

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>	PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications		Aide : 450 k€

## JUneau Numérique pour un sErvice d'Accueil des Urgences

**Tableau récapitulatif des personnes impliquées dans le projet**

Partenaire	Nom	Prénom	Position actuelle	Rôle & responsabilités dans le projet (4 lignes max)	Implication sur la durée du projet (personne.mois)
DISP	CHEUTET	Vincent	PU	Coordinateur scientifique	12
	MOYAU	Thierry	MCF	Autre membre	8
	TRILLING	Lorraine	MCF	Autre membre	8
	BOULEUX	Guillaume	MCF HDR	Autre membre	8
	Doctorant 1				36
	Ingénieur				12
CRAN	BRIL EL HAOUZI	Hind	PU	Responsable scientifique	10
	DERIGENT	William	PU	Autre membre	8
	DEMASURE	Guillaume	MCF	Autre membre	8
	Doctorant 2				36
CHU Saint-Etienne	MORY	Olivier	Dr	Responsable scientifique	5
	Post-Doc				12

### Table des matières

<b>1</b>	<b>CONTEXTE, POSITIONNEMENT ET OBJECTIFS DE LA PROPOSITION .....</b>	<b>2</b>
1.1	CONTEXTE .....	2
1.2	CARACTÈRE AMBITIEUX ET NOVATEUR DU PROJET .....	4
1.3	OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET POSITIONNEMENT PAR RAPPORT À L'ÉTAT DE L'ART .....	5
	OS1 - Architecture de JN .....	5
	OS2 - Pilotage hybride et non-intrusif .....	8
	OS3 - Cycle de vie des JN.....	9
1.4	MÉTHODOLOGIE ET GESTION DES RISQUES .....	10
	Méthodologie .....	10
	Structuration détaillée du projet .....	11
<b>2</b>	<b>ORGANISATION ET RÉALISATION DU PROJET .....</b>	<b>15</b>
2.1	COORDINATEUR SCIENTIFIQUE ET SON CONSORTIUM / SON ÉQUIPE.....	15
	Coordinateur.....	15
	Consortium .....	15
2.2	MOYENS MIS EN ŒUVRE ET DEMANDÉS POUR ATTEINDRE LES OBJECTIFS .....	16
	Justification DISP .....	16
	Justification CRAN.....	17
	Justification CHU Saint-Etienne .....	17
<b>3</b>	<b>IMPACT ET RETOMBÉES DU PROJET .....</b>	<b>17</b>
	Retombées socio-économiques .....	17
	Impacts scientifiques et technologiques.....	18
	Politique de dissémination et transfert .....	18
<b>4</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>19</b>

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>		<b>PRC</b>
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois	Aide : 450 k€
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications			

# 1 Contexte, positionnement et objectifs de la proposition

## 1.1 Contexte

Le Service d'Accueil des Urgences (SAU) est un secteur stratégique dans la chaîne hospitalière. Si l'accueil qui s'y fait constitue la première étape de prise en charge de certains patients dans l'hôpital, les SAU présentent néanmoins de nombreuses limites, notamment au niveau de la gestion du flux des arrivées qui détermine, fortement, le parcours du patient. Même si les tentatives ministérielles restent dans l'ombre du grand public, un certain nombre d'actions ont été menées par le ministère de la Santé pour obtenir des indicateurs ou des outils permettant d'améliorer la gestion de l'accueil des urgences. En 2015 par exemple, le ministère de la Santé avait mandaté le Haut Conseil de Santé Public (HCSP) afin de réaliser un tableau de bord de 15 indicateurs représentatifs du système de santé. Un de ces indicateurs s'intéressait particulièrement aux SAU puisqu'il s'agissait de l'indicateur « **temps d'attente moyen dans les services hospitaliers d'accueil des urgences** » et des membres du consortium de ce projet avaient obtenu le financement pour définir cet indicateur. Notre expérience du monde hospitalier nous a prouvé que le temps d'attente aux urgences est un des symptômes de la maturité de l'établissement sur la gestion de ses processus, du pilotage de l'activité et de la gestion de données. Ce macro-indicateur est multidimensionnel. En effet, il est le reflet de l'organisation interne :

- Du Service d'Accueil des Urgences ;
- Des plateaux techniques (imagerie, biologie, bloc opératoire) ;
- Des fonctions connexes (brancardage entre autre) ;
- Mais aussi, de l'organisation intra-service : procédure de prise en charge des patients au SAU, prise en compte des degrés d'urgence.

