends par DT et CPS dans le cadre de mes travaux. Je ne vois pas d'inconvénient à regrouper sous le vocable de double numérique (DT) à la fois le modèle numérique et l'ombre numérique. À partir du moment que l'on dispose d'un modèle numérique permettant de simuler le comportement du système réel (à la fois le processus physique et son processus de pilotage) de façon fidèle et réaliste par rapport aux objectifs fixés, je considère qu'il s'agit d'un double numérique, même s'il ne dispose pas d'une connexion bidirectionnelle et en temps réel avec le monde réel.

2.5.4. De la simulation au double numérique, rétrospective de 30 ans de recherche dans l'aide à la décision pour le pilotage en temps réel

Au début des années 1990, Catherine Harmonoski, chercheuse au département Industrial Engineering de la Penn State University, énonce les problèmes opérationnels à résoudre afin d'utiliser les langages de simulation à événements discrets comme outils d'aide à la décision en temps réel, notamment dans le domaine de l'ordonnancement des systèmes flexibles de production manufacturière (Harmonosky 1990)[160] (Harmonosky 1995)[161]. Elle décrit alors deux modes de simulation, (1) "monitoring" et (2) "look-ahead", à associer pour former un outil d'aide à la décision en temps-réel.

Si la description qu'elle donne de la ***simulation "look-ahead"*** correspond à une utilisation classique, celle de la ***simulation "monitoring"*** est très originale à l'époque de ses publications car elle nécessite d'être connectée au système physique et contrôlée par des signaux provenant du système réel. Ceci peut sembler naturel aujourd'hui avec l'avènement des capteurs et de l'IoT, mais cela a dû être une véritable révolution en 1990, époque où le monde des automaticiens et celui du

[160] Harmonosky, C.M. (1990). Implementation issues using simulation for real-time scheduling, control, and monitoring. Dans Winter Simulation Conference Proceedings, 1990. Winter Simulation Conference Proceedings, 1990. 595-598.
[161] Harmonosky, C.M. (1995). Simulation-based real-time scheduling: review of recent developments. Dans Winter Simulation Conference Proceedings, 1995. Winter Simulation Conference Proceedings, 1995. 220–225.

génie industriel étaient encore assez peu perméables l'un à l'autre. Je retiens notamment cette courte phrase tirée de la publication de Catherine Harmonoski en 1990 dans la Winter Simulation Conference "… *la simulation (monitoring) reflétera toujours l'état actuel du système et surveillera en fait le système*…". Si l'on remplace "simulation" par "double numérique" dans cette phrase, il me semble qu'elle pourrait sans problème figurer en première place chronologique dans la trentaine de définitions du double numérique recensées depuis 2012 par (Semeraro *et al.* 2021)[162].

Par ailleurs, elle indique que lorsqu'une décision de pilotage doit être prise avec la simulation, celle-ci doit démarrer dans un état initial qui est celui du système réel avant d'être lancée en mode "*look-ahead*" pour évaluer les impacts futurs grâce à l'analyse des rapports statistiques. Pour cela, la simulation doit comporter deux modes : (1) un mode "*monitoring*" qui correspond à une simulation qui est connectée et mise à jour continuellement par le système réel et (2) un mode "*aide à la décision*" ou "*look-ahead*", plus classique, permettant d'évaluer les différentes options de pilotage. Les principaux problèmes énoncés pour développer un tel système d'aide à la décision en temps réel sont :

- Être connecté au système réel.
- Sauvegarder des informations de la simulation en temps réel à chaque fois qu'il faut évaluer une décision.
- Disposer d'options de pilotage a priori.
- Avoir une structure de modèle spécifique.
- Disposer d'un mode d'aide à la décision permettant de comparer les alternatives.
- Pouvoir alterner simulation en mode "*monitoring*", et simulation en mode "*look-ahead*". J'ai travaillé sur ce problème particulier durant la thèse de Samieh Mirdamadi en faisant le choix d'utiliser un même modèle capable de passer alternativement d'un mode à l'autre (Mirdamadi 2009)[163]. Catherine Harmonosky indique aussi qu'une solution possible serait de "copier" la simulation "*monitoring*" à l'instant où la décision doit être prise dans la simulation en mode "*look-ahead*", pendant que la simulation en mode "*monitoring*" continue de fonctionner en parallèle. Cela correspond sensiblement à ce qu'Olivier Cardin a développé dans sa thèse en faisant appel au concept d'observateur (Cardin 2007)[164]. C'est aussi l'option que j'ai retenue dans le cadre des travaux plus récents de la thèse d'Abdallah Karakra (Karakra 2021)[165].

Tous ces problèmes sont toujours d'actualité aujourd'hui pour qui souhaite travailler sur le développement opérationnel d'un double numérique pour le pilotage en temps réel d'un système de production. Même si ses deux publications dans une conférence annuelle pourtant très réputée (WSC) n'ont pas eu l'impact de publications plus récentes d'autres chercheurs, je considère pour ma part que Catherine Harmonosky est la mère fondatrice du double numérique à base de

[162] Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. Computers in Industry, 130, 103469.

[163] Mirdamadi, S. (2009). Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution. Thèse de doctorat, phd, . [En ligne]. Disponible à l'adresse : http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000869/

[164] Cardin, O. (2007). Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production : application à un système flexible de production. Thèse de doctorat, These de doctorat, Nantes. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.theses.fr/2007NANT2088.

[165] Karakra, A. (2021). HospiT'Win : designing a discrete event simulation-based digital twin for real-time monitoring and near-future prediction of patient pathways in the hospital. Thèse de doctorat, These de doctorat, Ecole nationale des Mines d'Albi-Carmaux. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.theses.fr/2021EMAC0005.

simulateur à événements discrets. Elle a présenté beaucoup de concepts qui me semblent être toujours des fondamentaux aujourd'hui, alors qu'elle les a développés en s'appuyant sur ce qui, à l'époque, constituait la seule voie de la simulation à événements discrets : l'utilisation de langages informatiques généraux (C, Fortran, etc.) ou d'autres plus spécifiques à la simulation (Siman, Slam II, GPSS, etc.).

Plus de trente ans après, je ne peux que constater et regretter que les outils modernes de simulation proposés par de multiples éditeurs commerciaux, bien qu'ils soient plus accessibles aux experts métiers grâce à un environnement de modélisation visuel et interactif, n'intègrent pas de fonctions de "*monitoring*" et plus globalement d'aide à la décision en temps réel. Ces logiciels ont beaucoup progressé en termes de visualisation 3D et d'interfaces utilisateurs, mais ils sont tous tournés exclusivement vers la simulation "*look-ahead*", même si commercialement, beaucoup revendiquent leur capacité à construire des doubles numériques pour la prédiction. J'ai des relations assez privilégiées depuis de nombreuses années avec les distributeurs français de deux éditeurs de simulation qui sont certainement parmi les plus utilisés dans le monde : Witness, et FlexSim. Je discute régulièrement avec eux pour leur présenter mes travaux et mes besoins techniques, et je participe aux clubs des utilisateurs où je rencontre de nombreux industriels utilisateurs de ces outils de simulation. Même si je sens qu'il y a un frémissement et un intérêt pour le double numérique depuis quelques années, ces éditeurs ne sont pas encore prêts à développer des fonctionnalités propres à des simulations de "*monitoring*" ou d'aide à la décision en temps réel. La seule possibilité offerte à celui qui souhaite s'y hasarder est de faire appel à des développements spécifiques dans le langage du logiciel de simulation (FlexScript, ou API Witness-Simba pour les deux logiciels cités). L'expérience que j'ai avec ces deux outils me permet de faire ressortir en particulier deux des problèmes identifiés par Catherine Harmonosky et qui sont toujours d'actualité avec l'émergence des doubles numériques :

- La possibilité de se connecter au système réel : FlexSim propose un module d'émulation facilitant l'accès à des données disponibles sur un automate programmable (PLC) ou un serveur OPC UA par exemple, mais Witness n'a rien de tel, hormis via des connexions à des bases de données ODBC.
- L'alternance entre simulation "*monitoring*" et simulation "*look-ahead*" : Witness dispose d'une fonction de sauvegarde/ouverture du modèle et de son état qu'il est possible d'activer via une requête API. De leur côté, les développeurs de FlexSim ont arrêté de maintenir cette fonction assez complexe qui était pourtant présente dans leur outil, mais pratiquement pas utilisée selon eux.

(Manivannan, Banks 1991)[166] et plus récemment (Tavakoli *et al.* 2008)[167] ont fait évoluer les concepts établis par Catherine Harmonosky. Tavakoli présente un cadre générique qui marque aussi une évolution sémantique puisqu'il ne parle plus d'outil d'aide à la décision en temps réel, mais de ***simulation "temps réel***". L'autre point important de cette publication est un domaine applicatif étendu au système de santé et pas seulement à l'ordonnancement d'ateliers manufacturiers. Il souligne notamment la difficulté à disposer de données pour suivre les patients.

[166] Manivannan, S., Banks, J. (1991). Real-time control of a manufacturing cell using knowledge-based simulation. Dans 1991 Winter Simulation Conference Proceedings. 1991 Winter Simulation Conference Proceedings. 251–260.
[167] Tavakoli, S., Mousavi, A., Komashie, A. (2008). A generic framework for real-time discrete event simulation (DES) modelling. Dans 2008 Winter Simulation Conference. 2008 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, Miami, FL, USA, 1931–1938.

(Hanisch *et al.* 2005)[168] décrit la problématique de l'initialisation de modèles de simulation temps réel appelée ici ***simulation "online"*** en présentant les deux options possibles :

1. *Initialisation d'un modèle enfant obtenu à partir d'un modèle parent du système réel.* Les auteurs précisent que cette option nécessite de disposer d'un logiciel de simulation capable de créer une copie du modèle et de la simulation en cours et de lancer cette copie de façon indépendante en accéléré. C'est une approche possible avec eM-Plant[169] ou avec Witness comme indiqué plus haut. Cependant, les auteurs distinguent une autre approche qui consiste à émuler le modèle enfant à l'intérieur du modèle parent. Cette approche nécessite que le logiciel de simulation soit capable de faire reculer le temps de simulation et de basculer entre différents mécanismes d'avance dans le temps, ce qui correspond à exécuter des simulations dites imbriquées ("*nested simulation*"). Cela semble être possible avec le logiciel MathWorks Simulink (SLX)[170] et c'est une piste technique que j'aimerais évaluer prochainement.
2. *Initialisation par génération d'un modèle dans un état initial correspondant aux données disponibles.* C'est l'option qu'Abdallah Karakra a utilisé pour ses travaux de thèse avec le logiciel FlexSim en s'appuyant sur des données disponibles dans une base de données MySQL alimentée par des capteurs du monde réel. Il faut pour cela que le logiciel dispose de fonctionnalités d'accès à une telle base de données, et par ailleurs d'autres fonctions permettant d'initialiser l'état des éléments du modèle (files d'attente, processeurs) avec ces données. Cela est proposé parfois sous la forme de fichiers d'initialisation à charger à l'ouverture du modèle (voir par exemple les fichiers *.sta de Witness).

(Aydt *et al.* 2008)[171] a introduit le paradigme de ***simulation "symbiotique"***, par analogie avec la symbiose biologique. Cette simulation est très proche du concept du double numérique. En effet, les auteurs mettent l'accent sur une relation étroite entre un système de simulation et un système physique qui est mutuellement bénéfique pour les deux. Le système de simulation bénéficie de mesures en temps réel du système physique, fournies en continu par des capteurs. Ces mesures sont utilisées pour initialiser et piloter des simulations très précises du système physique. À son tour, le système physique bénéficie de sa symbiose avec le système de simulation à partir de décisions prises en temps "quasi réel". La prise de décision est basée sur le résultat d'expériences de simulation qui impliquent la simulation de plusieurs scénarios, chacun représentant une alternative de décision différente.

Je tiens à souligner aussi le travail très récent et très intéressant de (Onggo *et al.* 2021)[172] qui, avec une publication intitulée "*Combining symbiotic simulation systems with enterprise data storage systems for real-time decision-making*" ont le courage de résister au courant de pensée actuel en

[168] Hanisch, A., Tolujew, J., Schulze, T. (2005). Initialization of online simulation models. Dans Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005. 9 pp.-.
[169] https://www.plm.automation.siemens.com/global/fr/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html
[170] https://fr.mathworks.com/solutions/discrete-event-simulation.html
[171] Aydt, H., Turner, S.J., Cai, W., Low, M.Y.H. (2008). Symbiotic Simulation Systems: An Extended Definition Motivated by Symbiosis in Biology. Dans 2008 22nd Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation. 2008 ACM/IEEE/SCS Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation (PADS). IEEE, Roma, Italy, 109–116..
[172] Onggo, B.S., Corlu, C.G., Juan, A.A., Monks, T., de la Torre, R. (2021). Combining symbiotic simulation systems with enterprise data storage systems for real-time decision-making. Enterprise Information Systems, 15(2), 230–247.

ayant choisi un titre ne contenant pas le terme "*digital twin*", alors qu'ils indiquent explicitement dans leur texte que la simulation symbiotique est en fait un double numérique.

Ce survol de la littérature du début des années 1990 jusqu'à aujourd'hui me conforte dans l'idée que le terme "*digital twin*", dont l'origine remonte à 2012, est de nos jours largement utilisé et permet d'essaimer des concepts et des paradigmes apparus bien avant, mais avec beaucoup moins de retentissement.

Personnellement, cela ne me pose aucun problème, et je ne veux pas rajouter un bruit de fond inutile pour tenter de défendre ce qui est, ou n'est pas, un double numérique. La médiatisation de ce terme faisant qu'il est aujourd'hui sans doute beaucoup plus parlant pour de nombreuses personnes dans de nombreux secteurs d'activité, je reconnais parler moi- même de "double numérique" pour décrire une simulation "offline" d'un système réel, mais sans connexion en temps réel, dans le but de comparer différents scénarios d'amélioration par exemple. Dans ce cas, le double numérique se limite à reproduire de façon aussi fidèle que possible, mais totalement asynchrone, le comportement d'un système réel à des fins de projection ou de prospection, sans nécessairement être connecté en temps réel à ce système réel. Cependant, il est certain que si l'objectif est de piloter le système réel, et de prédire son évolution future, une connexion avec le double numérique est indispensable.

Plutôt que de chercher à fixer des frontières entre simulation, CPS, et double numérique, je pense qu'il est plus important de bien expliquer l'utilisation ou les finalités que l'on vise. Dans la section suivante, je détaille donc quelques critères sur lesquels je m'appuierai pour présenter la suite de mes travaux.

2.5.5. Typologie des doubles numériques à base de simulation à événements discrets

Mes travaux passés et futurs portent sur des DT à base de simulation à événements discrets, voire sur des DT-CPS, tous destinés à répliquer un processus de production de biens ou de soins. Ma réflexion personnelle conduit à définir une typologie de ces DT et DT-CPS à base de simulation à événements discrets, uniquement destinée à clarifier mes perspectives de recherche. Cinq critères principaux me semblent importants à distinguer :

1. **La connexion et la synchronisation avec les événements du monde réel** : le double numérique est-il connecté aux événements du monde réel lors de son initialisation ET de façon synchrone durant le déroulement d'une simulation ? si oui, on le qualifiera de "***on-line***" ou "temps réel" ou "synchrone", si non, il sera "***off-line***" ou "asynchrone".
2. **La "fraicheur" des données utilisées** : Les données utilisées par le double numérique au moment de son initialisation sont-elles issues d'une base de données de production qui s'actualise en temps réel selon les événements du monde réel ? Si oui, on indiquera "***1***". Ou sont-elles "anciennes", c'est-à-dire que le double numérique utilise une base de données ou une extraction de données qui n'est pas actualisée en permanence par les événements du monde réel. Si oui, on indiquera "***0***".
3. **Le mode d'initialisation** : Le double numérique est-il initialisé dans le même état que l'état courant du monde réel ? Si oui, il s'agit d'une initialisation que l'on qualifiera de "***similaire***". Ou est-il initialisé dans un état "vide" et "nul", ou dans un état "stable" après une période de montée en régime ? Si oui, cette initialisation sera qualifiée de "***dissemblable***".

4. **Le ratio temps réel / temps simulé** : Le double numérique s'exécute-t-il en un temps accéléré par rapport au temps réel ? Si oui, on indiquera "***>>0***". Ou s'exécute t'il en temps réel ? Si oui, on indiquera "***1***".
5. **Le type de simulation** : Le double numérique permet-il de lancer des simulations dans un futur plus ou moins lointain, et permettant soit d'évaluer le comportement futur du monde réel actuel (processus As-Is), soit d'évaluer les effets de modifications pouvant être apportées (processus To-Be) ? Si oui, on qualifiera cette simulation de "***prospective***". Ou le double numérique permet-il de "rejouer" le comportement passé du monde réel actuel ? Si oui, on qualifiera cette simulation de "***replay***". Ou le double numérique permet-il de lancer des simulations permettant de prédire l'état futur du monde réel ? Si oui, on qualifiera cette simulation de "***prédictive***". Ou le double numérique permet-il de suivre en temps réel le comportement du monde réel ? Si oui, on qualifiera cette simulation de "***monitoring***".

Le Tableau 21 présente quatre types de simulation à base de double numérique établis à partir de ces critères.

Tableau 21. Typologie des doubles numériques (DT) à base de simulation à événements discrets

	Connexion avec le monde réel	Fraicheur des données	Initialisation	Ratio temps réel / temps simulé	Type de simulation
DT	OFF-line	0	dissemblable	>>0	prospective
DT	OFF-line	0	dissemblable	>>0	replay
DT-CPS	OFF-line	1	similaire	>>0	prédictive
DT-CPS	ON-line	1	similaire	1	monitoring

- Les deux premiers types de simulation, que je range dans la catégorie "DT", correspondent à des usages de la simulation tels qu'on les connait depuis toujours (la simulation "look-ahead" décrite par Catherine Harmonosky), hormis peut-être le type "replay" qui s'apparente à ce que font certains outils de fouille de processus (Process Mining) en rejouant un fichier de traces passées. Cette possibilité de fusionner la fouille de processus avec la simulation à événements discrets, que l'on peut qualifier de "*data-driven modelling and simulation*" est d'ailleurs un développement technique sur lequel j'aimerais travailler prochainement. En effet, la construction et la validation d'un modèle de simulation constituent toujours une phase critique en termes de temps passé et de niveau de détail du modèle. Une question de recherche qui me semble intéressante pour la modélisation est : Comment transformer un graphe obtenu via un algorithme de fouille de processus en un modèle de simulation exécutable ? Et une autre question plus axée sur la simulation : Quel est l'apport de la simulation dans la fouille de processus pour le diagnostic organisationnel et l'amélioration ?

Deux finalités de ces doubles numériques sont d'aider (1) au diagnostic organisationnel de processus de production existants, et (2) à la recherche de solutions d'amélioration.

- Les deux derniers types de simulation, prédictive et monitoring, appartiennent à la catégorie "DT-CPS" (CPS à base de DT) selon la définition donnée par (Lee *et al.* 2020)[173] déjà présentée plus haut dans la section 2.3.3. Ils sont essentiellement destinés au pilotage en temps réel d'un système de production. Même si je continuerai à travailler indistinctement sur des DT ou des DT-CPS, le projet de recherche que je vais développer par la suite s'intéresse essentiellement au pilotage prédictif, et donc s'appuie sur cette dernière catégorie.