Il est aussi un moyen d'apprécier l'organisation des soins primaires de proximité et les modalités de recours de la population à ces soins et aux urgences. Le parcours du patient aux urgences peut donc être décrit (sans être exhaustif) par la Figure 1.

La complexité organisationnelle du SAU ainsi que sa dépendance à la disponibilité des lits de l'hôpital ne pouvaient se comprendre ni s'expliquer par une étude telle que celle menée par le ministère, basées sur l'évaluation d'indicateurs statiques. Si nous percevons bien que le temps de séjour aux urgences est un, voire le paramètre à monitorer pour un pilotage efficace du SAU, il semble obligatoire de considérer ce système sous une forme dynamique permettant ainsi de modéliser les décisions prises par les médecins, internes, externes ou autres infirmières, ainsi que leurs interactions.

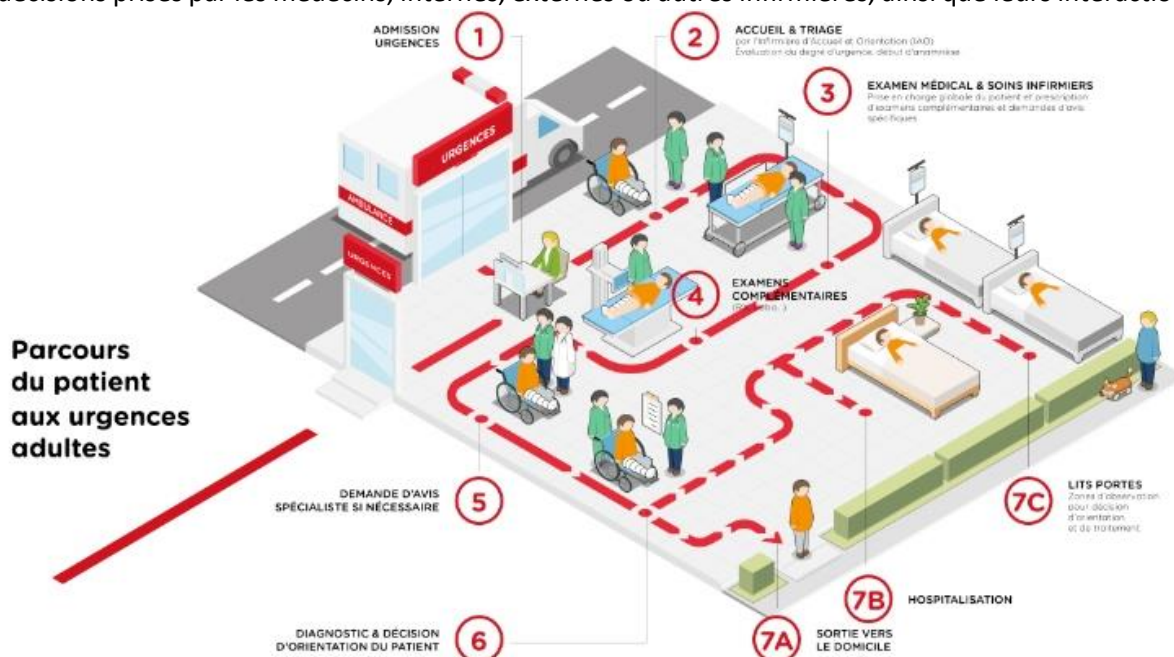


Figure 1 : Parcours patient au SAU. (Tous droits réservés à chl.lu)

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>		<b>PRC</b>
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois	Aide : 450 k€
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications			

A titre d'exemple, le fonctionnement actuel du SAU de Saint-Étienne repose sur la prise de décision décentralisée basée généralement sur une gestion des priorités. Chaque soignant sélectionne son prochain patient d'après le tableau de bord du SAU (Figure 2). En première approximation (donc, sans distinguer ni internes, externes et médecins seniors, ni SAU adulte ou pédiatrique), ce choix repose sur le niveau de gravité du patient :

- **Niveaux de gravité 1 et 2** : Ces patients sont les plus urgents et traités à l'UG (Urgences Graves), donc l'Infirmier d'Accueil et d'Orientation doit leur trouver un médecin au plus vite. Pour cela, cet infirmier cherche un médecin dans leur bureau ou, s'ils sont déjà tous en consultation, dans les box ; dans ce second cas, la consultation en cours sera mise en pause pour que le médecin traite ce cas plus urgent.
- **Niveaux de gravité 3 à 5** : Ces patients vont attendre en salle d'attente jusqu'à ce qu'un soignant les prenne en charge en l'UF (Urgences Fonctionnelles) en faisant un compromis (propre à chaque soignant) entre niveau de gravité et ordre d'arrivée. Plus précisément, les différentes catégories de soignants consultent toutes le même tableau de bord dans lequel elles sélectionnent leur prochain patient en fonction des soins nécessaires, condition du patient, etc.

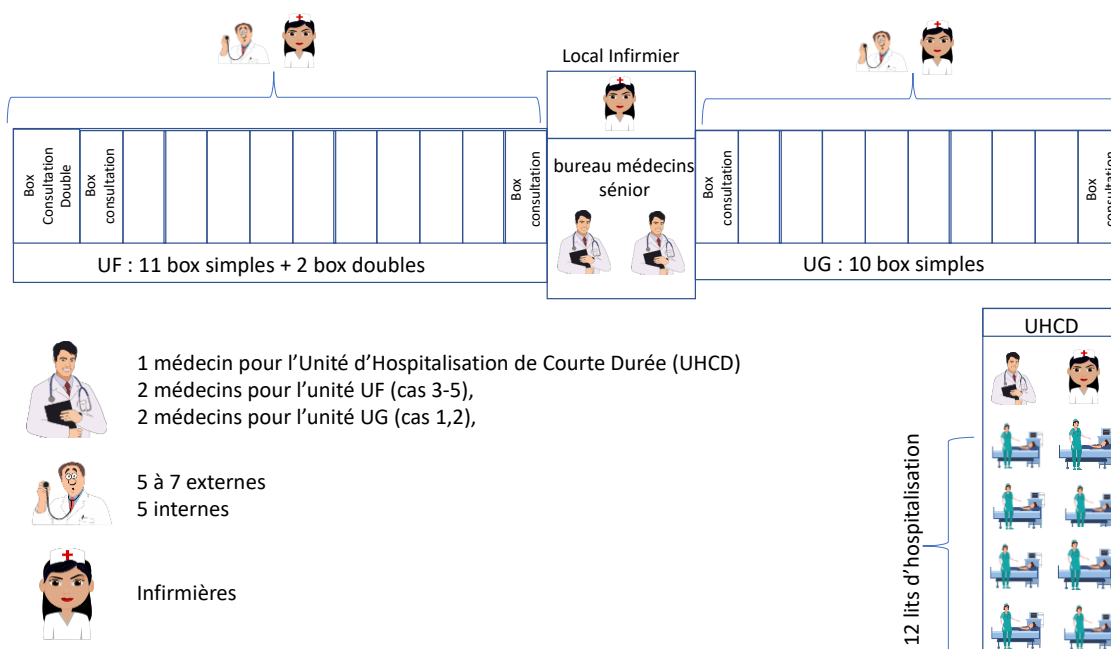


Figure 2 : Schéma global du SAU du CHU de Saint-Etienne. Le bureau des médecins est central et communique avec l'UG (niveaux de gravité 1 et 2) et l'UF (gravité de 3 à 5) ainsi qu'avec le local infirmier

L'optimisation du parcours patient est un sujet qui suscite un intérêt grandissant, traité au moyen d'approches orientées-données [Curtis 2018] ou en intégrant des systèmes multi-agents à des workflows [Ajmi 2019]. La simulation à événements discrets est particulièrement bien adaptée pour capter la complexité et la dynamique des processus des urgences et aider à la prise de décision. Cependant, il est regrettable que la plupart des modèles publiés ne soient au final pas implémentés et utilisés dans les services des urgences [Boyle 2021]. Ce manque d'intégration aux systèmes opérationnels montre les limites de ces modèles, qui ont une bonne représentation des flux et capacité de calcul, mais qui ne sont pas connectés au système physique dans une optique de pilotage.