La Figure 43 illustre sur un chronogramme le fonctionnement des deux premiers types de DT pour des simulations prospectives ou replay. À t_{1r}, un événement déclencheur permet de figer les données de production issues directement de capteurs ou d'applications informatiques dans une copie de la base ou sous la forme d'une extraction des données "à plat" (fichier csv par exemple). On peut voir sur l'échelle du temps réel que les données utilisées pour la simulation ne sont pas fraiches puisqu'elles datent de t_{1r}, alors que la simulation est lancée à t_{2r}. Sur l'échelle du temps simulé, l'initialisation se fait de façon asynchrone, en démarrant dans un état quelconque, qui peut être vide ou stabilisé dans un état donné après une période de montée en régime à définir. La simulation est lancée en temps accéléré avec un ratio $(t_{ir} - t_{2r}) / (t_{is} - t_{2s})$ de façon à obtenir à t_{is} une projection du monde réel à t_{ir}.

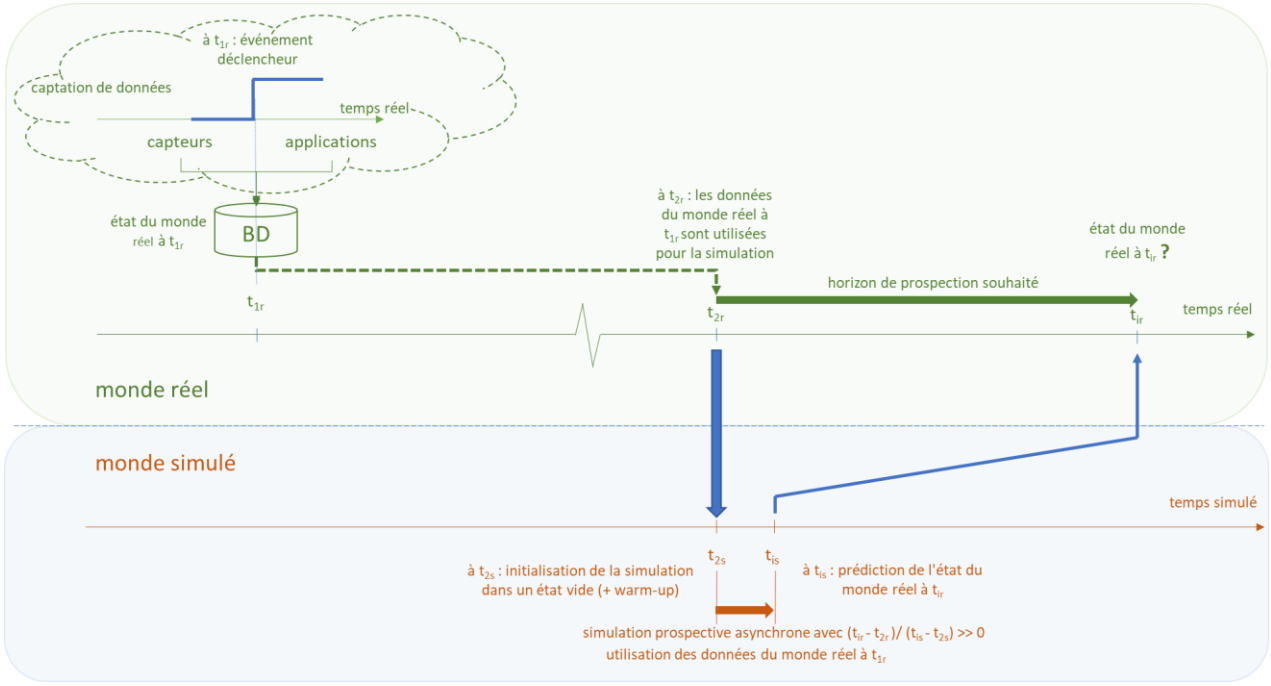


Figure 43. DT avec simulation prospective ou replay, connexion off-line, et initialisation asynchrone

[173] Lee, J., Azamfar, M., Singh, J., Siahpour, S. (2020). Integration of digital twin and deep learning in cyber-physical systems: towards smart manufacturing. IET Collaborative Intelligent Manufacturing, 2(1), 34–36.

La Figure 44 illustre le troisième type de DT, qui est un CPS à base de DT (DT-CPS) destiné à des simulations prédictives.

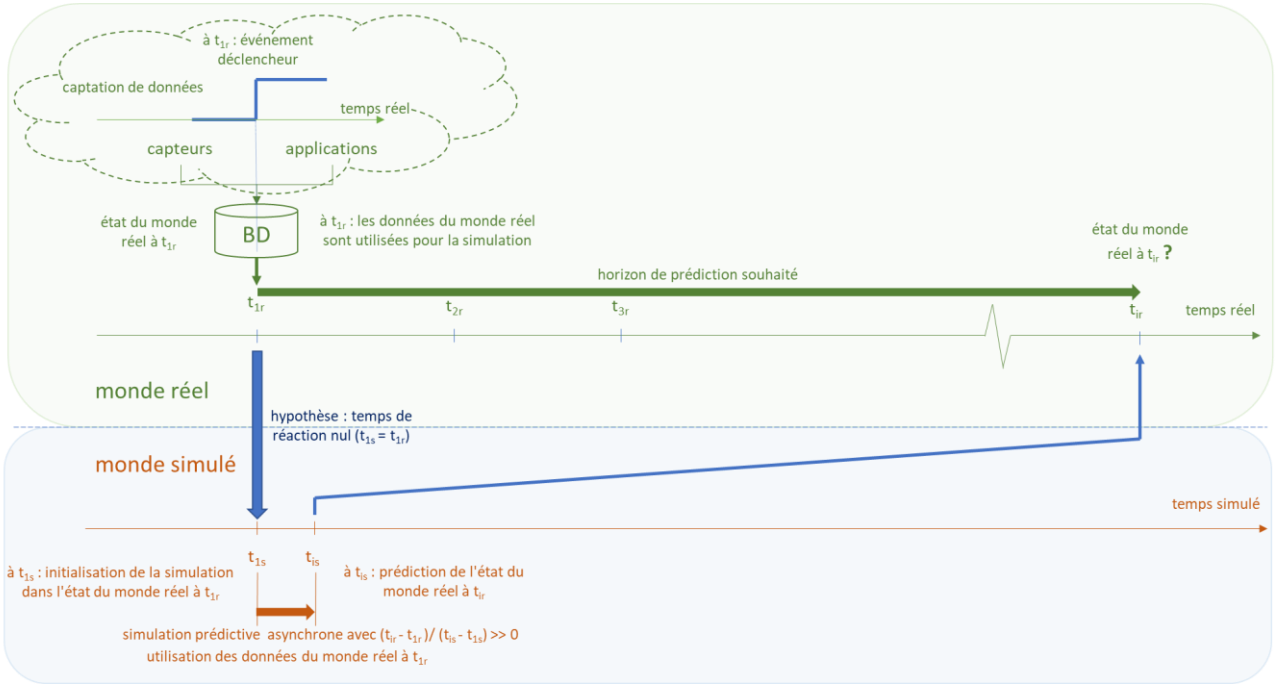


Figure 44. DT-CPS avec simulation prédictive, connexion off-line, et initialisation synchrone

Comme on peut le voir sur l'échelle de temps réel, l'apparition d'un événement déclencheur à t_{1r} dans le monde réel entraine un rafraîchissement des données et une initialisation synchrone du double numérique à t_{1s} dans l'état courant du monde réel avec, pour simplifier l'illustration, un temps de réaction nul. Une simulation prédictive est ensuite exécutée avec des données fraiches datant de t_{1r}, et en temps accéléré avec un ratio $(t_{ir} - t_{1r}) / (t_{is} - t_{1s})$ jusqu'à t_{is} permettant d'obtenir une prédiction de l'état du monde réel à t_{ir}.

Enfin, la Figure 45 illustre un DT-CPS destiné à des simulations on-line de suivi ou monitoring du monde réel, à la façon d'un "observateur" comme le propose (Cardin 2007)[174] dans sa thèse et (Cardin, Castagna 2009)[175]. On peut voir que chaque événement déclencheur (ou plutôt synchroniseur dans ce cas) du monde réel entraine une initialisation synchrone du double numérique (ici à t_{1r}), s'il n'était pas déjà activé, ou une synchronisation du double numérique avec l'événement courant du monde réel (ici à t_{2r}, t_{3r}, …, t_{ir}), grâce à une connexion on-line qui est maintenue en permanence entre le monde réel et le double numérique. Les données du monde réel sont ainsi rafraichies à chaque synchronisation d'événement, ce qui permet au double numérique d'avoir un comportement qui évolue en dynamique selon les évolutions du monde réel. Entre deux

[174] Cardin, O. (2007). Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production : application à un système flexible de production. Thèse de doctorat. [En ligne]. Disponible à l'adresse : http://www.theses.fr/2007NANT2088/document.
[175] Cardin, O., Castagna, P. (2009). Using online simulation in Holonic Manufacturing Systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22(7), 1025–1033.

synchronisations, le double numérique simule en temps réel un comportement prédictif basé sur le comportement passé, mis à jour à chaque synchronisation. C'est ce qu'Abdallah Karakra a présenté dans sa thèse en parlant de "distributions dynamiques" pour modéliser les phénomènes aléatoires, par opposition aux "distributions statiques" qui sont figées et ne permettraient pas au double numérique de s'aligner continuellement sur le comportement du monde réel.

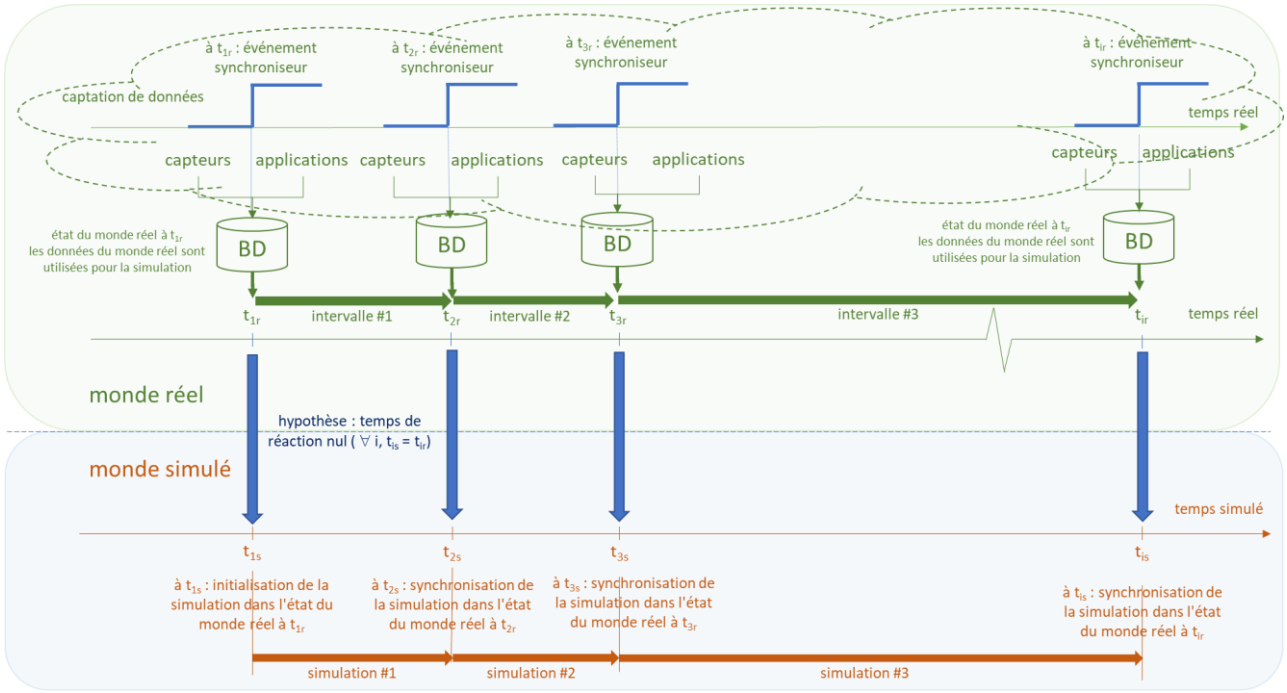


Figure 45. DT-CPS avec simulation de suivi (monitoring), connexion on-line, et initialisation synchrone

2.5.6. Exemple illustratif de l'impact de l'initialisation sur la prédiction à court terme

Dans cet exemple, l'objectif est de mettre en évidence un aspect qui me semble peu évoqué dans la littérature concernant l'initialisation du double numérique, et que je distingue de la synchronisation. En effet, la synchronisation doit se produire sur des occurrences d'événements dans le monde réel et devant être préalablement identifiées. Par exemple, l'entrée ou la sortie d'un patient d'une salle d'attente, le début ou la fin d'une prise en charge, etc. Pour que le double numérique soit synchrone et dans un état proche de celui du monde réel, il faut que le délai de synchronisation soit le plus bref possible relativement à la fréquence d'apparition des événements dans le monde réel : plus les événements sont fréquents sur une même période de temps, plus l'exigence d'un délai de synchronisation court doit être forte afin de maintenir la cohérence entre monde réel et double numérique. La synchronisation du double numérique va se faire "au fil de l'eau", événement après événement, et il est peu probable d'avoir deux événements se produisant exactement au même instant.

L'initialisation consiste quant à elle à amener le double numérique dans un état similaire à l'état du monde réel. S'agissant du double numérique on-line synchrone pour le suivi (monitoring), le délai nécessaire à l'initialisation est peu critique et l'on peut accepter une sorte de "période de montée en

régime" plus ou moins longue durant laquelle le double numérique va progressivement converger vers l'état du monde réel. Par contre, pour le double numérique asynchrone prédictif, il faut que ce délai d'initialisation tende si possible vers zéro, comme pour le délai d'exécution de chaque simulation prédictive sur un horizon donné. Dans la suite, je fais l'hypothèse que le délai d'initialisation est nul, tout en étant conscient qu'il peut s'agir d'un véritable verrou technique et scientifique.

Cette hypothèse (forte) étant fixée, l'autre point que je voudrais soulever ici concerne l'état initial du double numérique pour exécuter des simulations prédictives. Par défaut, tous les simulateurs à événements discrets démarrent une simulation avec un modèle initialisé à t=0 dans un état "nul" et "vide" : les "machines" (ou "processeurs") sont toutes disponibles et les files d'attente sont vides (aucun "produit" n'est présent dans le processus). En supposant que le simulateur utilisé peut techniquement initialiser le modèle dans un état non nul et non vide, une question de recherche me semble prédominer : quel est l'impact de l'état initial du modèle sur les résultats fournis par une simulation prédictive ?

Pour illustrer cette question, et apporter quelques pistes de réponse, je propose d'étudier des simulations prédictives du processus de référence présenté sur la Figure 46. Dans ce processus très simple, la machine INSPECT tombe en panne selon un MTBF qui suit une distribution normale de moyenne 160 minutes et d'écart type 10 minutes. Les pannes ont une durée qui suit une distribution uniforme comprise entre 5 et 20 minutes.

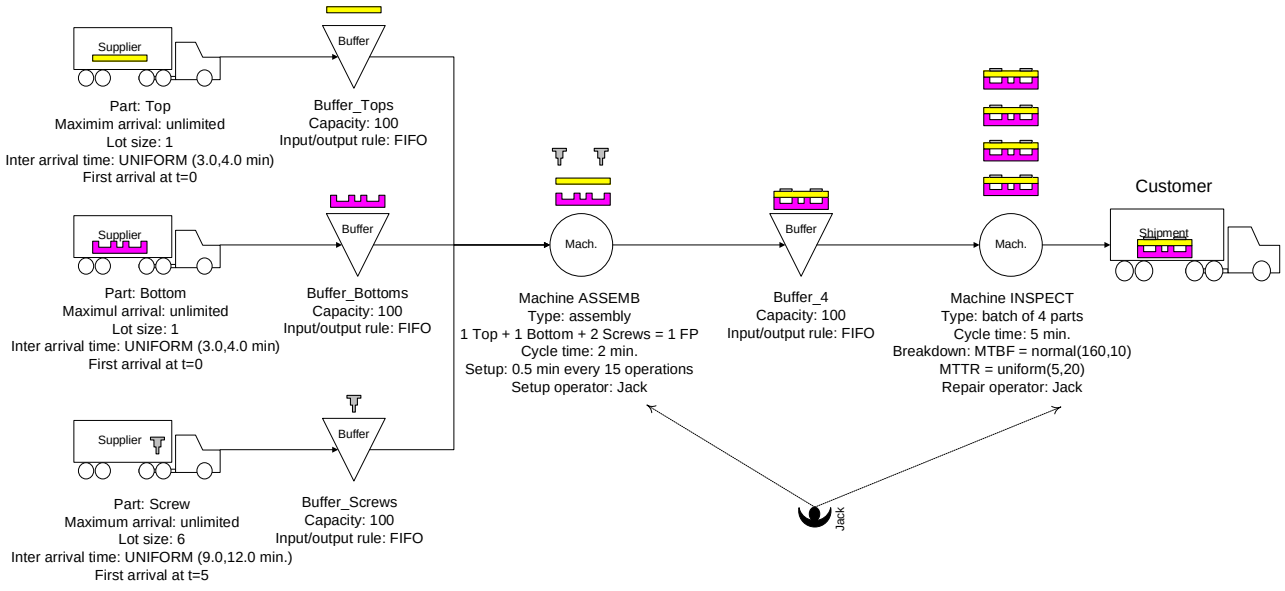


Figure 46. Processus de référence

Supposons que dans ce processus, l'événement déclencheur d'une simulation prédictive corresponde à la fin d'une panne sur la machine INSPECT. En termes plus opérationnels, le pilote de ce processus aimerait savoir quel sera l'impact d'une panne après 2 heures, 4 heures ou 8 heures suivant la réparation. L'impact est arbitrairement évalué par le nombre d'articles présents dans chaque stock et par l'état courant de chaque machine (1 = disponible, 2 = occupée, 3 = en réglage

ou en panne). D'autres indicateurs pourraient être utilisés, notamment pour disposer aussi des valeurs moyennes, mini et maxi des stocks, ainsi que par le pourcentage de temps passé par les machines dans chaque état sur l'horizon de simulation.

Les valeurs de ces indicateurs sont relevées sur deux simulations prédictives ayant chacune un état initial différent de celui du processus de référence :

1. Initialisation dans un état vide et nul.
2. Initialisation dans un état stable au début du jour #4 de production.

Ces deux simulations prédictives sont alors déclenchées par la fin d'une panne sur la machine INSPECT du processus de référence, avec un horizon de simulation de 2 heures, 4 heures et 8 heures, et exécutées sur une durée réelle de moins d'1 seconde.

L'état du processus de référence est relevé à la fin d'une panne de la machine INSPECT. Puis il est relevé après 2 heures, 4 heures et 8 heures de production. Ces valeurs correspondent donc à celles que l'on souhaiterait atteindre à l'issue des simulations prédictives.

Les niveaux des stocks sont présentés sur le graphique de la Figure 47. Le tracé bleu représente les valeurs du processus de référence, le tracé orange les valeurs obtenues avec une initialisation dans un état "vide" et "nul" de la simulation prédictive, et le tracé gris les valeurs obtenues avec une initialisation dans un état stable.