Dans ce contexte, les acteurs du SAU (médecins, infirmières, patients et manipulateurs) sont en permanence amenés à interagir entre eux et à apprendre des expériences passées, influençant ainsi la prise de décisions et l'environnement. De fait, la gestion du parcours patient dans le SAU est complexe car, par exemple, la séquence des soins n'est pas connue à l'arrivée du patient, mais est définie au fur et à mesure que celui-ci reçoit des soins et passe des examens. D'autre part, comme décrit ci-dessus, la prise de décision est fortement décentralisée car chaque soignant sélectionne son prochain patient

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>	PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications		Aide : 450 k€

d'après le tableau de bord du SAU. **Pour notre projet, il est donc nécessaire de bien définir dans un premier temps l'aide à la décision qui peut être apportée à chaque agent/soignant.**

Ces problématiques de gestion de flux et de priorités ont été largement étudiées dans le domaine industriel. Une première piste serait de s'inspirer des modèles de pilotages développés dans ce domaine pour proposer un cadre d'aide à la décision pour les SAU. Les systèmes de production de biens et de services sont majoritairement contrôlés par un système de pilotage centralisé, c.-à-d. par une Autorité Centrale (AC) qui (i) reçoit des informations des agents/opérateurs, (ii) choisit quoi faire pour atteindre les objectifs du système de production et (iii) communique cette décision aux opérateurs. Ce type de pilotage est très efficace en l'absence de perturbations mais réagit mal aux imprévus. Par opposition, il existe aussi des systèmes de pilotage où la décision est distribuée, qui sont plus réactifs mais moins optimaux. Quel que soit le type de pilotage mis en œuvre, il faut assurer que le système de pilotage ait une vision précise de l'état du SAU.

Dans la dynamique actuelle « Industrie du Futur », **l'approche à base de Jumeaux Numériques (JN)** est connue pour répondre à un besoin de pilotage au plus proche du système et aussi pour mieux anticiper le comportement grâce à l'intégration de la simulation et de l'intelligence artificielle. Pouvant se voir comme une extension de la maquette numérique d'un produit à la phase d'usage, la notion de JN se développe aujourd'hui dans la littérature pour les systèmes de production avec plusieurs cas d'études détaillés dans [Negri 2017, Tao 2019, Semeraro 2021]. Malgré tout, [Melesse 2020] présentent des challenges encore ouverts pour la conception et le déploiement de JN sur des systèmes de production, dont : les difficultés sur la construction, la compréhension et le pilotage de systèmes avec des modèles multi-échelles précis et fiables, le manque de connaissances et de méthodologie sur ces modèles, la difficulté de prédiction du comportement de systèmes complexes, la difficulté d'accès aux données pertinentes, le manque de synchronisation entre les mondes physique et numérique et la difficulté pour maintenir les modèles et vérifier et tester leur validité.

Plus spécifiquement, l'application d'un JN à un contexte de système de soins suscite actuellement un grand intérêt. En 2019, [Patrone 2019] propose une revue de la littérature des JN et/ou simulations impliquées dans les systèmes d'aide à la décision, et appliqués aux systèmes de soins. Seuls trois articles traitent explicitement du JN [Karakra 2019, Bruynseels 2018, Patrone 2018]. Depuis cette revue, le sujet a gagné en intérêt [Croatti 2020, Erol 2020] (cf. un JN pour la production de soins de GE<sup>1</sup>) ; d'où la nouveauté de notre travail. Les bénéfices d'utiliser des JNs sont néanmoins clairement affirmés et démontrés dans ces travaux, tels que la réduction de la durée d'attente des patients ou de leur durée de séjour, la planification plus efficace et précise des ressources et ainsi de suite. Cependant, les défis cités par [Melesse 2020] restent ouverts dans ce contexte, avec des spécificités liées à la nature des SAU.

## 1.2 Caractère ambitieux et novateur du projet

Le projet JUNEAU vise ainsi à **proposer un JN pour le SAU** permettant à la fois de remonter les données nécessaires pour visualiser le comportement du service en **temps quasi-réel** mais aussi de prévoir et d'anticiper son comportement, en ajoutant un **moteur de simulation couplé à de l'optimisation** permettant de répondre aux aléas inhérents à ce type de services, ceci afin « d'asservir » et de contrôler l'indicateur « temps de passage aux urgences des patients » (Figure 3). Cet indicateur a été particulièrement observé par de nombreux travaux de recherche sur la modélisation et la simulation de services des urgences [Salmon 2018].