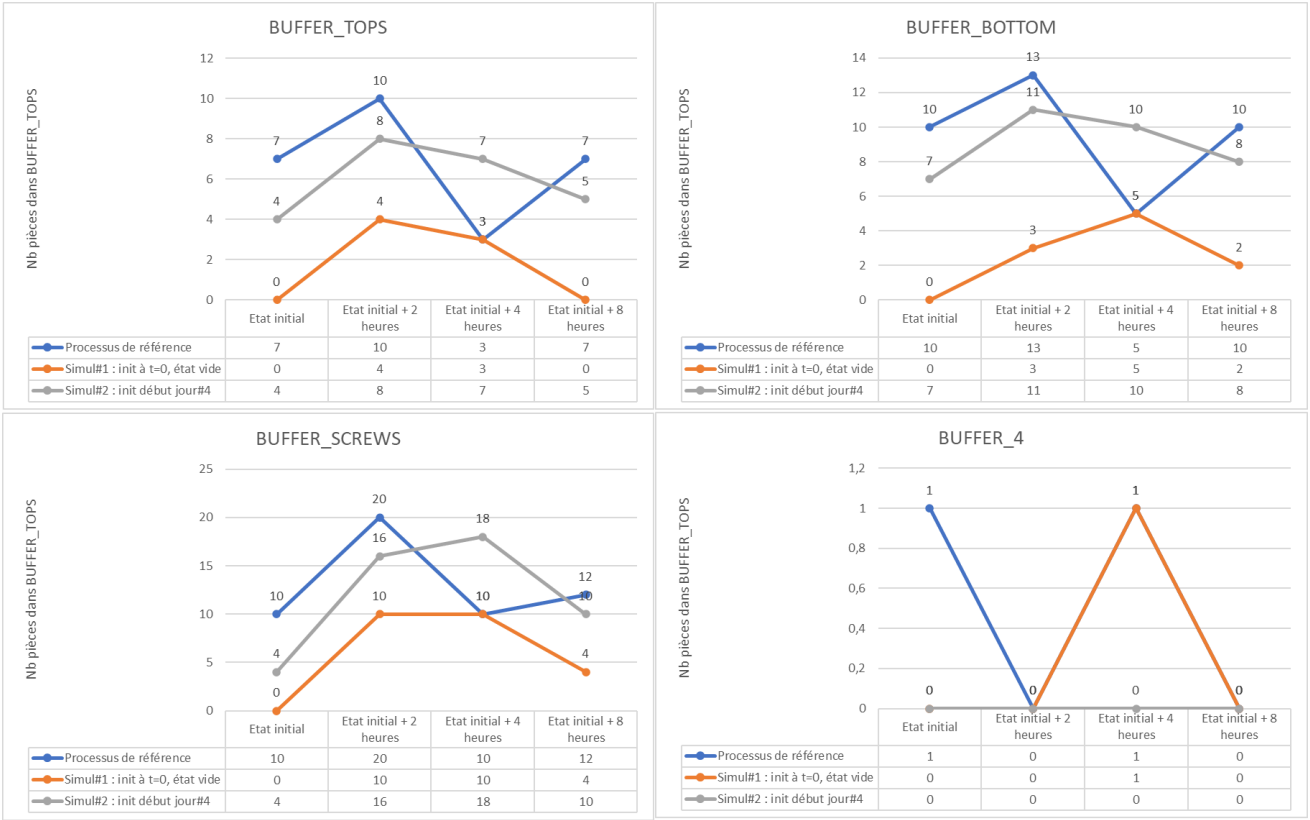


Figure 47. Niveau des stocks dans l'état initial et après 2 heures, 4 heures et 8 heures

Enfin, les graphiques de la Figure 48 illustrent l'état initial des deux machines et après 2 heures, 4 heures et 8 heures de production.

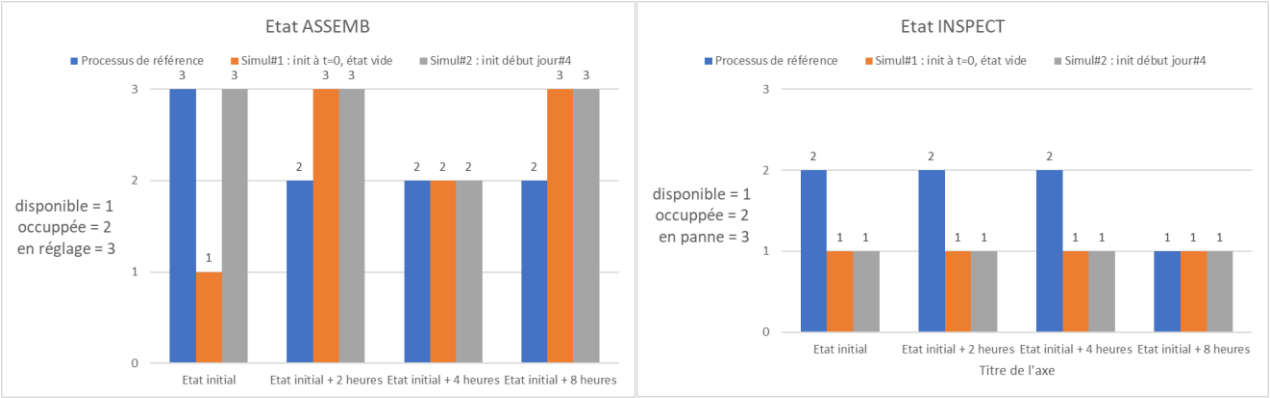


Figure 48. État initial des machines et après 2 heures, 4 heures et 8 heures

Comme on peut le constater, les deux simulations prédictives, menées chacune à partir d'un état initial différent, et différent de l'état initial du processus de référence, ne convergent pas vers l'état du processus de référence, quel que soit l'horizon de simulation.

Sans pouvoir généraliser à partir de cet exemple très élémentaire et trop réducteur, il me semble toutefois pertinent d'approfondir cette question en menant dans le futur proche des travaux plus poussés, à la fois concernant le processus d'initialisation du double numérique, et aussi concernant l'état initial dans lequel doit se trouver le modèle de simulation prédictif pour garantir l'obtention d'un état à court terme qui soit le plus proche possible de l'état futur du monde réel. Cet état futur dépend non seulement de la cohérence du modèle prédictif avec le comportement dynamique du monde réel, mais aussi de l'état initial du modèle prédictif comme je viens de le montrer. Dans le prolongement des travaux de thèse d'Abdallah Karakra, je souhaite continuer à investiguer ces deux aspects du double numérique pour la prédiction, que ce soit dans le cadre d'une prochaine thèse ou d'un travail mené par un post-doctorant.

2.6. Avoir une image fiable de la situation courante avec un centre de commande hospitalier

2.6.1. La localisation et les mouvements patients, un point faible du SIH ?

J'aimerais revenir sur la cartographie fonctionnelle d'un SIH présentée précédemment dans la section 2.3 (voir la Figure 31). Par rapport à mon projet de recherche, cette cartographie m'interpelle pour plusieurs raisons. Tout d'abord elle présente un bloc fonctionnel "*Gestion localisation/mouvements patient*" qui devrait permettre la maîtrise des flux de patient (parcours). En effet, cette fonction permet de gérer la localisation physique d'un patient (position géographique et temporelle) et d'identifier, tout au long de son parcours de soins l'endroit où il se trouve. La fonction mouvement permet la gestion de tous les mouvements du patient. Un mouvement étant défini par un événement qui décrit un changement dans la situation du patient (en termes de responsabilité et de prise en charge), dans le contexte de la venue dans l'établissement. Un mouvement peut aussi

bien signifier une sortie, un transfert vers un autre établissement ou une mutation vers un autre service. Le premier mouvement de la venue d'un patient est une entrée, le dernier est une sortie. Cette fonction permet une vision du parcours d'un patient à un niveau macro et pourrait donc être complémentaire à celle apportée par un système de géolocalisation permettant d'avoir un niveau de détail plus élevé.

Or, les projets et études que j'ai menés jusqu'à présent avec des établissements hospitaliers m'obligent à la pondération vis-à-vis de cette fonction. En effet, même si les données nécessaires sont collectées et stockées dans le SIH, avec souvent un manque de complétude et de qualité, j'ai pu constater que cette fonction n'est soit pas du tout implémentée, soit qu'elle implique la création de requêtes complexes pour obtenir les mouvements. Certaines applications informatiques du SIH nécessitent en effet de collecter des données horodatées permettant de jalonner les parcours des patients, mais cela est réalisé le plus souvent par une saisie manuelle ou assistée : par exemple une infirmière qui flashe un code-barre avec un lecteur pour indiquer qu'elle a terminé un prélèvement sur un patient. Cela entraine un risque d'écart temporel entre l'événement du monde réel et son enregistrement dans le monde virtuel. En effet, pour faciliter son organisation, cette même infirmière va peut-être enchainer tous les prélèvements sur plusieurs patients, noter les informations utiles dans son calepin, et les saisir dans l'application informatique seulement à la fin de son service. En conséquence, en s'appuyant uniquement sur les données du SIH, on pourrait en déduire que tous ces prélèvements ont été réalisés en même temps, alors que ce n'est pas le cas en réalité. Les logiciels de gestion des urgences ou des blocs opératoires dans les hôpitaux sont d'autres exemples d'applications informatiques permettant d'enregistrer des jalons horodatés des parcours patients, peu souvent en temps réel, puisqu'encore une fois, la saisie de jalons pour marquer des étapes-clés n'est pas automatisée. Il s'en suit des erreurs humaines de saisie, ou d'oubli de saisie. Cumulées à des écarts temporels pouvant être parfois de plusieurs heures, les données sont finalement bien peu cohérentes et représentatives du monde réel.

Mais même avec les risques et inconvénients de cette saisie manuelle des données, je n'ai malheureusement encore jamais vu dans un hôpital un quelconque tableau de bord numérique visualisant les informations collectées sur les mouvements de patients et permettant ainsi de connaitre en temps réel le nombre de patients présents dans l'établissement, dans chaque service, dans chaque salle d'attente, le temps de séjour de chaque patient depuis son arrivée, etc.

Pourtant, avec une telle fonction implémentée dans un SIH, le chemin à parcourir pour disposer d'un outil de supervision des flux de patient, préalable au pilotage, serait tout tracé. J'espère pouvoir y contribuer par mes travaux.

Je constate aussi dans cette cartographie fonctionnelle qu'aucune des fonctions du bloc "*Pilotage et supervision de l'activité*" ne concerne la gestion et le pilotage des parcours sur une échelle de temps significative. La dimension organisationnelle des flux de patients est-elle donc en dehors des besoins d'un hôpital et du champ de son SIH ? …

Le suivi organisationnel en temps réel des parcours patients dans un ou plusieurs environnements (hôpital, domicile, etc.) me semble donc constituer aujourd'hui l'un des maillons faibles du système de santé. C'est pourtant grâce à ce suivi que l'on pourrait améliorer la fluidification des parcours en maitrisant leur programmation et en réduisant autant que possible les attentes et les activités inutiles ou redondantes pour les patients. Pour différentes raisons, liées notamment à la protection de la vie privée et à l'investissement technique et économique que cela implique, très peu de solutions sont aujourd'hui déployées en France : 6% seulement des directeurs d'hôpitaux déclarent qu'un système

de géolocalisation est proposé dans leur établissement et 8% des patients témoignent que l'hôpital qu'ils ont fréquenté durant leur dernier séjour "*dispose de systèmes de géolocalisation pour fluidifier le parcours de soins des patients ou pour protéger les patients fragiles*"[176].

En conséquence, peu d'environnements de production de soins, tels que les hôpitaux, sont aujourd'hui en mesure de piloter en temps réel leurs flux de patients en disposant, pour commencer, d'une image fiable de la situation courante. À l'image d'un pilote d'avion qui, malgré les perturbations et une visibilité réduite, est capable de suivre une route grâce à des instruments, le directeur d'un hôpital ou le chef d'un service hospitalier devraient disposer d'un tableau de bord lui indiquant en temps réel :

- Le nombre de patients présents dans les locaux, avec le détail par salle.
- Le temps passé par chaque patient en salle d'attente ou en salle d'examen.
- La localisation de chaque patient.
- Le temps de séjour de chaque patient.
- La disponibilité ou l'occupation des ressources.
- Tout autre indicateur utile au pilotage de flux de patients.

2.6.2. Les centres de commande, premier pas vers un CPS hospitalier ?

On imagine facilement les difficultés journalières que l'absence de ces informations entraine pour les médecins, infirmières, agents techniques et administratifs, notamment en termes de perte de temps, d'énergie dépensée et de stress dans le processus décisionnel au niveau opérationnel. Les tableaux de bord existent à l'hôpital, mais ils sont souvent destinés à la direction et comportent essentiellement des informations managériales et économiques, pour des niveaux décisionnels tactiques (à moyen terme) et stratégiques (à long terme), donc assez éloignés de l'opérationnel.

Indirectement, ce sont les dépenses de santé qui peuvent être impactées à moyen et long terme à cause d'une économie d'investissement à court terme pour disposer de tels outils de suivi en temps réel. Sans parler du ressenti, à juste titre, de désordre et de mauvaise organisation que cela peut provoquer auprès des personnels comme des patients.

Pourtant, des solutions existent dans l'industrie pour la production de biens, avec des outils tels que la supervision ou le MES (Manufacturing Execution System). Mais à l'hôpital ou dans d'autres environnements du système de santé, alors que la production de soins est particulièrement complexe à piloter comme on l'a déjà vu, les solutions de suivi de parcours en temps réel, que l'on pourrait qualifier par analogie avec le MES de "*Hospital (ou Healthcare) Execution System*" (HES) sont embryonnaires et clairsemées, même à l'échelle mondiale.

Quelques hôpitaux d'Amérique du Nord (9 recensés en 2020[177]) sont des précurseurs dans ce domaine comme dans d'autres, sans doute grâce à une culture de l'innovation et du changement ainsi qu'une législation sur la protection de la vie privée bien moins contraignante qu'en France et en Europe. Ces établissements ont déployé et testent des solutions de "*centre de commande*

[176] Voir page 38 du sondage ODOXA Baromètre santé 360 - Nouveaux usages en santé, 2018. Disponible sur http://www.odoxa.fr/sondage/barometre-360-sante-numerique-permettra-t-de-redresser-satisfaction-recul/
[177] https://smhs.gwu.edu/urgentmatters/news/hospital-command-centers

hospitalier" (Hospital Command Center) qui me semblent répondre à ce besoin de suivi de l'activité en temps réel (voir Figure 49).



Figure 49. Centre de commande du John Hopkins Hospital à Baltimore

Un centre de commande hospitalier se présente suivant quatre dimensions[178] :

1. La réponse aux incidents,
2. La gestion de la sécurité,
3. La gestion du bâtiment,
4. La gestion de la capacité et du suivi des soins, qui est celle qui m'intéresse le plus dans ces perspectives de recherche.

Dans cette dernière dimension, le centre de commande fournit des informations en temps réel en provenance de différents systèmes : gestion des lits, gestion des urgences, gestion du bloc opératoire, gestion des admissions et sorties, etc.

Le *Johns Hopkins Hospital* à Baltimore (Maryland) est particulièrement avancé puisque cet établissement est à l'origine de la création du premier centre de commande qui utilise les solutions de GE Healthcare[179] (Kane *et al.* 2019)[180].

De mon point de vue, ces centres de commande présentent les caractéristiques de base d'un CPS-S pour le suivi organisationnel des parcours. Ils constituent certainement une première étape incontournable avant de disposer de l'ensemble des fonctionnalités d'un CPS, et de tendre ainsi vers un futur DT-CPS.

[178] https://info.healthspacesevent.com/blog/the-evolution-of-the-healthcare-command-center
[179] https://www.gehealthcare.com/feature-article/command-centers-in-healthcare
[180] Kane, E.M., Scheulen, J.J., Püttgen, A., Martinez, D., Levin, S., Bush, B.A., Huffman, L., Jacobs, M.M., Rupani, H., T. Efron, D. (2019). Use of Systems Engineering to Design a Hospital Command Center. The Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety, 45(5), 370–379.

2.6.3. Des capteurs pour le suivi des patients et des ressources

Un CPS-S pour le suivi organisationnel des parcours nécessite de disposer de données relatives aux parcours patients, ce qui est un véritable défi technologique, scientifique, et aussi sociologique tant les technologies pouvant être mises en œuvre présentent un risque de résistances fortes liées à la vie privée. Pour ce dernier aspect, je compte sur des collaborations avec des sociologues et des ergonomes pour éviter des réactions de blocage assez compréhensibles. Même si cela est en dehors de mes compétences, je souhaite absolument prendre en compte cette dimension afin d'espérer à court terme des applications concrètes de mes travaux de recherche. Il y a nécessairement un travail d'écoute et de communication à faire, en insistant sur le caractère "gagnant-gagnant" qu'apporteraient ces technologies. En effet, être en mesure d'apporter de l'information personnalisée aux patients sur leurs temps d'attente prévisionnels, leur ordre de passage, sur la confirmation ou la modification de leur horaire de consultation, apporterait un gain considérable de qualité dans l'organisation. À l'identique, apporter aux personnels des informations objectives sur l'arrivée prochaine d'un patient dans un service, le nombre de patients en attente au-delà d'un certain seuil, le nombre de lits disponibles dans un service d'hospitalisation, faciliterait certainement le travail des médecins et des soignants en réduisant considérablement les tâches administratives d'organisation, sans pour autant réduire leur autonomie.

D'un côté, l'extraction, la fusion et la validation des données déjà disponibles dans les bases de données du SIH constituent une première difficulté. En effet, le SIH n'enregistre pas toutes les données qui pourraient être utiles au suivi organisationnel des parcours des patients. De nombreuses activités du parcours, particulièrement celles qui ne sont pas instrumentées, ne sont pas toujours suivies ou enregistrées sous forme de données horodatées des parcours. Par exemple, dans un service d'urgence, hormis l'enregistrement des patients par un agent administratif à leur arrivée au guichet d'accueil, il est fréquent de ne disposer que de quelques données partielles et peu fiables ne permettant pas de connaitre la localisation de chaque patient, même à l'échelle d'une salle ou d'une zone, ni de suivre précisément les différents parcours. En raison de ce manque de données, il est très difficile d'avoir une vue d'ensemble de la localisation des patients dans l'hôpital, ce qui permettrait de prédire l'apparition de goulots d'étranglement, d'anticiper les arrivées dans les services en aval, et de mieux gérer les rendez-vous dans les services de consultation externe.

Par ailleurs, comme j'ai commencé à l'évoquer dans la section 2.2.3, l'acquisition ou la déduction de données, complémentaires à celles existantes dans le SIH, qui permettraient de tracer plus finement un parcours, en incluant notamment les attentes dans ou en dehors des salles d'attente, ainsi que les déplacements, est une seconde difficulté qui n'est pas seulement technique et scientifique. Cela peut être réalisé en faisant appel à des capteurs permettant :

1. Soit de collecter des données non identifiantes (comptage du nombre de patients dans une salle d'attente par exemple).
2. Soit de connaître, pour chaque patient, son avancement dans un parcours, ce qui nécessite d'identifier chacun d'eux, même par un code anonyme équivalent à un "ticket".

La première option est acceptable sans restriction et pourrait d'ailleurs constituer une première étape d'amélioration avec un investissement très limité permettant de fournir un niveau d'information global à la fois aux personnels et aux patients.

C'est pour la deuxième option que peuvent apparaitre des limites éthiques ou réglementaires (RGPD par exemple) pour lesquelles une préparation et un accompagnement des usagers et des personnels sont nécessaires. Plusieurs types de capteurs peuvent être utilisés : caméras avec ou sans reconnaissance faciale, micros avec ou sans reconnaissance vocale, détecteurs de présence, détecteur de mouvement, bracelets "tags" et lecteurs radiofréquences (RFID, BLE, ZigBee, UWB), capteurs intégrés aux smartphones (magnétomètre, accéléromètre, GPS), etc. Ce sont ces deux dernières catégories qui me semblent le mieux répondre au besoin tout en étant les plus acceptables à court terme dans la préservation de la vie privée.