Un JN se base sur une connaissance forte des processus afin de reproduire le plus fidèlement possible le comportement du système physique, qui peut être fournie par le formalisme BPMN [Semeraro 2021]. Un JN repose également sur un échange de données réelles qui suppose (1) l'existence même de ces données dans le Système d'Information, (2) leur cohérence et (3) leur

<sup>1</sup> <https://www.gehccommandcenter.com/digital-twin>

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>	PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications		Aide : 450 k€

exploitabilité. En plus des vues **Processus, Ressources et Organisation** préconisées par [Augusto 2014], nous allons chercher ici à enrichir la modélisation par une vue **données**.

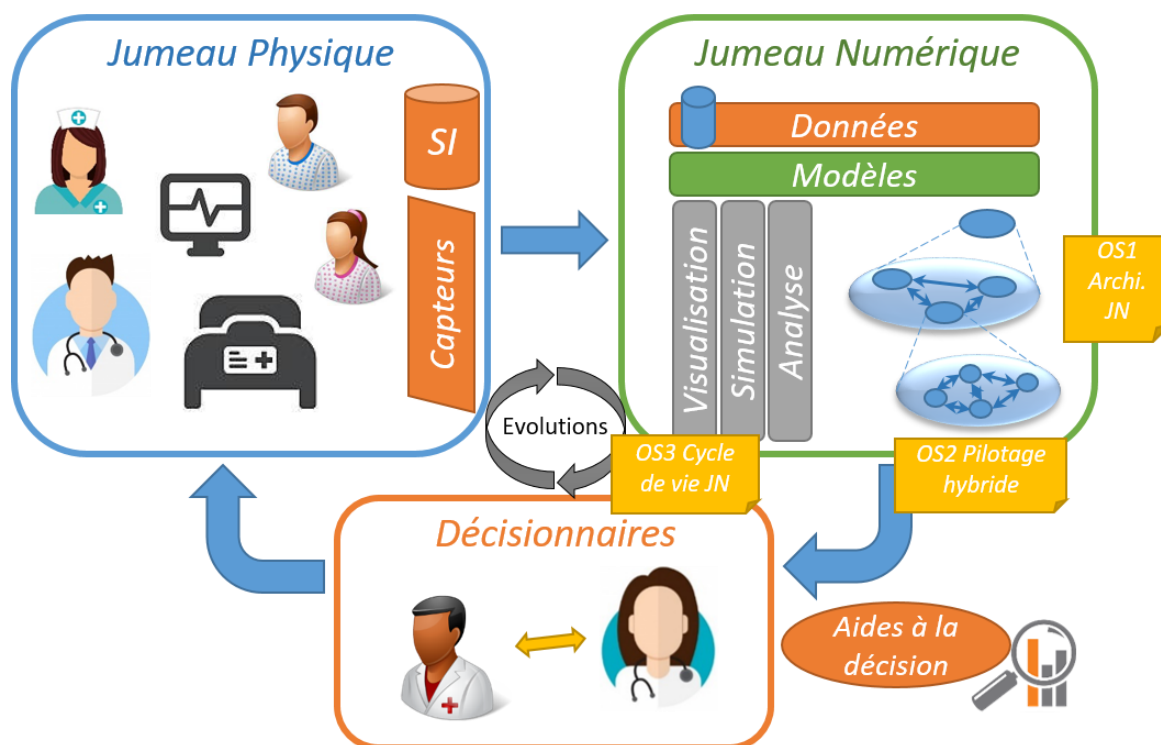


Figure 3 : Vision du projet JUNEAU

De par la nature du SAU, le JN doit se positionner en tant qu'outil d'aide à la décision et c'est aux différents acteurs décisionnaires du SAU de profiter de cet environnement. Ainsi nous ambitionnons d'**intégrer l'Humain dans la boucle**. Cette ambition se décline ici dans la volonté de proposer un pilotage hybride, qui couplera pilotages centralisé et distribué.

Dans le même temps, le JN doit être **aussi non-invasif que possible**. Cela peut être le cas pour de nombreux autres types de systèmes de production. A cet effet, nous supposons qu'un système de production de soins nécessite des outils qui suggèrent des actions — plutôt qu'ils ne donnent des ordres — et qui mettent à jour ces suggestions à chaque fois que le JN détecte que ses suggestions ne sont pas appliquées dans le jumeau physique. En effet, les soignants prennent déjà des décisions et peuvent donc parfois ne pas être d'accord avec les suggestions du JN.