La géolocalisation indoor, appelée dans la littérature en langue anglaise *Real Time Location System* ou RTLS, ou, plus basiquement, le geofencing[181], permet de traiter des données issues le plus souvent de capteurs radiofréquences afin de suivre en temps réel ou de reconstruire a posteriori les parcours. Le RTLS fonctionne avec des balises, disposées à des emplacements judicieusement choisis dans les locaux, qui captent des signaux émis par des tags radiofréquences portés par les patients (badge ou bracelet). La fonction principale du positionnement en intérieur est la même que celle d'un système de positionnement global (GPS) extérieur : suivre sur un plan des locaux une personne grâce à différents algorithmes de positionnement basés sur la triangulation du signal. Des événements de géofencing (un patient entre ou sort d'une pièce) peuvent être déduits des données RTLS et de l'agencement des salles dans l'hôpital.

Ces mêmes technologies peuvent aussi être utilisées pour les ressources techniques mobiles nécessaires à certaines étapes d'un parcours. Il est ainsi possible de localiser, facilement et rapidement, des fauteuils roulants, des porte-perfusions, des pousse-seringues, qui sont souvent perdus ou volés, faute d'être localisables.

Par ailleurs, le cloisonnement très important d'un hôpital (nombreuses salles) rend difficile le repérage visuel des patients et des dispositifs mobiles, ce qui peut entrainer une perte de temps pour les trouver quand ils sont perdus.

Ces technologies présentent aussi un intérêt pour les usagers puisqu'elles peuvent servir d'aide au guidage de chaque patient pour se diriger dans l'hôpital et suivre un parcours prédéfini, à l'image d'un GPS, mais à l'intérieur des locaux.

Aujourd'hui, les solutions de géolocalisation indoor sont nombreuses, mais encore assez difficiles à mettre au point et à utiliser. En effet, la configuration des locaux (salles et cloisons multiples, sur plusieurs étages) perturbe le signal radiofréquence, ainsi que la densité de personnes puisque le corps humain, majoritairement constitué d'eau, est un obstacle aux signaux haute fréquence. Quant à la gestion des tags, qui ne sont le plus souvent pas à usage unique, elle nécessite de définir des protocoles de recyclage et désinfection, et donc de mettre en place un flux logistique supplémentaire.

Par ailleurs, en plus de l'aspect économique, d'autres aspects liés à l'acceptabilité et à la vie privée constituent un frein, tant au niveau des patients que du personnel. Il y a donc très peu de ces systèmes qui sont déployées en France à ce jour. Il n'y a pas de solution miracle pour localiser et suivre les mouvements des patients, mais c'est un véritable défi que j'espère parvenir à relever, en

[181] Le geofencing permet d'émettre des événements d'alerte lors de l'entrée ou la sortie d'une zone géographique donnée.

particulier grâce aux deux expérimentations pratiques que je mène actuellement en vraie grandeur au CHU de Saint-Etienne (tracking des brancards) et au CH de Perpignan (tracking des patients des urgences jusqu'aux services aval) (voir plus haut section 2.2.3).

2.7. Mes perspectives scientifiques : un DT-CPS pour le suivi organisationnel et prédictif des parcours patient à l'hôpital

Comme on l'a vu plus haut, l'absence de pilotage en temps réel des flux de patients à l'hôpital constitue une véritable faiblesse du système de santé. Les centres de commande, avec la dimension "gestion des capacités et suivi des soins" (voir plus haut section 2.6.2), assimilables à de véritables tours de contrôle, s'ils arrivent à susciter l'intérêt des hôpitaux et à se développer, constituent une solution de CPS-S adaptée et très performante.

Pour prolonger les perspectives scientifiques ainsi ouvertes, je vais présenter dans cette section l'apport que pourrait avoir plusieurs couches interconnectées de double numérique à ces centres de commande, afin qu'ils deviennent de véritables DT-CPS, grâce notamment à trois fonctions complémentaires, chacune assurée par un DT spécifique et interconnecté aux autres :

1. Une fonction de suivi et de pilotage par la visualisation des flux en temps réel.
2. Une fonction de prédiction.
3. Une fonction d'optimisation.

Un DT-CPS pourrait ainsi devenir un véritable outil d'aide à la décision pour le pilotage en temps réel et prédictif des flux de patients. Les différents doubles numériques sont tous basés sur des simulateurs à événements discrets. La Figure 50 illustre ce CPS-S à base de doubles numériques (DT-CPS), off-line en temps accéléré et on-line en temps réel, avec un état initial similaire à celui du monde réel, permettant d'assurer des simulations de monitoring et de prédiction pour remplir les trois fonctions énoncées précédemment (voir Tableau 21 en section 2.5.5).

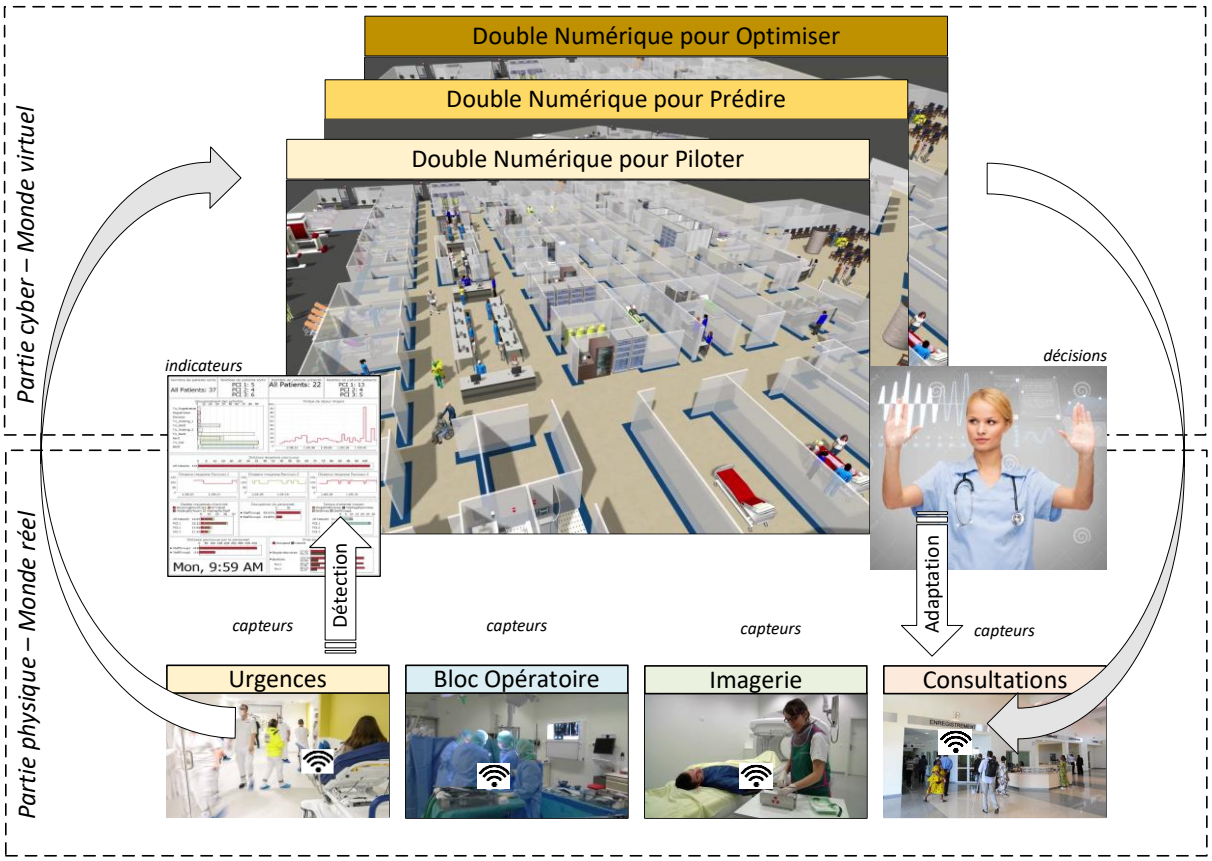


Figure 50 : Proposition de CPS-S à base de doubles numériques des parcours patients à l'hôpital

2.7.1. Un double numérique on-line pour assurer la fonction de suivi et pilotage en temps réel avec de la simulation "monitoring"

Le double numérique "on-line" doit être une véritable réplique digitale et dynamique permettant de visualiser en temps réel des patients dans l'ensemble d'un bâtiment, ou au niveau d'un étage, d'un service ou d'une salle particulière. Cette visualisation, qui est donc une forme de supervision évoluée ou d'hypervision, doit être suffisamment réaliste pour que le personnel soignant ou d'encadrement établisse, sans difficulté d'interprétation, le lien avec leur monde réel. Disposer d'un simulateur pour assurer cette fonction, plutôt que d'un superviseur, va non seulement permettre de fluidifier la visualisation des flux de patients entre deux événements captés dans le monde réel, mais aussi et surtout servir de modèle initial aux doubles numériques "off-line" asynchrones utilisés pour les fonctions de prédiction et d'optimisation (voir Figure 44, section 2.5.5). En effet, le double numérique "on-line" étant supposé synchrone, c'est-à-dire être à chaque instant dans un état semblable à celui du monde réel (voir Figure 45 section 2.5.5), il peut donc à tout moment être cloné et désynchronisé pour des simulations prédictives en accéléré.

Les principaux défis techniques et scientifiques du double numérique "on-line" à base d'un simulateur à événements discrets sont de deux types, comme le souligne (Karakra et al. 2020)[182] :

1. Lors de son activation, être capable de s'initialiser aussi vite que possible pour atteindre l'état courant du monde réel. Cela peut être réalisé grâce à des couches de communication et de calcul qui vont non seulement permettre de collecter des événements issus de capteurs installés dans le monde réel mais aussi calculer ou déduire des informations de flux et d'activité. Par exemple, un calcul doit permettre de connaître le nombre de patients présents dans une salle d'attente à un instant donné grâce à un capteur qui détecte les entrées et sorties de cette même salle, ou encore déduire qu'un patient est en train d'être pris en charge par un médecin dans un box de soins grâce à un capteur placé à l'entrée du box qui a détecté la présence simultanée de ce patient et d'un médecin. Inutile donc de savoir où se situe exactement le patient dans une salle d'attente (sur quelle chaise ou fauteuil est-il assis ?), le besoin est uniquement de savoir qu'il est "quelque part" dans la salle, ce qui peut réduire l'impact sur la vie privée et faciliter l'acceptabilité de telles solutions. Une fois que le double numérique est dans le même état que le monde réel, il faut aussi que l'horloge de simulation soit synchronisée avec le temps réel. Le double numérique "on-line" évolue donc à la vitesse du monde réel.
2. Être capable de se synchroniser sur des événements horodatés discrets remontant du monde réel et issus par exemple de capteurs de localisation ou de géofencing des patients. Par exemple, un capteur va détecter dans le monde réel qu'un patient entre ou sort d'une salle d'attente, et cet événement va permettre de synchroniser l'entrée ou la sortie du même patient virtuel dans la même salle d'attente du double numérique. En cours de fonctionnement, des écarts vont donc apparaître entre le comportement simulé du double numérique "on-line" et le comportement du monde réel. Par exemple, le temps de présence d'un patient dans une salle d'attente peut être modélisé par une loi de probabilité au niveau du double numérique, voire même grâce un algorithme d'intelligence artificielle prenant en compte plusieurs facteurs d'influence : état clinique du patient, âge, accompagné, situation sociale, antécédents, etc. Même si cette loi ou cet algorithme est capable de calculer avec une grande précision ce temps de séjour pour un nombre significatif de patients, la prédiction du temps de présence exact de chaque patient pris individuellement est impossible. Il faut donc prévoir un mécanisme de synchronisation et de correction du double numérique à chaque événement nouveau remonté du monde réel. Les récents travaux de thèse d'Abdallah Karakra ont permis d'apporter une contribution sur ces mécanismes de synchronisation et la façon de les modéliser (voir partie 1, section 1.4.5).

Une question de recherche émerge de ces deux défis : le double numérique doit-il simuler en temps réel un comportement prédictif basé sur le passé, ou doit-il se contenter d'évoluer par synchronisation discrète, uniquement sur l'apparition d'événements captés dans le monde réel ? Autrement dit, le comportement dynamique et continu que peut avoir le double numérique entre deux événements discrets et synchrones à des événements réels présente-t-il un intérêt ?

[182] Karakra, A., Lamine, E., Fontanili, F., Lamothe, J. (2020). HospiT'Win: a digital twin framework for patients' pathways real-time monitoring and hospital organizational resilience capacity enhancement. Dans Proceedings of the 9th International Workshop on Innovative Simulation for Healthcare (IWISH 2020). The 9th International Workshop on Innovative Simulation for Healthcare. CAL-TEK srl, 62–71

La Figure 51 illustre cette question avec un exemple simple et concret. En supposant que le monde réel dispose de capteurs permettant de détecter l'entrée ou la sortie de patients de différentes zones fonctionnelles (salle d'attente, box de consultation, etc.), est-il pertinent que le double numérique fournisse à tout instant une information complémentaire telle que la localisation prédictive des patients entre deux zones, ou même une prédiction du parcours qu'il devrait suivre après avoir quitté une zone ? Cette question peut paraître futile, mais je pense qu'une réponse affirmative pourrait permettre d'enrichir en continu une base d'entrainement d'un modèle d'apprentissage prédictif de ce double numérique, et ainsi le rendre progressivement plus proche encore du monde réel. Je laisse cette question ouverte pour mes perspectives de recherche.

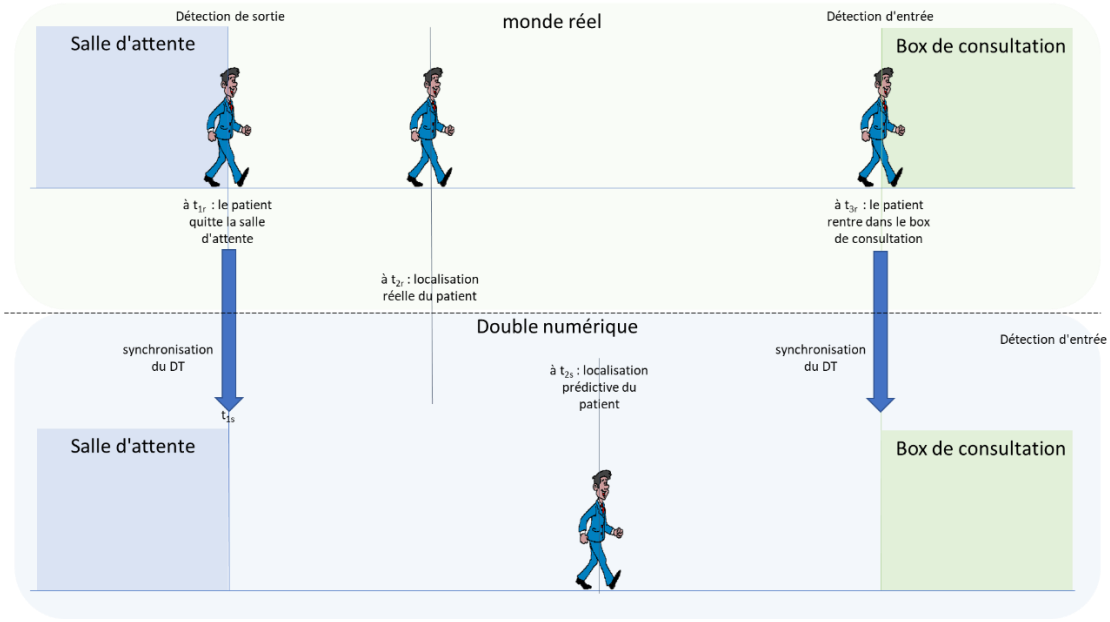


Figure 51. Exemple d'une information complémentaire apportée par le DT : la localisation prédictive d'un patient entre deux activités de son parcours

2.7.2. Un double numérique off-line asynchrone pour assurer la fonction de prédiction

Cette autre fonction a pour vocation d'évaluer très rapidement les conséquences d'événements inattendus ou de dérives (arrivée d'un patient non programmé dans un service de consultation, durée opératoire plus longue que prévue au bloc, analyse biologique non terminée, etc.) sur le court terme opérationnel (quelques heures au maximum).

Elle est donc déclenchée sur l'apparition de certains événements qui ont été préalablement catégorisés comme événements critiques. Elle peut aussi être déclenchée périodiquement, à intervalles réguliers, pour permettre une projection et une anticipation de la situation à venir en partant de la situation courante.

Pour ce faire, un clonage du double numérique "on-line" va permettre de disposer d'un modèle de simulation dont l'état initial correspond à celui du monde réel. C'est ce modèle qui va constituer le double numérique "off-line", c'est-à-dire déconnecté et asynchrone du monde réel, puisqu'il s'agit

maintenant de simuler en accéléré jusqu'à l'horizon visé afin de disposer d'une prédiction aussi bonne que possible du futur proche.

Ce double numérique "off-line" est donc assimilable à un simulateur conventionnel, à la différence notable que son état initial doit être similaire à celui du monde réel (voir Tableau 21). Autre point important de distinction : les lois de comportement aléatoires et les règles de gestion des flux de ce modèle de simulation doivent être mises à jour de façon dynamique de sorte que la simulation prédictive s'appuie non seulement sur une grande quantité de données historisées mais aussi sur des événements beaucoup plus récents pouvant influencer le comportement à court terme.

Plusieurs réplications peuvent donc être simulées afin de fournir des résultats prenant en compte la variabilité et les phénomènes aléatoires sur l'horizon visé. Les résultats des simulations se présentent donc sous la forme d'un intervalle de confiance ou de prédiction (par exemple : dans 2 heures, on peut être sûr à 90% qu'il y aura entre 13 et 15 patients dans la salle d'attente, ce qui peut être intéressant à savoir puisque la salle d'attente n'a que 14 places…).

À l'issue de ces réplications, ce double numérique permet donc de prédire l'état du monde réel dans le futur proche ou d'anticiper les effets d'un événement imprévu venant d'apparaître. Si les résultats ne mettent pas en évidence d'effet indésirable, il n'est donc pas nécessaire de prendre de décision dans l'immédiat pour corriger quoi que ce soit. Si, au contraire, les résultats font ressortir un effet sur un indicateur, il est peut-être encore temps d'agir pour tenter de contrer et d'atténuer cet effet, et donc de prendre une décision "proactive".

C'est ce que va permettre la fonction d'optimisation ou d'adaptation.

2.7.3. Un double numérique off-line asynchrone pour assurer la fonction d'optimisation

Cette dernière fonction a pour but de tester virtuellement différents scénarii permettant de pallier au mieux les effets indésirables à l'horizon visé, soit suite à un événement imprévu, soit à cause de l'évolution future de la situation par rapport à l'état courant.

Pour cela, on va de nouveau utiliser un double numérique off-line ayant les mêmes caractéristiques que celui utilisé pour la prédiction, à savoir un état initial similaire à celui du monde réel et une mise à jour dynamique des lois de distribution aléatoires.

Mais ici, ce double numérique doit être interconnecté avec un module d'optimisation de façon à simuler très rapidement différents scénarii pour tenter de minimiser les effets indésirables détectés par la fonction de prédiction.

Plusieurs techniques d'optimisation peuvent être utilisées, allant des plus basiques, telles que des plans d'expérience complets, jusqu'aux plus évoluées comme l'apprentissage machine.

De façon encore plus critique que pour la fonction de prédiction, le principal défi technique et scientifique à relever concerne la rapidité à trouver et tester virtuellement différentes solutions sur ce double numérique.

Les meilleures pourront être proposées à un "décideur" humain qui fera le choix d'en appliquer une au monde réel. Il n'est donc pas question d'automatiser un tel processus décisionnel, mais au

contraire de faire intervenir un humain dans la boucle d'adaptation dans une logique d'aide à la décision.

Finalement, cette fonction d'optimisation assurée par ce double numérique off-line va permettre d'agir dans l'immédiat pour éviter ou minimiser des problèmes qui pourraient survenir dans le futur proche. Ces acquis doivent aussi enrichir les applications de planification.

La Figure 52 présente un logigramme qui illustre le couplage de ces trois doubles numériques assurant chacun sa fonction :

- **Le double numérique pour piloter**, grâce à la connexion "on-line" qui lui permet d'être une réplique synchrone du monde réel, est utilisé pour suivre et surveiller l'apparition d'événements inattendus ou des déviations. En effet, après chaque synchronisation d'événement avec le monde réel, ce double numérique simule un comportement "de référence", c'est-à-dire un comportement prévu sur la base de l'historique, jusqu'à l'événement suivant. Certains écarts entre les événements prévus par le double et les événements du monde réel peuvent correspondre à des déviations pour lesquelles il faut évaluer les effets. Une copie du modèle de simulation et de son état est alors faite (clonage).

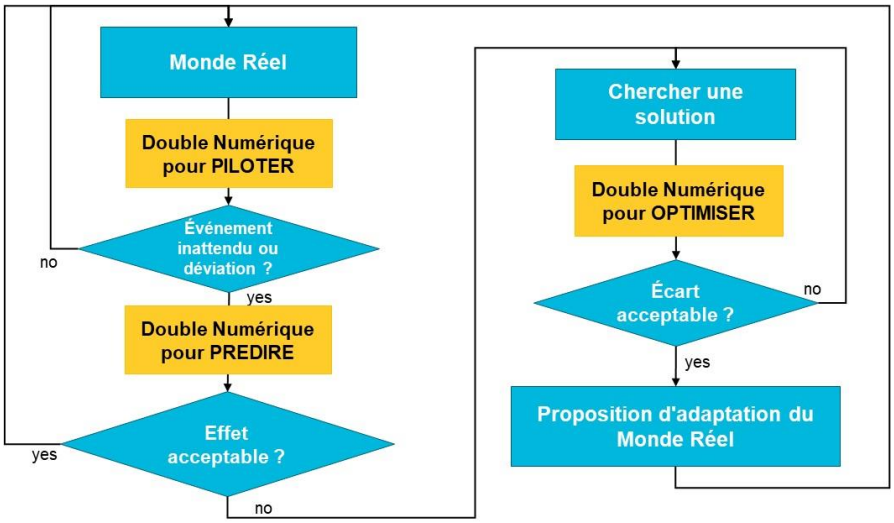


Figure 52. Processus théorique de Pilotage, Prédiction et Optimisation

- **Le double numérique pour prédire** utilise l'instance clonée de la situation courante, issue du double numérique pour piloter, et une simulation en "off-line" et en temps accéléré est lancée sur un horizon fini ou jusqu'à une condition d'arrêt logique (dépassement d'un seuil dans une file d'attente par exemple) afin d'évaluer si l'effet de la déviation dans un proche horizon est acceptable ou pas. Si l'effet est acceptable, alors le monitoring du monde réel via le double numérique pour piloter peut continuer.
- **Le double numérique pour optimiser** est utilisé dans le cas où l'effet de la perturbation à court terme n'est pas jugé acceptable. Il s'agit donc d'essayer de minimiser ou d'annuler cet effet en agissant par anticipation sur certaines variables de pilotage. Pour cela, ce double numérique utilise aussi l'instance clonée de la situation courante, qu'il va simuler en off-line

et en temps accéléré avec des paramètres de pilotage ajustés par un module d'optimisation qui lui est couplé. Plusieurs scénarios et plusieurs réplications peuvent être lancés selon le temps disponible pour prendre une décision et la durée d'exécution d'une simulation jusqu'à ce que l'écart avec l'objectif visé devienne acceptable. Les paramètres de pilotage corrigés peuvent alors être appliqués au monde réel.

La Figure 53 illustre sur un exemple les transitions entre les trois doubles numériques. Dans cet exemple, on fait l'hypothèse de temps de réaction nuls pour le passage d'un DT à l'autre.

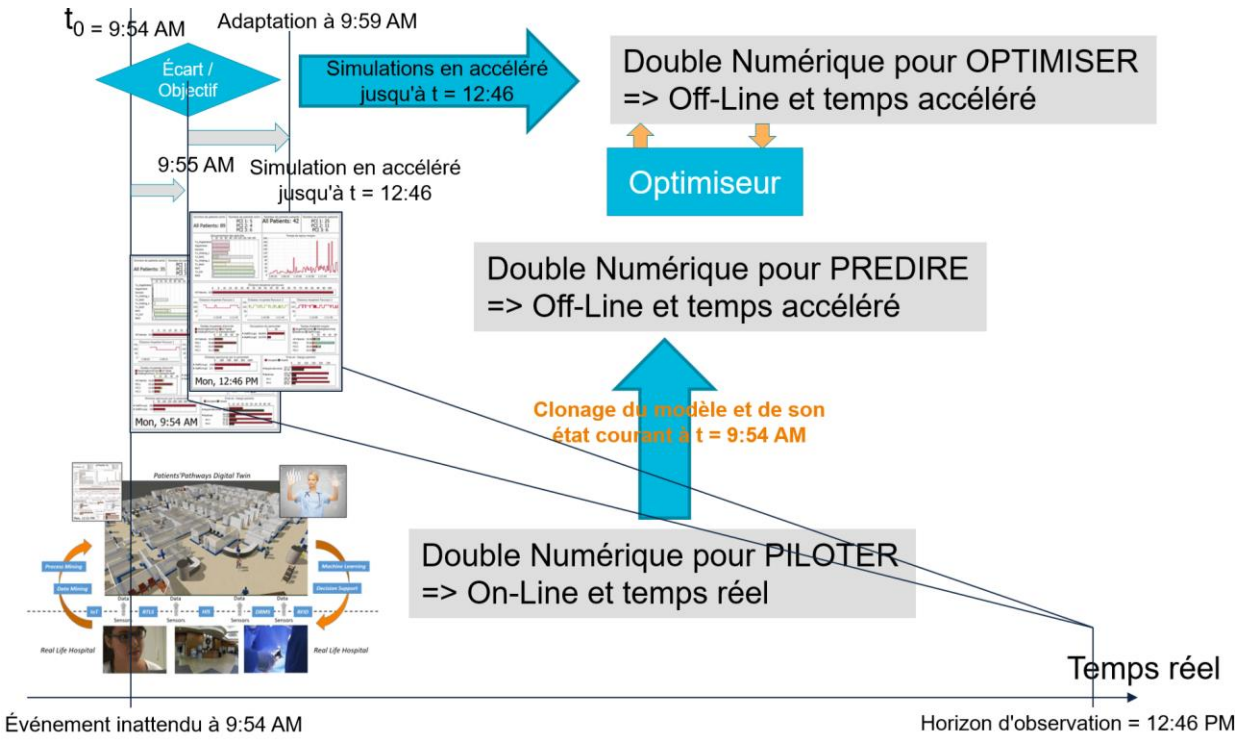


Figure 53. Illustration du passage du DT On-line au DT Off-line

- À 9:54 am, un événement inattendu est détecté dans le monde réel. Le "double numérique pour piloter" à base d'une simulation de "monitoring", qui est on-line, se synchronise avec cet événement afin que son état soit identique à celui du monde réel. Cet événement inattendu déclenche aussi un "clonage" du modèle de monitoring et de son état courant en un modèle de simulation prédictive. La simulation prédictive est lancée en temps accéléré jusqu'à l'horizon de temps réel 12:46 pm.
- À 9:55 am, la simulation prédictive est terminée et permet d'évaluer qu'à 12:46 pm, le monde réel aura un écart de performance par rapport à ce qui était planifié (objectif) à cause de cet événement inattendu.
- Entre 9:55 am et 9:59 pm, plusieurs simulations du modèle cloné à 9:54 am sont lancées, en couplage avec un module d'optimisation, afin de trouver une configuration qui minimise

par anticipation les écarts du monde réel par rapport à l'objectif. Chaque nouvelle simulation proposée par le module d'optimisation ajuste les paramètres de pilotage selon un algorithme.

- À 9:59 am, le "pilote" humain décide d'adapter (ou reconfigurer) les paramètres de pilotage du monde réel selon une des simulations réalisées précédemment.

2.8. Conclusion et perspectives

2.8.1. L'axe IOS aujourd'hui

À sa création en janvier 2020, l'axe IOS comportait deux ressources : un enseignant-chercheur permanent et un chercheur associé "historique". Nous proposions deux thématiques complémentaires et entremêlées : la transformation numérique du système de santé d'une part, et l'optimisation des parcours patients d'autre part, autrement dit une thématique s'intéressant au système d'information (flux informationnels), et une autre au système opérationnel (flux de patients).

En avril 2022, nous sommes maintenant deux enseignants-chercheurs permanents (un senior et un junior), et deux chercheurs associés (un senior et un junior). Grâce au laboratoire commun ACDC, nous comptons aussi un ingénieur de recherche en contrat jusqu'en avril 2024 qui apporte une expertise technique en traitement de données et développement informatique. Une collaboration avec l'INU Champollion nous permet d'accueillir une post-doctorante jusqu'en septembre 2022, et nous venons aussi de recruter un post-doctorant qui travaillera dans l'axe jusqu'en 2026 grâce à un contrat Plan de Relance passé avec la société Berger-Levrault. Enfin, l'axe compte actuellement trois doctorants.

Pour animer cette petite équipe, j'ai mis en place une organisation "râteau" qui implique les deux enseignants-chercheurs permanents et l'ingénieur de recherche sur tous les projets. Je souhaitais effectivement que les nouveaux arrivants prennent connaissance de tous les projets et s'investissent progressivement sur chacun d'eux. Pour cela, j'organise un "point hebdomadaire" de l'axe IOS tous les mercredis durant lequel nous passons en revue nos quatre projets actifs ainsi que les thèses. J'organise aussi deux séminaires scientifiques par an (été et hiver) pour que les doctorants et post-doctorants présentent leurs travaux, pour discuter sur les projets en cours ou en préparation, pour évoquer des perspectives, ou pour affiner l'organisation de l'axe.

2.8.2. La politique scientifique de l'axe IOS dans un futur proche (2022-2025)

À compter de septembre 2022, l'axe IOS comptera trois enseignants-chercheurs permanents (Cléa Martinez, Canan Pehlivan, et moi-même) et deux chercheurs associés (Elyes Lamine - INU Champollion et Liwen Zhang - Berger Levrault). Avec cet effectif de chercheurs, j'aimerais avoir un régime de croisière de 5 à 6 doctorats en cours, et 1 à 2 post-doctorats, d'ici fin 2025.

L'atteinte de cette taille critique va nous obliger à nous organiser un peu différemment de l'organisation passée et actuelle, à la fois pour que notre stratégie de développement soit plus lisible, et aussi pour recentrer chaque chercheur sur une thématique privilégiée, sans pour autant partitionner l'axe IOS en "lignes d'eau" étanches.

C'est pour cela que j'envisage de nous structurer en trois "task forces (TF)" correspondant chacune à un grand domaine d'application et sous le pilotage opérationnel d'un enseignant-chercheur permanent :

- **TF#1 : Prise en charge à domicile** (pilotée par Cléa Martinez). Cette TF s'intéresse principalement à l'organisation des intervenants devant apporter un service au domicile de bénéficiaires. Le plus souvent, ces intervenants sont employés ou mandatés par des structures (SSIAD, HAD, aide à la personne, etc.) dont l'organisation consiste à jongler entre l'expansion rapide de la demande et la pénurie de ressources dans un contexte de multiples imprévus et de cas particuliers. Il s'agit de répondre à des questions de recherche principalement liées à la coordination, à la planification et à la régulation des intervenants en combinant des méthodes et outils de recherche opérationnelle, de fouille de données et de processus, de simulation, etc. Le projet BL-Sim (2022-2026) constitue la locomotive de cette TF à laquelle nous pourrons accrocher d'autres wagons selon les projets que nous décrocherons ou les opportunités qui se présenteront.
- **TF#2 : Centres d'appels pour la santé et le handicap** (pilotée par Canan Pehlivan). Deux de nos projets en cours, CallSAMU et ACDC, s'intéressent à l'amélioration des performances de centres d'appels téléphonique et visio : les centres 15 des SAMU d'une part, et des centres relais pour communiquer entre personnes sourdes ou malentendantes et personnes entendantes d'autre part. Les questions de recherche que l'on adresse sont différentes : d'un côté garantir à l'appelant un temps d'attente de moins de 30 secondes car des situations de détresse vitale sont en jeu, et de l'autre, assurer une qualité de service concurrentielle tout en préservant l'équilibre financier de l'entreprise avec une occupation maximale des ressources. Cependant, les méthodes et outils que l'on propose d'utiliser sont similaires : files d'attente et systèmes stochastiques, recherche opérationnelle, modélisation et simulation. J'espère que nous pourrons obtenir un financement complémentaire au-delà de 2022 pour poursuivre les travaux menés sur CallSAMU (une réunion à ce sujet est prévue avec la DGOS en septembre 2022). Quant à ACDC, nous avons un financement assuré jusqu'à début 2025.
- **TF#3 : Double numérique pour un pilotage prédictif des parcours patient** (pilotée par moi-même). Il s'agit de la TF la plus disruptive, du côté des usagers comme des personnels : acceptabilité d'un dispositif de tracking, nouvelle fonction de "pilote des flux de patients", prédiction du futur proche, etc. Je ne vais pas revenir sur ce que j'ai déjà présenté précédemment dans ce manuscrit et qui constitue donc le cœur de cette TF. Je dispose d'un financement de la DGOS/ARS Occitanie jusqu'à fin 2022, avec une possibilité d'extension au-delà selon les résultats obtenus avec l'expérimentation en cours avec le CH de Perpignan. Je compte aussi chercher un financement pour démarrer une nouvelle thèse sur ce sujet, à la suite de celle d'Abdallah Karakra, si possible à partir de septembre 2023, afin de traiter certaines questions de recherche que j'ai posées dans ce manuscrit.

2.8.3. Le futur un peu plus lointain de l'axe IOS

Bien sûr, même si nous devons mettre en avant notre expertise et notre expérience au travers de ces trois TF, nous ne devons pas nous y restreindre et envisager d'autres TF correspondant à des

projets de recherche sur des thématiques aujourd'hui plus prospectives comme par exemple la fragilité (voir projet SenseLife, Elyes Lamine) ou la gestion des risques dans les prescriptions médicamenteuses (projet TreatMedE CHIC, Rafika Thabet). Le renfort de l'axe IOS dans les prochaines années par l'arrivée de nouveaux chercheurs associés ou, encore mieux, par des enseignants-chercheurs permanents, contribuerait à cet élargissement de nos domaines applicatifs pour répondre à un plus large spectre de besoins du système de santé.

Je pense aussi à la proximité de l'axe IOS avec l'axe GOL (Gestion des Opérations et Logistique) qui pourrait permettre de faire ressortir une autre TF en logistique hospitalière, donc moins centrée sur les patients, comme par exemple les projets portant sur le circuit médicament à l'hôpital. En effet, de plus en plus de pharmacies à usage interne (PUI) d'établissements hospitaliers, mais aussi de grosses officines, cherchent à évoluer vers des processus de délivrance nominative des médicaments avec des moyens robotisés de préparation des doses à administrer, appelés PDA-A[183], capables de produire un sachet nominatif par patient et par prise. Il y a donc certainement des perspectives de travaux de recherche à mener pour évaluer les enjeux de tels projets. Tous les flux de repas, de lingerie, de dispositifs médicaux à stériliser, dans les établissements sanitaires et médico-sociaux pourraient aussi rentrer dans cette TF mixte avec GOL.

Un autre rapprochement interne pourrait aussi se faire à court terme avec l'axe SGC (Sécurité et Gestion de Crise). Afin de faire face à la crise sanitaire du Covid-19, les établissements de santé ont dû faire preuve de résilience et de réactivité grâce à de multiples reconfigurations : des trajets géographiques devant être redéfinis pour éviter tout croisement de flux, des services de chirurgie transformés en services de réanimation, etc. Le plus dur semblant être passé, grâce à une mobilisation sans limite des personnels hospitaliers, on peut maintenant s'interroger sur ce que l'on pourrait faire pour mieux se préparer à une prochaine crise sanitaire. Un rapport de l'IGAS datant de juillet 2021 préconise une trentaine de recommandations pour les unités de soins critiques autour de 5 axes[184] dont les deux suivants pour lesquels nous pourrions apporter une contribution, notamment grâce au double numérique : (1) La fluidification des parcours de patients peut permettre de répondre à l'accroissement prévisible des besoins sans augmentation massive des capacités de réanimation. (2) La réponse aux variations saisonnières d'activité et aux situations sanitaires exceptionnelles implique d'aménager une élasticité maximale de l'offre de soins critiques.

L'utilisation d'un double numérique des parcours patients va bien au-delà d'une simple étude de simulation de processus pour analyser précisément et dynamiquement l'impact d'une crise sur les processus opérationnels de l'hôpital. Dans le cadre du projet Horizon Europe SAHARA qui n'avait malheureusement pas été retenu, j'avais proposé de développer une approche outillée innovante composée de 5 modules principaux : (1) un module d'extraction et de traitement de données (Data and Information Crunching) fondé à la fois sur des données structurées et aussi sur des interviews à partir de différentes sources (arrivées de patients, durées d'examens, aménagement des locaux, personnel infirmier et médical, emplacement et quantité d'équipements médicaux, etc.) pour structurer et générer un modèle de connaissance des processus opérationnels As-Is. (2) Cette vue statique formelle et validée des processus à étudier sera l'entrée d'un module de génération automatique du modèle de simulation servant de double numérique (As-Is Simulation Builder). (3) Un module de génération de scénarios de crise (Crisis Scenario Generator), dont l'objectif est de modéliser et de générer un ensemble de scénarios de crise en fonction du contexte As-Is et des variables de décision. Le résultat sera un ensemble de scénarios prédictifs "What-If" donnant de

[183] PDA-A = préparation des doses à administrer automatisée
[184] https://www.igas.gouv.fr/IMG/pdf/2021-017r.pdf

nouvelles configurations possibles de processus hospitaliers et de locaux avec des services et des ressources disponibles. (4) Un module permettant de transformer automatiquement le double numérique As-Is en différents modèles de simulation To-Be (To-Be Simulation Builder). (5) Ce dernier module utilisera en entrée les différents doubles numériques To-Be afin de proposer à l'utilisateur final (direction hospitalière et personnel médical) un classement de tous les scénarios à valider (Designer of Experiments and Optimizer). La Figure 54 illustre l'ensemble de cette approche. C'est une prospective scientifique qui pourrait être proposée à court terme dans le cadre d'une action spécifique portée par le groupe de travail GISEH à soumettre au GdR MACS.