Nous ne souhaitons pas dans ce projet nous limiter à la phase de conception du JN mais bien intégrer une **vision complète du cycle de vie d'un tel système**. Un enjeu fort pour un système tel que le SAU est de pouvoir faire confiance au JN dans un contexte fortement dynamique, incertain et évolutif. Une des ambitions du projet est donc de proposer un environnement de contrôle des écarts de jumelage et de pilotage associé à des évolutions tant organisationnelles que techniques.

Enfin, **une expérimentation partielle du JN** est prévue au sein de ce projet. En effet, si la plupart des composants du système proposé ont déjà pu être utilisés avec succès dans des contextes différents, la spécificité du milieu hospitalier nous permet de dire que le TRL (*Technology Readiness Level*) initial du projet vaut 2 et nous visons à la fin du projet un TRL de 4.

### 1.3 Objectifs scientifiques et positionnement par rapport à l'état de l'art

De manière plus détaillée, nous identifions **trois objectifs scientifiques** sur ce projet.

#### OS1 - Architecture de JN

Si la littérature scientifique récente propose plusieurs architectures de JN [Alam 2017, Redelinghuys 2019], il est clairement établi un manque de méthodologie support au développement d'un tel



<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>	PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications		Aide : 450 k€

système [Pystina 2021] et encore plus dans le contexte d'un système de santé. Notre premier objectif scientifique est donc de proposer **une architecture pour le JN qui soit adaptée à la pratique hospitalière dans le SAU**.

Il est primordial de revenir dans un premier temps à la définition d'un JN. Nous nous basons ici sur les travaux de [Kritzinger 2018] qui définissent respectivement (a) un Digital Model, (b) un Digital Shadow et (c) un Digital Twin (DT) ou Jumeau Numérique (JN), selon la manière dont le système numérique est connecté au système physique (Figure 4a à Figure 4c). Cette typologie nous semble trop restrictive car le JN est ici obtenu par l'automatisation dans les deux directions des flux de données entre les deux systèmes. Or, dans notre contexte, nous avons établi l'importance d'avoir un « Humain dans la boucle » en tant que décideur pour les décisions opérationnelles et tactiques — soit, sur une durée allant de la minute à quelques semaines. Nous élargissons donc la typologie avec la Figure 4d [Liu 2022].

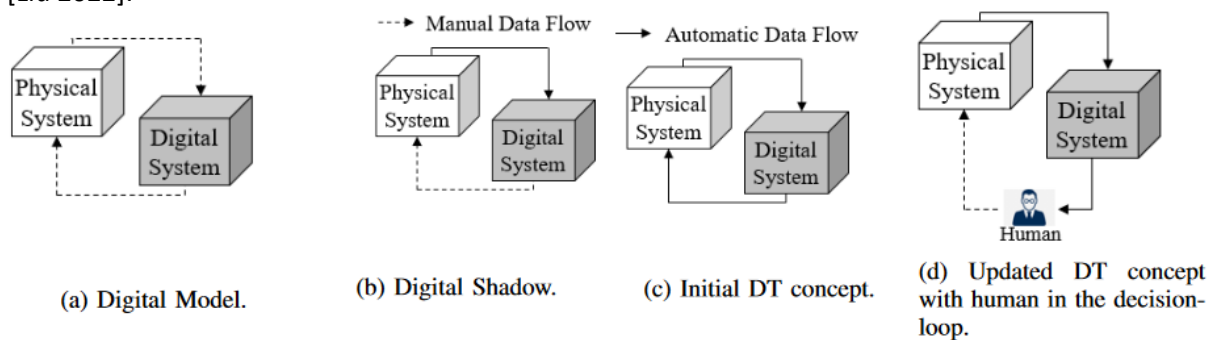


Figure 4 : Typologie adaptée de [Kritzinger 2018].

Pour toutes ces raisons, nous proposons l'architecture de système numérique de la Figure 5. Ce qui suit présente ce travail préparatoire [Liu 2022] que nous avons mené en émulant le système physique ou, autrement dit, nous avons représenté à la fois les systèmes physique et numérique dans un même environnement de simulation (AnyLogic<sup>2</sup> ici) en vue de proposer cette architecture sans perturber le système physique réel puisque ce dernier est émulé. L'architecture que nous proposons repose sur la distinction entre deux types d'événements déclenchant les transitions du système numérique :

- les événements externes remontent du système physique pour provoquer une resynchronisation du système numérique sur le physique ;
- les événements internes permettent le fonctionnement du système numérique en amenant celui-ci à simuler le futur possible du système physique.