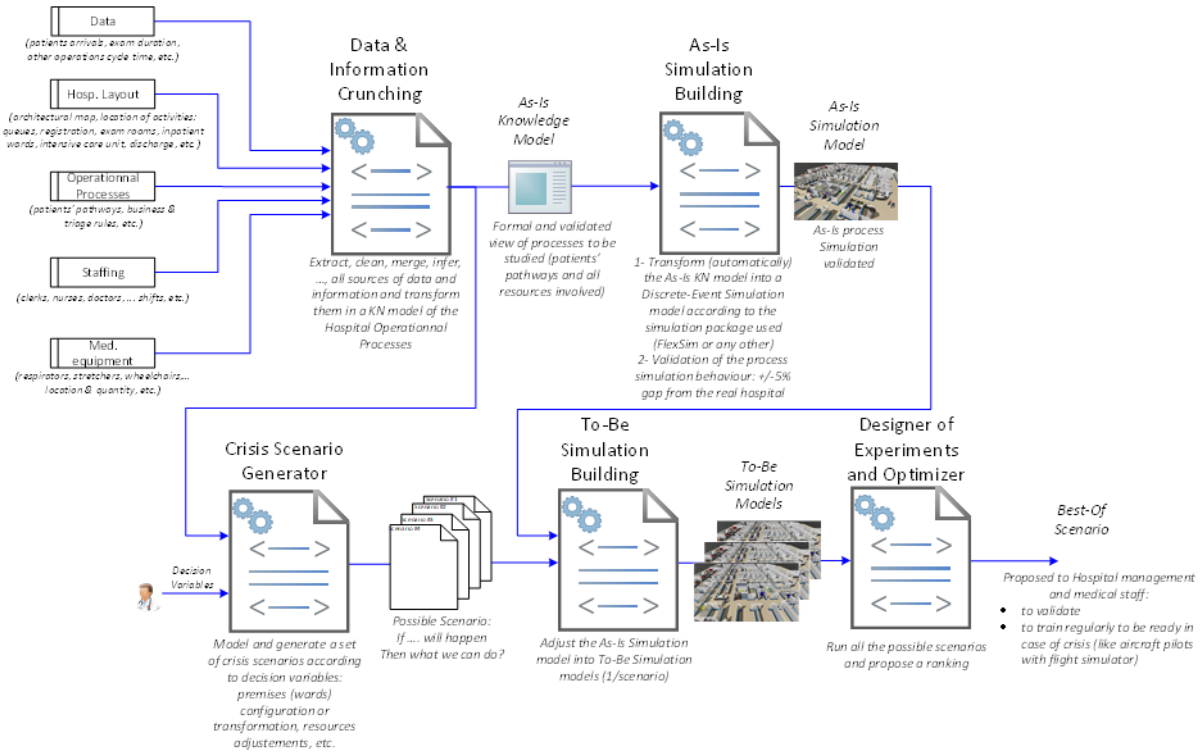


Figure 54. Vue d'ensemble de l'approche proposée à base de doubles numériques pour évaluer l'impact d'une crise et les scénarios alternatifs

2.8.4. Quelle dimension internationale pour l'axe IOS ?

À ce stade, l'axe IOS ne dispose pas encore d'une maturité suffisante et n'a pas eu d'opportunité de concrétiser des projets collaboratifs, en dehors de tentatives, pour l'instant infructueuses, de projets européens H2020 et Horizon Europe : ARCH, SAHARA et AEROSOL.

Une autre piste que j'envisage pour nous ouvrir à l'international est l'aide aux pays en voie de développement qui disposent malheureusement de systèmes de santé qui ne garantissent pas un accès aux soins pour tous (Meessen et al, 2005)[185] (Tizio 2004)[186].

Par exemple, la problématique de la localisation des hôpitaux et unités de soins telle que présentée par (Querriau *et al.* 2004)[187] est un sujet sur lequel nous avons quelques compétences.

Une autre problématique sur laquelle nous pourrions intervenir est la prise en charge des urgences (Binam 2013)[188]. Quel SAMU, SMUR ou SAU peut-on imaginer à l'échelle d'un continent comme l'Afrique ou l'Asie ?

[185] Meessen, B. & Van Damme, W. (2005). Systèmes de santé des pays à faible revenu : vers une révision des configurations institutionnelles ?. Mondes en développement, vol. nº 131, no. 3, 2005, pp. 59-73.
[186] Tizio, S. (2004). Etat de santé et systèmes de soins dans les pays en développement : La contribution des politiques de santé au développement durable. Mondes en développement, vol. nº 127, no. 3, 2004, pp. 101-117.
[187] Querriau, X., Kissiyar, M., Peeters, D., Thomas, I. (2004). Localisation optimale d'unités de soins dans un pays en voie de développement : analyse de sensibilité. [En ligneCybergeo: European Journal of Geography], 24 August 2004. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://journals.openedition.org/cybergeo/3316.
[188] Binam F. (2013). La prise en charge des urgences - un modèle d'organisation pour les pays en voie de développement. Editions Karhala, 168 p.

Conclusion générale

Dans ce manuscrit, j'ai d'abord tenté de présenter ma trajectoire passée, puis celle que j'envisage de suivre dans les prochaines années. Quand je suis rentré dans la vie active, en 1984, avec en poche mon BTS en bureau d'études de construction mécanique, je n'imaginais pas qu'une vingtaine d'années plus tard, je serais recruté sur un poste d'enseignant-chercheur en génie industriel dans une grande école.

Ma première vie professionnelle était tournée exclusivement vers l'enseignement. Je voulais transmettre mes connaissances à des élèves, transmettre ma passion, d'abord pour la mécanique, puis pour le génie mécanique, et enfin la gestion de production et le génie industriel. Car la passion est mon moteur. Je suis incapable d'apprendre pour apprendre, et je ne peux apprendre que pour comprendre, pour comprendre ce que je peux visualiser, manipuler, démonter, observer. Quand je comprends, je suis tellement émerveillé par la science et la technique, par ce que l'Homme est capable d'imaginer, de concevoir, de réaliser, que je n'ai qu'une envie : partager. Pour cela, il faut essayer de percer les mystères de l'apprentissage, de la motivation des élèves, tous les mécanismes intellectuels et personnels qui leur permettent d'absorber, de s'ouvrir à des connaissances nouvelles qui n'ont pas toujours beaucoup de sens pour eux. J'ai eu la chance de traverser une époque durant laquelle les techniques pédagogiques ont considérablement évolué, au fil du développement du numérique. J'ai appris à dessiner des mécanismes sur des planches à dessin d'un mètre de côté, à les dimensionner en me servant de règles à calculs. Et puis sont arrivés successivement la calculatrice de poche, d'abord basique, puis programmable, puis les premiers ordinateurs personnels avec des logiciels capables de faire des calculs plus vite et plus précis que n'importe quel humain. Tout cela a nécessité de revoir ma façon d'enseigner, et surtout de trouver de nouvelles sources de motivation pour des élèves pour tenter de voir briller cette petite flamme dans leurs yeux qui est la plus belle des récompenses pour l'enseignant.

Durant ma seconde vie professionnelle, dans laquelle je suis encore aujourd'hui depuis une vingtaine d'années, la recherche a progressivement pris sa place au côté de l'enseignement. Cela a été laborieux, car mon passé d'enseignant a fait que j'ai eu beaucoup de mal à rentrer dans la peau du chercheur, dont le but est, non pas de transmettre des connaissances, mais plutôt d'acquérir d'hypothétiques connaissances nouvelles au gré des pistes de recherche explorées. Enseigner et chercher sont deux métiers aux finalités très différentes, et si je ne me posais pas de question pour l'enseignement, mon plus gros problème a été de trouver un sens à mes travaux de recherche. Pendant plusieurs années, je dois reconnaitre que j'ai eu beaucoup de mal à y parvenir, et que la seule chose qui me raccrochait à mon métier d'enseignant-chercheur, était l'enseignement. C'est ce qui explique sans doute les choix que j'ai faits durant les dix premières années passées à l'école des mines d'Albi-Carmaux : le plaisir d'enseigner face à un public de bon niveau, l'arrivée des nouvelles technologies éducatives, et enfin le démarrage de la filière d'ingénieurs par l'apprentissage, constituaient mes plus fortes motivations durant cette période, même si, initialement, en venant à Albi, j'avais volontairement et consciemment opté pour orienter ma carrière vers une répartition égale entre enseignement et recherche. Mais je n'ai alors pas trouvé un élément pouvant m'empêcher d'être inéluctablement attiré vers mon métier originel. Je suis heureusement resté au CGI, je ne l'ai jamais totalement quitté, même au plus fort de ma responsabilité dans la formation en apprentissage. Était-ce parce qu'au fond de moi, je ne voulais pas vivre cette expérience de la recherche comme un échec ? Je ne sais pas, mais le contact que j'ai maintenu avec le CGI m'a permis de voir de "vrais" chercheurs se passionner eux-aussi pour leurs travaux, au point parfois de délaisser un peu l'enseignement, ce que je comprends aujourd'hui avec le recul,

car il est quasiment impossible d'exceller dans les deux, tellement chacune de ces activités monopolise une énergie intellectuelle considérable si l'on veut la réaliser pleinement. Progressivement, l'idée de cette bipolarité entre enseignement et recherche a dû cheminer plus ou moins inconsciemment dans mon esprit, certainement avec la complicité de collègues qui m'ont encouragé et aidé à rompre la barrière qui séparait les deux. Les deux premières thèses que j'ai co-encadrées, avec Lionel Dupont, m'ont mis le pied à l'étrier, et j'ai ainsi découvert sur le terrain qu'encadrer des doctorants, c'était aussi transmettre, et partager. Certes, il s'agit surtout de transmettre une approche, une rigueur scientifique, plutôt que des connaissances pures que les doctorants sont à même d'acquérir par eux-mêmes. Mais pour ces deux premières thèses, mon esprit était sans doute trop occupé par ailleurs pour que j'en prenne totalement conscience. Je pense que c'est la troisième thèse que j'ai encadrée, celle de Romain Miclo, qui a été un véritable déclencheur pour moi. Tout d'abord, je côtoyais deux brillants chercheurs qui dirigeaient Romain : Matthieu Lauras et Jacques Lamothe. J'ai pu observer leur approche, et ils m'ont fait confiance et laissé de l'autonomie pour guider et accompagner Romain vers la simulation afin d'évaluer différentes techniques de planification, dont le DDMRP. Pour couronner le tout, Romain a effectué un travail remarquable, avec beaucoup d'humilité face à ses résultats, et de respect pour moi. Tout cela a sans nul doute contribué à m'apporter cette motivation pour la recherche qui me manquait. Un autre élément qui y a contribué, de façon assez concomitante, a été ma proximité avec Elyes Lamine. Depuis longtemps déjà, il me faisait part de ses travaux de recherche dans le domaine de la santé, et me faisait intervenir dans un enseignement en simulation de flux de patients pour les élèves d'ISIS. Elyes était le seul chercheur du CGI à se consacrer uniquement à la santé. Travailler avec lui sur ce terrain applicatif relativement nouveau pour moi était une vraie opportunité à saisir. À deux, nous formions une équipe, et nous pouvions unir nos forces et nous entraider. Lui avec son expertise dans les systèmes d'information pour la santé, et moi avec la modélisation et la simulation. Nous avons co-encadré ensemble quatre thèses sur des sujets en santé, allant du diagnostic des parcours patients (thèse de Sina Namaki Araghi) au double numérique des parcours patients (thèse d'Abdallah Karakra), en passant par la simulation des appels téléphoniques au SAMU (thèse d'Eva Petitdemange) et par la planification centralisée des intervenants à domicile (thèse de Liwen Zhang). J'ai beaucoup appris de cette collaboration avec Elyes, et avec ces doctorants, très différents les uns des autres. Je pense avoir acquis de la maturité, à la fois pour l'encadrement de doctorants, et aussi en ingénierie organisationnelle pour la santé, puisque c'est sous cette appellation que nous avons désigné nos travaux dans ce domaine applicatif. J'ai aussi encadré la thèse de Quentin Schoen, un autre doctorant au potentiel scientifique remarquable, sur un sujet de transport des poches de sang, et j'ai deux thèses actuellement en cours : celle de Leah Rifi sur la régulation des blocs opératoires, et celle de Samer Alsamadi sur la planification d'un centre d'appels pour sourds et malentendants. Toutes ces collaborations avec des doctorants m'ont permis de leur apporter mon expertise en simulation. Je suis très fier que chacun d'eux ait pu développer ses propres modèles, souvent très complexes, pour les besoins spécifiques de sa thèse. Les encadrer de façon opérationnelle sur ces sujets, avec la simulation comme discipline scientifique, m'a permis d'acquérir moi aussi de nouvelles connaissances. Je les ai capitalisées et je peux d'ores et déjà les diffuser à Leah et à Samer, ainsi qu'à de prochains doctorants qui rejoindront l'axe IOS dans le futur.

Dans la deuxième partie de ce manuscrit, j'ai présenté mon projet de recherche qui porte sur le pilotage opérationnel des parcours patients à l'hôpital, en temps réel et prédictif, à l'aide d'un double numérique. Ce projet découle bien sûr de toutes les thèses et collaborations que j'ai décrites dans la première partie. C'est ma nouvelle passion, depuis quatre ou cinq ans, celle que j'aimerais transformer en une preuve de concept pour finalement l'imposer comme une innovation organisationnelle au service des établissements de santé. En effet, les projets que je mène dans

des hôpitaux m'ont convaincu de deux choses. (1) Tout d'abord, malgré la situation extrêmement tendue et critique des établissements sanitaires et médico-sociaux, on attache encore trop peu d'importance à la recherche organisationnelle. La recherche clinique monopolise l'essentiel des budgets alloués par l'État ou par les industriels. Cela nous apporte une excellence médicale certainement parmi les meilleures au monde, et il faut s'en féliciter. Mais avec son système de santé universel, la France pourrait aussi s'enorgueillir d'une organisation performante, où les patients comme les personnels hospitaliers seraient pleinement satisfaits. Une organisation où il n'y aurait pas d'attente, ni pour obtenir un rendez-vous, ni durant un parcours de soins, où l'on serait capable d'anticiper les perturbations inévitables, de prédire leurs conséquences. (2) Ensuite, le pilotage opérationnel des parcours est pour ainsi dire totalement absent de la batterie d'applications et d'outils qui composent les systèmes d'information hospitaliers. Le besoin même du pilotage opérationnel ne semble pas se poser, alors qu'un établissement voit passer tous les jours une grande quantité et une grande variété de patients, avec une multitude de parcours prévus ou totalement imprévisibles. Un hôpital n'est ainsi pas capable de connaitre sa situation en temps réel : où sont les patients ? dans quelles salles ? depuis combien de temps y sont-ils ? combien de médecins sont disponibles ? où se trouve le brancard le plus proche ?... sont des questions pour lesquelles il n'y a pas de réponse. En tant qu'usager, je trouve cela anormal, et même inquiétant. Certes, le personnel est dévoué et ne ménage pas ses efforts pour combattre sans arrêt des "incendies", mais sans avoir le temps d'en trouver les causes. C'est certainement ce qui permet de maintenir le système à flot, mais pour combien de temps, et avec quel niveau de risque acceptable pour les patients ?

Je souhaite donc contribuer, par mes travaux de recherche, à développer un outil de pilotage prédictif s'appuyant sur des doubles numériques qui apporterait non seulement une vision suffisamment précise de la situation courante, mais permettrait aussi de se projeter dans un futur proche pour prédire la situation à venir. Pour y parvenir, il est nécessaire d'automatiser la collecte de données au plus proche des patients, pour suivre leurs positions et leurs mouvements. Cela passe par des solutions de tracking, et implique donc des précautions multiples pour garantir la protection de la vie privée de chacun. Je prévois pour cela de collaborer avec des sociologues et ergonomes. Je mène actuellement des expérimentations dans deux hôpitaux pour tester de telles solutions, ce qui est déjà une chance car il n'est pas aisé de trouver des terrains d'application qui acceptent d'accueillir des chercheurs en ingénierie organisationnelle. L'expérimentation la plus critique, mais aussi la plus prometteuse, est celle réalisée au CH de Perpignan, puisqu'il s'agit de suivre les patients des urgences devant être hospitalisés dans des services aval. La solution de tracking est en cours de déploiement et nous devrions pouvoir tirer un bilan d'ici la fin de l'année. Je remercie à la fois le Dr Jane Poincenot, qui m'a soutenu dans ce projet quand elle était à la DGOS, la direction de cet établissement d'avoir accepté d'être pilote, et tous les personnels qui collaborent avec beaucoup de professionnalisme et d'intérêt. Grâce aux travaux de thèse d'Abdallah Karakra en particulier, nous devrions pouvoir ensuite construire un double numérique des parcours patients qui sera connecté aux événements provenant du système de tracking des patients, et sera ainsi synchronisé selon les mécanismes qu'Abdallah a proposés. Je suis très impatient d'arriver à ce stade et de pouvoir partager les retombées de cet outil avec les personnels. Si le bilan s'avère positif, j'espère pouvoir obtenir de nouveaux financements pour poursuivre les travaux.

Épilogue

Avant le point final de ce manuscrit, je prends la liberté de faire un peu de science-fiction et vous invite à voyager en Absurdie.

J'imagine que je suis une jeune femme de 31 ans. Je m'appelle Mila et je suis ingénieure-docteure diplômée de IMT Mines Albi. Nous sommes en juillet 2052, et je viens d'être recrutée comme "*pilote des parcours patients*" dans le tout nouveau CHU de la base martienne de Serenity-81.

Chaque jour, et depuis près de dix ans maintenant, une navette en provenance de la Terre, déverse un flot de près de 1000 colons qui viennent s'établir ici. Cet afflux est provoqué par la disparition totale de ressources vitales dans certaines régions de la Terre, telles que l'eau et la lumière du soleil, car la température moyenne s'est emballée de façon totalement incontrôlable à partir de 2034. La population de Serenity-81 approche maintenant les trois millions de migrants. Nous sommes tous équipés de capteurs microscopiques et non-invasifs qui surveillent nos signes vitaux et réalisent des analyses de sang de façon régulière et sans aucune sensation désagréable. Grâce à eux, depuis une dizaine d'années, la prévention et le dépistage des maladies se sont nettement améliorés. De plus, avec la découverte récente, ici-même, d'un traitement contre les tumeurs cancéreuses, administré par un nano-drone capable de circuler au travers les tissus et organes du corps humain sans provoquer la moindre lésion, cette maladie est maintenant considérée comme chronique, quelle qu'en soit sa forme. Les hospitalisations de plus d'une journée sont très rares à l'hôpital, car les soins post-opératoires et la surveillance peuvent se faire au domicile des malades. Grâce aux progrès de la biologie moléculaire, de la bio-informatique, et de l'intelligence augmentée qui a succédé à l'intelligence artificielle du début du siècle, chacun dispose d'un jumeau numérique qui est une réplique totale et personnalisée de son anatomie et de son métabolisme. Les médecins et chirurgiens peuvent ainsi, depuis quelques années, tester l'efficacité d'un traitement ou d'une intervention sur notre jumeau numérique avant de l'administrer ou de l'appliquer au "vrai" patient, sans aucun risque et avec un résultat optimal. Ces progrès participent aussi à l'augmentation de la demande de soins et à une fréquence accrue des séjours hospitaliers, même s'ils sont plus courts.

Après trois années d'études d'ingénieur à IMT Mines Albi qui m'ont permis de me former sur les différents outils de modélisation et de simulation numérique fonctionnant sur des ordinateurs quantiques de 3ème génération, j'ai fait un doctorat dans le laboratoire de recherche en ingénierie organisationnelle pour la santé (le LARIOS) qui comporte une cinquantaine de chercheurs et qui est dirigé par le professeur Leah Alsamadi. Ma thèse portait sur la conception de jumeaux numériques personnalisés de patients, synchronisés par des capteurs biomimétiques de nouvelle génération. J'ai ensuite travaillé pendant 4 ans dans le service R&D d'une entreprise de biotechnologie, puis j'ai eu cette opportunité de partir sur Mars pour travailler sur le pilotage prédictif du CHU de Serenity-81. Mon travail consiste à suivre en temps réel les parcours des patients et l'occupation des différentes ressources humaines et techniques. Pour cela, j'enfile un casque spécialement conçu qui me permet de m'immerger dans n'importe quelle salle du double numérique de l'hôpital en faisant quelques mouvements très simples avec mes mains, ou simplement par la pensée, mais je ne suis pas encore très à l'aise avec cette option qui nécessite de l'entrainement et de la concentration. Je peux ainsi disposer d'une vue de la position des "vrais" patients, obtenue grâce à l'implant cochléaire multimodal que nous avons tous dès notre majorité. En plus de remplacer les bons vieux smartphones de nos grands-parents, il émet un signal unique et crypté qui permet de nous identifier et de nous localiser, ce qui est un gage de sécurité sur Mars. Je dispose aussi d'une autre vue

correspondant à la position du jumeau numérique de chaque patient, selon la prédiction calculée par un algorithme. Je peux très facilement superposer ces deux vues, et ainsi voir les écarts entre le parcours réel, et le parcours prédictif de chaque patient. Je visualise aussi dans l'écran intégré à mon casque des graphiques en trois dimensions que je peux facilement instancier par la voix, et modifier par des gestes simples. Ils me permettent de disposer d'informations quantitatives, agrégées ou détaillées, sur la situation courante des patients, et sur le futur proche : combien de patients sont dans cette salle d'attente ? depuis combien de temps chacun d'eux est arrivé ? quelle est la prédiction de temps restant à attendre avant d'être pris en charge par un médecin ou une infirmière ? selon le dossier médical et le relevé des constantes physiologiques collectées par des biocapteurs et transmis en temps réel grâce à l'implant cochléaire, quel devrait être les prochaines étapes du parcours de chaque patient ? à cet instant, y a-t-il des perturbations détectées dans la suite du parcours, ou des perturbations probables à venir ? Tel un contrôleur aérien avec les aéronefs et les navettes spatiales, j'ai une maitrise totale des flux de patients dans mon espace de travail grâce à ces informations dont je dispose en temps réel. Quand une décision doit être prise par rapport à une situation perturbée, je me téléporte auprès des opérationnels, non pas physiquement, mais avec mon hologramme, afin d'en discuter avec eux, et leur montrer toutes les alternatives, que je peux leur projeter sur un écran virtuel haute résolution. Malgré les progrès réalisés depuis le début du 21ème siècle, et contrairement à ce que prétendaient alors certains futurologues, les machines intelligentes ne nous ont pas remplacés car elles sont tout simplement dépourvues d'émotion, même si elles sont capables de la détecter sur des humains avec parfois plus d'acuité que nous. Ces machines nous apportent une aide considérable qui nous permet de gérer de multiples situations complexes qu'elles seules sont capables de mémoriser, et de retrouver en un temps record quand une situation similaire se présente. Si elles disposent d'une intelligence logico-mathématique aussi performante que la nôtre, et peut-être même supérieure quand il s'agit de "force brute", elles sont par contre dénuées de toutes les autres formes d'intelligence qui nous caractérisent de façon unique : intelligence verbo-linguistique, musicale, corporelle, intra et interpersonnelle, etc.

Avant mon départ pour Mars, mon grand-père, qui se doutait que je ne le reverrai sans doute jamais en chair et en os, même si l'espérance de vie sur Terre est maintenant de 103 ans pour les femmes comme pour les hommes, m'a donné un vieux manuscrit en papier qu'il gardait précieusement. Il l'avait rédigé en 2022, alors qu'il avait presque 60 ans, et l'avait intitulé "*Du diagnostic organisationnel au pilotage prédictif des parcours patient à l'hôpital*". Il était enseignant-chercheur dans l'école où j'ai obtenu mon diplôme d'ingénieur, car il m'avait convaincue, avec son bagou de petit-fils d'immigrés italiens, que c'était l'une des meilleures écoles de… l'Univers ! Je sais qu'il travaillait pour essayer d'améliorer l'organisation des hôpitaux. Il me l'avait expliqué durant nos parties de pêche sur le bassin d'Arcachon, alors que j'étais encore une petite fille. Ce qu'il me racontait me faisait sourire, j'avais du mal à le croire, et à l'écouter. Jusqu'au jour où, en décrochant un mérou d'au moins 50 kilos, je me suis planté l'hameçon dans un doigt. Rien de grave, mais il a dû me conduire aux urgences de l'hôpital le plus proche pour que l'on me retire cet hameçon. Et moi qui n'avait encore jamais mis les pieds dans un hôpital, j'ai réalisé tout ce que mon grand-père me racontait. Alors que nous attendions depuis plus de 5 heures dans une salle d'attente bondée de malades parfois bien plus éclopés que moi, je me suis tournée vers lui, et, à la tête que je faisais, je pense qu'il a dû lire dans mes pensées : "*Papinou, quand je serai grande, moi aussi je veux améliorer l'organisation de l'hôpital*".

Fin

Références bibliographiques

☞ Non comprises les références personnelles listées dans la section 1.9

1 Afferni, P., Merone, M., Soda, P. (2018). Hospital 4.0 and Its Innovation in Methodologies and Technologies. Dans 2018 IEEE 31st International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS). 2018 IEEE 31st International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS). IEEE, Karlstad, 333–338. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://ieeexplore.ieee.org/document/8417260/.

2 Aguasca, K., Berion, C., Claire, C.D.J., Duforeau, R., Ecourtemer, E., Guigou, O., Iberraken, M., Nanceau, B. (2016). « Qualité et sécurité des soins dans les établissements de santé : quels ratios d'effectifs dans les services de soins et comment sont-ils calculés ?». Module interprofessionnel de santé publique, EHESP, 2016, 61.

3 Andellini, M., Fernandez Riesgo, S., Morolli, F., Ritrovato, M., Cosoli, P., Petruzzellis, S., Rosso, N. (2017). Experimental application of Business Process Management technology to manage clinical pathways: a pediatric kidney transplantation follow up case. BMC Medical Informatics and Decision Making, 17(1), 151.

4 Askin, R.G., Standridge, C.R. (1993). Modeling and Analysis of Manufacturing Systems Wiley, New York

5 Augusto, V., Murgier, M., Viallon, A. (2018). A modelling and simulation framework for intelligent control of emergency units in the case of major crisis. 2018 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, Gothenburg, Sweden, 2495–2506. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://ieeexplore.ieee.org/document/8632438.

6 Aydt, H., Turner, S.J., Cai, W., Low, M.Y.H. (2008). Symbiotic Simulation Systems: An Extended Definition Motivated by Symbiosis in Biology. Dans 2008 22nd Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation. 2008 ACM/IEEE/SCS Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation (PADS). IEEE, Roma, Italy, 109–116..

7 Banks, J. (2007). Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice Wiley ; Co-published by Engineering & Management Press, New York.

8 Bernues, F.J., Bolle, D.M. (1973). The Digital Twin-Ferrite-Toroid Circular Waveguide Phaser. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-21(12), 842–845.

9 Binam F. (2013). La prise en charge des urgences - un modèle d'organisation pour les pays en voie de développement. Editions Karhala, 168 p.

10 Bosch-Mauchand, M., Siadat, A., Perry, N., Bernard, A. (2012). VCS: value chains simulator, a tool for value analysis of manufacturing enterprise processes (a value-based decision support tool). Journal of Intelligent Manufacturing, 23(4), 1389–1402.

11 Budgaga, W., Malensek, M., Pallickara, Sangmi, Harvey, N., Breidt, F.J., Pallickara, Shrideep (2016). Predictive analytics using statistical, learning, and ensemble methods to support real-time exploration of discrete event simulations. Future Generation Computer Systems, 56, 360–374.

12 Cardin, O. (2007). Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production : application à un système flexible de production. Thèse de doctorat, These de doctorat, Nantes. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.theses.fr/2007NANT2088.

13 Cardin, O., Castagna, P. (2009). Using online simulation in Holonic Manufacturing Systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22(7), 1025–1033.

14 Cimino, C., Negri, E., Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. Computers in Industry, 113, 103130.

15 Claveranne, J.P., Pascal, C., Coulomb, A. (2004). Repenser les processus à l'hôpital. Une méthode au service de la performance. Paris Editions Médica, 242 p.

16 Conte, V. (2008). Optimisation du parcours de l'usager à l'hôpital : un processus à construire. Rôle du Directeur des Soins. Mémoire de l'EHESP. 2008, 49.

17 Dey, N., Ashour, A.S., Shi, F., Fong, S.J., Tavares, J.M.R.S. (2018). Medical cyber-physical systems: A survey. Journal of Medical Systems, 42(4), 74.

18 El murabet, A., Abtoy, A., Touhafi, A., Tahiri, A. (2020). Ambient Assisted living system's models and architectures: A survey of the state of the art. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 32(1), 1–10.

19 Erol, T., Mendi, A.F., Doğan, D. (2020). The Digital Twin Revolution in Healthcare. 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). 1–7.

20 Fargeon, V. (2014). Chapitre 4. La production publique de soins : le secteur hospitalier en mutations, Introduction à l'économie de la santé. Sous la direction de Fargeon Valérie. Presses universitaires de Grenoble, 2014, pp. 81-95.

21 Galli, G., Patrone, C., Bellam, A.C., Annapareddy, N.R., Revetria, R. (2019). Improving Process Using Digital Twin: A Methodology for the Automatic Creation of Models. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2019. WCECS 2019, 5.

22 Georges-Tarragano, C. (2015). Soigner (l')humain. Manifeste pour un juste soin au juste coût. Presses de l'EHESP, « Controverses », 2015, ISBN : 9782810903962.
23 Geraint I. Palmer, Vincent A. Knight, Paul R. Harper & Asyl L. Hawa (2019). Ciw: An open-source discrete event simulation library, Journal of Simulation, 13:1, 68-82, DOI: 10.1080/17477778.2018.1473909
24 Glaessgen, E.H., Stargel, D.S. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. Dans 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 2012.
25 Goldberg, D. (1988). Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning.
26 Goldberg, D.E., Holland, J.H. (1988). Genetic Algorithms and Machine Learning. Machine Learning, 3(2), 95–99.
27 Govil, M.K., Fu, M.C. (1999). Queueing theory in manufacturing: A survey. Journal of Manufacturing Systems, 18(3), 214–240.
28 Greasley, A. (2020). Architectures for Combining Discrete-event Simulation and Machine Learning:. 10th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. SCITEPRESS - Science and Technology
29 Greasley, A., Edwards, J.S. (2021). Enhancing discrete-event simulation with big data analytics: A review. Journal of the Operational Research Society, 72(2), 247–267.
30 Hanisch, A., Tolujew, J., Schulze, T. (2005). Initialization of online simulation models. Dans Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005. 9 pp.-.
31 Haque, S.A., Aziz, S.M., Rahman, M. (2014). Review of Cyber-Physical System in Healthcare. International Journal of Distributed Sensor Networks, 10(4), 217415.
32 Harmonosky, C.M. (1990). Implementation issues using simulation for real-time scheduling, control, and monitoring. Dans Winter Simulation Conference Proceedings, 1990. Winter Simulation Conference Proceedings, 1990. 595-598.
33 Harmonosky, C.M. (1995). Simulation-based real-time scheduling: review of recent developments. Dans Winter Simulation Conference Proceedings, 1995. Winter Simulation Conference Proceedings, 1995. 220–225.
34 Hollocks, B.W. (2006). Forty years of discrete-event simulation—a personal reflection. Journal of the Operational Research Society, 57(12), 1383–1399.
35 Hood, L. (2013). Systems Biology and P4 Medicine: Past, Present, and Future. Rambam Maimonides Medical Journal, 4(2), e0012.
36 Insup Lee, Sokolsky, O., Sanjian Chen, Hatcliff, J., Eunkyoung Jee, BaekGyu Kim, King, A., Mullen-Fortino, M., Soojin Park, Roederer, A., Venkatasubramanian, K.K. (2012). Challenges and Research Directions in Medical Cyber–Physical Systems. Proceedings of the IEEE, 100(1), 75–90.
37 Kampa, A., Gołda, G., Paprocka, I. (2017). Discrete Event Simulation Method as a Tool for Improvement of Manufacturing Systems. Computers, 6(1), 10.
38 Kane, E.M., Scheulen, J.J., Püttgen, A., Martinez, D., Levin, S., Bush, B.A., Huffman, L., Jacobs, M.M., Rupani, H., T. Efron, D. (2019). Use of Systems Engineering to Design a Hospital Command Center. The Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety, 45(5), 370–379.
39 Karakra, A. (2021). HospiT'Win : designing a discrete event simulation-based digital twin for real-time monitoring and near-future prediction of patient pathways in the hospital. Thèse de doctorat, These de doctorat, Ecole nationale des Mines d'Albi-Carmaux. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.theses.fr/2021EMAC0005.
40 Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., Lamothe, J. (2019). HospiT'Win: A predictive simulation-based digital twin for patients pathways in hospital. Dans 2019 IEEE EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics, BHI 2019 - Proceedings.
41 Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., Lamothe, J., Taweel, A. (2019). Pervasive Computing Integrated Discrete Event Simulation for a Hospital Digital Twin. Dans Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA.
42 Karakra, A., Lamine, E., Fontanili, F., Lamothe, J. (2020). HospiT'Win: A digital twin framework for patients' pathways real-time monitoring and hospital organizational resilience capacity enhancement. Dans 9th International Workshop on Innovative Simulation for Health Care, IWISH 2020. 62–71.
43 Koren, G., Polack, F., Joyeux, D. (1993). Digital twin-image elimination in soft x-ray in-line holography. Dans Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 260–274.
44 Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 1016–1022.
45 Lamine, E. (2019). Ingénierie dirigée par les modèles de la transformation numérique du système de santé - Application aux parcours d'usagers. Habilitation à Diriger les Recherches. INP Toulouse. Spécialité Systèmes Industriels.
46 Law, A.M. (2013). Simulation modeling and analysis Fifth edition. McGraw-Hill Education, Dubuque.
47 Lee, Edward A. (2006). Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate? Position Paper for NSF Workshop On Cyber-Physical Systems. Austin, Texas. P. 9.

48 Lee, J., Azamfar, M., Singh, J., Siahpour, S. (2020). Integration of digital twin and deep learning in cyber-physical systems: towards smart manufacturing. IET Collaborative Intelligent Manufacturing, 2(1), 34–36.
49 Lemoigne, J.L. La théorie du système général– théorie de la modélisation, éd. Presses universitaires de France, 1ère éd. 1977, 4ème éd. 1994.
50 Li, T., Cao, J., Liang, J., Zheng, J. (2015). Towards context-aware medical cyber-physical systems: design methodology and a case study. Cyber-Physical Systems, 1(1), 5–23.
51 Liu, Y., Zhang, L., Yang, Y., Zhou, L., Ren, L., Wang, F., Liu, R., Pang, Z., Deen, M.J. (2019). A Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin. IEEE Access, 7, 49088–49101.
52 Maidstone, R. (2012). Discrete Event Simulation, System Dynamics and Agent Based Simulation: Discussion and Comparison. Dans System 1.6, pp. 1–6, 2012.
53 Manivannan, S., Banks, J. (1991). Real-time control of a manufacturing cell using knowledge-based simulation. Dans 1991 Winter Simulation Conference Proceedings. 1991 Winter Simulation Conference Proceedings. 251–260.
54 Matloff, N. (2008). Introduction to Discrete-Event Simulation and the SimPy Language. , 33.
55 McDonald, T., Van Aken, E.M., Rentes, A.F. (2002). Utilising Simulation to Enhance Value Stream Mapping: A Manufacturing Case Application. International Journal of Logistics Research and Applications, 5(2), 213–232.
56 Meessen, B. & Van Damme, W. (2005). Systèmes de santé des pays à faible revenu : vers une révision des configurations institutionnelles ?. Mondes en développement, vol. no 131, no. 3, 2005, pp. 59-73.
57 Millien C., Chaput H., Cavillon M., (2018). La moitié des rendez-vous sont obtenus en 2 jours chez le généraliste, en 52 jours chez l'ophtalmologiste, Études et Résultats, DREES n°1085, octobre 2018.
58 Mirdamadi, S. (2009). Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution. Thèse de doctorat, phd, . [En ligne]. Disponible à l'adresse : http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000869/
59 Mladenić, D., Bratko, I., Paul, R.J., Grobelnik, M. (1994). Using machine learning techniques to interpret results from discrete event simulation. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 399–402
60 Monteiro, T., Anciaux, D., Espinasse, B., Ferrarini, A., Labarthe, O., Montreuil, B., Roy, D. (2008). Chapitre 6. L'intérêt des agents pour la simulation de la chaîne logistique. Dans La simulation pour la gestion des chaînes logistiques. Thierry, C., A. Thomas, and G. Bel (eds.) Traité IC2, série systèmes automatisés. Hermès-Lavoisier, 196–226. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://hal.inria.fr/inria-00598666
61 Montrose, A. (2013). Développement d'un immunocapteur impédimétrique pour la détection et la quantification d'une sous-population cellulaire : application au diagnostic précoce des infections. Thèse de doctorat, Toulouse 3. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.theses.fr/2013TOU30033.
62 Negri, E., Fumagalli, L., Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. Procedia Manufacturing, 11, 939–948.
63 Norly, G. (2012). Contribution à l'ingénierie des systèmes de production de soins dans les pays en voie de développement : vers un système sans murs en Haïti. Thèse de doctorat de l' Université Paul Verlaine de Metz.
64 Onggo, B.S., Corlu, C.G., Juan, A.A., Monks, T., de la Torre, R. (2021). Combining symbiotic simulation systems with enterprise data storage systems for real-time decision-making. Enterprise Information Systems, 15(2), 230–247.
65 Ortiz Bas, A. (2016). Understanding Organisational Engineering. International Journal of Production Management and Engineering, 4(1), 1.
66 Pang, Z., Yang, G., Khedri, R., Zhang, Y.-T. (2018). Introduction to the Special Section: Convergence of Automation Technology, Biomedical Engineering, and Health Informatics Toward the Healthcare 4.0. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 11, 249–259.
67 Paris, J. (1996). Une méthode d'optimisation-simulation par algorithme évolutionniste en gestion de production juste-à-temps. Journal européen des systèmes automatisés : JESA, 30(7), .
68 Patrone, C., Galli, G., Revetria, R. (2019). A State of the Art of Digital Twin and Simulation Supported by Data Mining in the Healthcare Sector. IOS Press Ebook, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. Volume 318: Advancing Technology Industrialization Through Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques.
69 Ptak, C., Smith, C., 2016. Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP), Industrial Press, Inc.
70 Putnik, G., Ferreira, L., Lopes, N., Putnik, Z. (2019). What is a Cyber-Physical System: Definitions and models spectrum. FME Transactions, 47(4), 663–674.
71 Querriau, X., Kissiyar, M., Peeters, D., Thomas, I. (2004). Localisation optimale d'unités de soins dans un pays en voie de développement : analyse de sensibilité. [En ligneCybergeo: European Journal of Geography], 24 August 2004. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://journals.openedition.org/cybergeo/3316.
72 Renaudin CP, Barbier B, Roriz R, Revel D, Amiel M. Coronary arteries: New design for three-dimensional arterial phantoms. Radiology 1994;190(2):579-582.

73 Renders Jean-Michel. (1995). Algorithmes génétiques et réseaux de neurones : applications à la commande de processus. Lavoisier Hermès.
74 Robinson, S. (ed.) (2011). Conceptual modeling for discrete-event simulation CRC Press, Boca Raton.
75 Rodrigues, J.J.P.C., De Rezende Segundo, D.B., Junqueira, H.A., Sabino, M.H., Prince, R.M., Al-Muhtadi, J., De Albuquerque, V.H.C. (2018). Enabling Technologies for the Internet of Health Things. IEEE Access, 6, 13129–13141.
76 Roux, J. (2004). Plants that come apart. Hydrocarbon Engineering, vol. 9, no. 6, pp. 66-69
77 Safon, M.O. (2021). « Les réformes hospitalières en France : aspects historiques et réglementaires », Centre de documentation de l'IRDES, 2021, 68.
78 Schriber, T.J., Reitman, J., Ockene, A., Hixson, H.G. (2017). History of the winter simulation conference: Origins and early years (1967–1974). 2017 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, Las Vegas, NV, 40–49.
79 Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. Computers in Industry, 130, 103469.
80 Semini, M., Fauske, H., Strandhagen, J. (2006). Applications of Discrete-Event Simulation to Support Manufacturing Logistics Decision-Making: A Survey. Dans Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. 2006 Winter Simulation Conference.
81 Smith, J.S. (2003). Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. Journal of Manufacturing Systems, 22(2), 157–171.
82 Smith, J.S., Wysk, R.A., Sturrock, D.T., Ramaswamy, S.E., Smith, G.D., Joshi, S.B. (1994). Discrete event simulation for shop floor control. Dans Proceedings of Winter Simulation Conference. Proceedings of Winter Simulation Conference. 962–969.
83 Tao, F., Qi, Q., Wang, L., Nee, A.Y.C. (2019). Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. Engineering, 5(4), 653–661.
84 Tao, F., Zhang, M. (2019). Digital twin driven smart manufacturing, Academic Press , ISBN 978-0-12-817630-6.
85 Tavakoli, S., Mousavi, A., Komashie, A. (2008). A generic framework for real-time discrete event simulation (DES) modelling. Dans 2008 Winter Simulation Conference. 2008 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, Miami, FL, USA, 1931–1938.
86 Thierry, C., Thomas, A., Bel, G. (2008). La simulation pour la gestion des chaînes logistiques. Hermès Science Publications - Lavoisier.
87 Thulasidasan, S., Kroc, L., Eidenbenz, S. (2014). Developing Parallel, Discrete Event Simulations in Python - First Results and User Experiences with the SimX Library:. 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, Vienna, Austria, 188–194
88 Tizio, S. (2004). Etat de santé et systèmes de soins dans les pays en développement : La contribution des politiques de santé au développement durable. Mondes en développement, vol. no 127, no. 3, 2004, pp. 101-117.
89 Zeigler, B.P., Muzy, A., Kofman, E. (2019). Theory of modeling and simulation: discrete event and iterative system computational foundations 3rd ed. Academic Press, San Diego (Calif.).
90 Zeigler, B.P., Traoré, M.K., Zacharewicz, G., Duboz, R. (2019). Value-based learning healthcare systems: integrative modeling and simulation. IET Healthcare Technologies Series, Institution of Engineering and Technology, 376 p.
91 Zhuang, C., Liu, J., Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96(1–4), 1149–1163.

Table des illustrations

Figure 1. Principe du couplage entre simulation et optimisation ____ *27*
Figure 2. Fonctions de pilotage d'un processus opérationnel assurées par 3 formes de simulation : (1) temps-réel, (2) projection, et (3) correction ____ *34*
Figure 3. Industrialisation de la rénovation énergétique des bâtiments ____ *36*
Figure 4. Positionnement de la simulation dans une dynamique de transformation organisationnelle ____ *38*
Figure 5. Approche "métier" pour passer du monde réel à un modèle de simulation ____ *39*
Figure 6. Transformation du modèle métier VSM vers un modèle de simulation (Witness) ____ *39*
Figure 7. Comparaison de MRP2, Kanban et DDMRP suivant l'encours moyen (WIP) et le délai de réalisation (OTD) ____ *41*
Figure 8. Méthodologie d'optimisation couplée à la simulation pour déterminer les valeurs optimales des niveaux des buffers DDMRP ____ *42*
Figure 9. Ilustration de la transformation d'un fichier d'événements (log) en une cartographie de processus pour modéliser des parcours patients à l'hôpital. ____ *44*
Figure 10. Parcours patients obtenus avec l'algorithme "Heuristic miner" ____ *45*
Figure 11. Les mêmes parcours patients, obtenus avec l'algorithme "Stable heuristic miner" ____ *45*
Figure 12. Les quatre scenarios de transport testés avec la simulation ____ *47*
Figure 13. Comparaison des scénarios simulés en termes d'efficience et d'efficacité ____ *48*
Figure 14. Démarche proposée pour diagnostiquer et améliorer le fonctionnement d'un centre d'appels ____ *50*
Figure 15. Approche proposée d'IDM pour la coordination de la prose en charge à domicile ____ *52*
Figure 16. Transformation du modèle métier vers la formulation mathématique ____ *53*
Figure 17. Description de la synchronisation de parcours patients à l'aide du langage GRAFNet ____ *56*
Figure 18. Remise des diplômes de la 1ère promotion IFIA en 2011 avec mon équipe (de gauche à droite) : Christel Cabieces, Julie Teil, Lauriane Ordronneau, Nathalie Veuillez, Fabienne Espitalier, Cendrine Gatumel, Christine Boher et Henri Berthiaux. ____ *64*
Figure 19. Comparaison entre Lean seul et articulation (Lean + Ergonomie) sur la durabilité de la performance et les effets sur la Santé. Action partenariale DIAPASON (Midact, 2016) ____ *72*
Figure 20. Étudiants du département OGP de l'IUT de Cergy-Pontoise en travaux pratiques sur la LFE ____ *75*
Figure 21. Ligne de production du projet e-MAC : e-Manufacturing for Advanced Control ____ *76*
Figure 22. Projet e.MAC réalisé en collaboration avec le lycée Rascol (2006) et présenté lors des journées IODE en mars 2007 ____ *76*
Figure 23. Rapport des publications référencées Scopus ____ *78*
Figure 24. Rapport des publications référencées Web of Science (WoS) ____ *78*
Figure 25. Rapport des publications référencées Google Scholar ____ *79*
Figure 26. Les interconnexions entre les trois classes d'acteurs du système de santé ____ *90*
Figure 27. Aperçu de institutions, organismes et agences qui constituent le système de santé en France (source https://www.editionscdp.fr/img/NL/enquete-clinic-fevrier-institutions.pdf) ____ *91*
Figure 28. Parcours de soins, parcours de santé et parcours de vie ____ *93*
Figure 29. Positionnement temporel du diagnostic organisationnel et du pilotage prédictif ____ *96*
Figure 30. Périmètre du pilote expérimental de tracking patients au CH Perpignan. La ligne bleue correspond à la trace enregistrée du parcours d'un patient entre le SAU et le service CHIR-VIS ____ *98*
Figure 31. Cartographie fonctionnelle d'un SIH (tirée de Segmentation fonctionnelle du SIH, ANAP 2012) ____ *101*
Figure 32. Corrélation temporelle entre Industrie 4.0 et Hôpital/Santé 4.0 ____ *103*
Figure 33. Architecture d'un système cyber-physique (CPS), inspiré de (Putnik, 2019) ____ *104*
Figure 34. Vue d'ensemble des CPS-S pour le suivi médical, la prévention et le bien-être ____ *107*
Figure 35 : Chaîne de transmission des données entre partie physique et partie cyber (d'après Rodrigues, 2018) ____ *109*

Figure 36. Évolution du nombre de références scientifiques référencées Scopus portant la mention "Digital Twin" dans le titre, le résumé ou les mots-clés (Scopus, mars 2022) _____ *111*
Figure 37. Répartition des références utilisant "Digital Twin" dans les principaux domaines scientifiques (Scopus, mars 2022) _____ *112*
Figure 38. Répartition des publications "Digital Twin" par pays (Scopus, mars 2022) _____ *113*
Figure 39 : CPS-S avec boucle de retour. Extrait de (Li et al. 2015) _____ *115*
Figure 40. Modèle numérique. _____ *116*
Figure 41. Ombre numérique _____ *116*
Figure 42. Double numérique _____ *116*
Figure 43. DT avec simulation prospective ou replay, connexion off-line, et initialisation asynchrone _____ *123*
Figure 44. DT-CPS avec simulation prédictive, connexion off-line, et initialisation synchrone _____ *124*
Figure 45. DT-CPS avec simulation de suivi (monitoring), connexion on-line, et initialisation synchrone _____ *125*
Figure 46. Processus de référence _____ *126*
Figure 47. Niveau des stocks dans l'état initial et après 2 heures, 4 heures et 8 heures _____ *127*
Figure 48. État initial des machines et après 2 heures, 4 heures et 8 heures _____ *128*
Figure 49. Centre de commande du John Hopkins Hospital à Baltimore _____ *131*
Figure 50 : Proposition de CPS-S à base de doubles numériques des parcours patients à l'hôpital _____ *135*
Figure 51. Exemple d'une information complémentaire apportée par le DT : la localisation prédictive d'un patient entre deux activités de son parcours _____ *137*
Figure 52. Processus théorique de Pilotage, Prédiction et Optimisation _____ *139*
Figure 53. Illustration du passage du DT On-line au DT Off-line _____ *140*
Figure 54. Vue d'ensemble de l'approche proposée à base de doubles numériques pour évaluer l'impact d'une crise et les scénarios alternatifs _____ *144*

Table des matières

Préambule et remerciements 7

Sommaire 11

Introduction 13

Synthèse et mise en cohérence des travaux passés 17
1.1. Curriculum vitae 17
1.1.1. Parcours professionnel 17
1.1.2. Parcours universitaire 18
1.1.3. Profil d'enseignant-chercheur 20
1.1.4. Activités d'enseignement 21
1.2. La simulation à événements discrets comme discipline principale 22
1.2.1. Les origines (1992), grâce à l'enseignement, qui guident mes futurs travaux de recherche avec la simulation 24
1.2.2. L'appropriation, durant mes années de thèse (1995-1999) : de l'enseignement de la simulation vers la recherche, avec la simulation couplée à l'optimisation 25
1.3. L'émancipation : enseignement et recherche en simulation à l'École des Mines d'Albi-Carmaux et au CGI (2003-2016) 30
1.3.1. Évolution de l'enseignement en simulation de flux 31
1.3.2. Les premiers travaux de recherche au CGI en simulation 32
1.3.3. Premiers travaux sur la simulation "on-line" avec la thèse de Samieh Mirdamadi (#1) 33
1.3.4. L'industrialisation de la rénovation énergétique avec la thèse de Marie Falcon (#2) 35
1.3.5. Une évaluation du DDMRP avec la simulation avec la thèse de Romain Miclo (#3) 37
1.4. La consolidation : un processus en cours depuis 2016 dans le domaine de la santé 43
1.4.1. Le diagnostic des parcours patients avec la thèse de Sina Namaki Araghi (#4) 43
1.4.2. Le transport des produits sanguins avec la thèse de Quentin Schoen (#5) 46
1.4.3. Les flux d'appels dans un SAMU avec la thèse d'Eva Petitdemange (#6) 49
1.4.4. La planification des tournées à domicile avec la thèse de Liwen Zhang (#7) 51
1.4.5. Un double numérique des parcours patients avec la thèse d'Abdallah Karakra (#8) 55
1.4.6. La régulation des blocs opératoires avec la thèse de Leah Rifi (#9) 58
1.4.7. La planification d'un centre d'appels pour sourds et malentendants avec la thèse de Samer Alsamadi (#10) 59
1.5. Autres activités d'encadrement dans la recherche 61
1.5.1. Encadrement de Masters ou de DEA 61
1.5.2. Encadrement de post-doctorats 61
1.6. Responsabilités collectives assurées 61
1.6.1. Mes premières responsabilités à l'IUT de Cergy-Pontoise 62
1.6.2. Une nouvelle responsabilité dès mon arrivée à l'École des Mines d'Albi 63
1.6.3. Un autre défi : la formation d'ingénieurs par la voie de l'apprentissage 63
1.6.4. La responsabilité de l'axe de recherche appliquée IOS 65
1.7. Activités d'expertise technique et scientifique 69
1.7.1. Thèses de 3ème cycle en sciences pour l'ingénieur 69

1.7.2. Thèses de 3ème cycle en santé 69
1.7.3. Autres activités d'expertise 70
1.8. Ingénierie de plusieurs plateformes expérimentales pour l'enseignement et la recherche .. 73
1.8.1. Une cellule de fabrication robotisée avec des équipements didactiques : MiniFlex-T ... 74
1.8.2. Une Ligne Flexible Expérimentale avec des composants industriels : la LFE 74
1.8.3. Le projet e-MAC (e-Manufacturing for Advanced Control) 75
1.9. Production scientifique 77
1.9.1. Dix articles dans des revues avec comité de lecture (ACL) 79
1.9.2. Neuf chapitres d'ouvrages (OS) 80
1.9.3. Plus de trente communications avec actes dans des congrès internationaux (C-ACTI) 80
1.9.4. Quatorze communications dans des conférences francophones avec actes (C-ACTN) 82
1.10. Interactions avec l'environnement scientifique, social et économique 83
1.10.1. Participation à des comités scientifiques et actions de vulgarisation scientifique 83
1.10.2. Relations internationales 84
1.10.3. Montage et coordination de projets avec des partenaires économiques 85

Perspectives scientifiques et projet de recherche 89
2.1. Introduction 89
2.2. Un espace de problèmes délimité par la production de soins à l'hôpital 90
2.2.1. Le système de santé et la production de soins 90
2.2.2. Les parcours patients sous toutes leurs formes 92
2.2.3. Le diagnostic organisationnel et le pilotage prédictif des parcours patient 95
2.3. L'évolution de l'hôpital avec le développement du numérique dans la production de soins jusqu'aux systèmes cyber-physiques en santé (CPS-S) 99
2.3.1. Frise chronologique de deux siècles d'évolution de la médecine et de l'hôpital, et développement récent du numérique 99
2.3.2. Qu'est-ce qu'un CPS, et quelle est son architecture ? 103
2.3.3. Liens entre CPS et double numérique 105
2.4. Les systèmes cyber-physiques (CPS) utilisés en santé, les CPS-S 106
2.4.1. Vue d'ensemble des CPS-S 106
2.4.2. Les CPS-S pour le suivi médical 108
2.4.3. Les CPS-S pour le bien-être et la prévention 108
2.5. L'apport d'un double numérique dans un CPS-S pour le pilotage prédictif 110
2.5.1. Mais qu'entend-on par "Double Numérique" en général ? 110
2.5.2. Particularités des doubles numériques en santé 114
2.5.3. Modèle numérique, ombre numérique, ou double numérique ? 115
2.5.4. De la simulation au double numérique, rétrospective de 30 ans de recherche dans l'aide à la décision pour le pilotage en temps réel 117
2.5.5. Typologie des doubles numériques à base de simulation à événements discrets 121
2.5.6. Exemple illustratif de l'impact de l'initialisation sur la prédiction à court terme 125
2.6. Avoir une image fiable de la situation courante avec un centre de commande hospitalier 128
2.6.1. La localisation et les mouvements patients, un point faible du SIH ? 128
2.6.2. Les centres de commande, premier pas vers un CPS hospitalier ? 130
2.6.3. Des capteurs pour le suivi des patients et des ressources 132
2.7. Mes perspectives scientifiques : un DT-CPS pour le suivi organisationnel et prédictif des parcours patient à l'hôpital 134
2.7.1. Un double numérique on-line pour assurer la fonction de suivi et pilotage en temps réel avec de la simulation "monitoring" 135

2.7.2. Un double numérique off-line asynchrone pour assurer la fonction de prédiction 137
2.7.3. Un double numérique off-line asynchrone pour assurer la fonction d'optimisation 138
2.8. Conclusion et perspectives 141
2.8.1. L'axe IOS aujourd'hui 141
2.8.2. La politique scientifique de l'axe IOS dans un futur proche (2022-2025) 141
2.8.3. Le futur un peu plus lointain de l'axe IOS 142
2.8.4. Quelle dimension internationale pour l'axe IOS ? 144

Conclusion générale 147

Épilogue 151

Références bibliographiques 155

Table des illustrations 162

Table des matières 165

Du diagnostic organisationnel au pilotage prédictif des parcours patient à l'hôpital. Une proposition de système cyber-physique hospitalier à base de doubles numériques

L'hôpital est un système particulièrement complexe. Ses missions sont orchestrées par un bouquet de processus composé d'une multitude d'activités réalisées dans une organisation structurée par des services souvent fortement cloisonnés, au travers desquels les patients suivent de nombreux parcours très variés, en étant pris en charge par différentes catégories de ressources humaines. L'incertitude organisationnelle liée au facteur humain est omniprésente et nécessite de prendre au fil de l'eau des décisions opérationnelles, peu souvent centralisées, pour réagir aux dérives et aux perturbations. La qualité des soins et l'excellence médicale sont, à juste titre, les critères prédominants de tout système de santé. Par contre, l'organisation des flux, et en particulier des parcours patients, est un aspect qui a été jusqu'à présent plutôt négligé. Les conséquences sont de plus en plus dramatiques pour les établissements de santé : le surmenage des personnels, même en dehors des périodes de crises sanitaires, et l'insatisfaction des patients face à des temps d'attente jugés trop longs, font que l'hôpital est constamment en tension. Face à une telle situation, on ne peut que constater qu'à l'ère du numérique, la prise en charge d'un patient dans son parcours de soins ne bénéficie pas d'outils de pilotage dignes de ce nom. Il est par exemple très difficile de connaitre en temps réel la volumétrie de patients présents dans l'hôpital ou dans certaines salles, ou leur temps de séjour. Il est encore plus difficile d'estimer de façon fiable les conséquences d'un événement imprévu sur l'organisation à court terme : retard d'un patient ou d'un médecin, urgence, afflux de patients, etc.
Ce manuscrit présente tout d'abord des problèmes et des solutions permettant de répondre au besoin de pilotage en temps réel des hôpitaux : les salles de commande, véritables tours de contrôle ou cockpits bardés d'écrans reportant et centralisant toutes les informations utiles à la maitrise de la situation courante, et du passé. En complément, la contribution nouvelle se situe dans le dessein d'un pilotage prédictif : disposer d'un outil d'aide à la décision permettant non seulement de prédire les conséquences à très court terme d'un événement imprévu, et aussi de proposer des solutions à appliquer au plus vite pour atténuer les perturbations qui pourraient survenir si l'on ne cherche pas à contrôler le cours de ces événements. La solution décrite dans ce manuscrit est assimilable à un système cyber-physique à base de trois doubles numériques interconnectés permettant de suivre, de prédire, et d'optimiser les parcours patients dans un hôpital que l'on peut qualifier de 4.0.

Mots-clés : système cyber-physique, double numérique, hôpital, simulation à événements discrets, parcours patients, salle de commande, pilotage prédictif.