Activer les transitions déclenchées par l'un ou l'autre ou les deux de ces types d'événements fait fonctionner notre système numérique dans l'un des trois modes décrits dans la Figure 5 :

- **Digital Shadow** (Figure 5a) : Dans ce mode, seules les transitions déclenchées par les événements externes sont activées dans le système numérique. De ce fait, celui-ci ne fait qu'afficher au décideur humain l'état actuel du système physique ou, autrement dit, ce mode le fait fonctionner comme un tableau de bord.
- **Synchronised DT** (Figure 5b) : Les transitions déclenchées par les deux types de transition sont activées dans ce mode du système numérique. Par conséquent, les événements internes lui font simuler en accéléré un futur possible du système physique, jusqu'à ce qu'un événement externe resynchronise le système numérique sur l'état présent du système physique, puis les événements internes recommencent à simuler le futur en accéléré en repartant du nouvel état présent du système physique jusqu'à l'arrivée du prochain événement externe et ainsi de suite. En résumé, un grand nombre d'événements

<sup>2</sup> <https://www.anylogic.fr/>

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>		<b>PRC</b>
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois	Aide : 450 k€
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications			

internes simulent le futur entre deux événements externes et ces événements externes resynchronisent le système numérique sur le physique.

- **Exploratory DT** (Figure 5c) : Ce mode n'active que les transitions déclenchées par les événements internes. Il nécessite donc d'initialiser le système numérique sur l'état actuel du physique, puis les transitions internes font simuler en accéléré le futur du système physique sans resynchronisation à chaque événement externe remontant du physique vers le numérique. Cela permet au décideur d'explorer la variabilité des futurs possibles sans être gêné par les resynchronisations régulières du mode Synchronised DT.

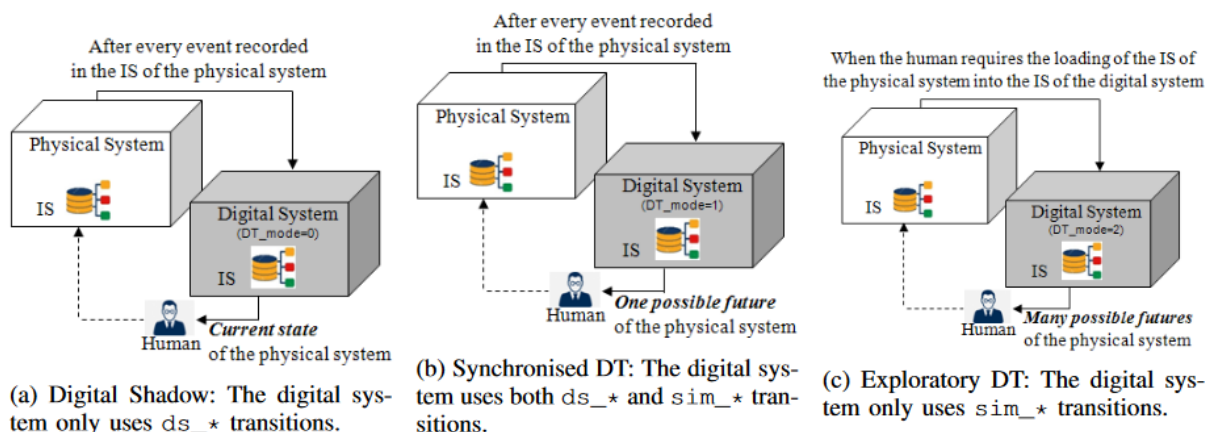


Figure 5 : Les trois modes de fonctionnement du système numérique de la Figure 4d.

Chacun de ces modes de fonctionnement nécessite le support d'une architecture détaillée, capable (1) de représenter le comportement de l'ensemble des éléments du système, (2) de supporter l'interaction avec les différents systèmes d'informations et éléments physiques de l'hôpital et (3) d'interagir avec les décideurs humains, de manière assez générique pour supporter une mise à l'échelle. Pour ce faire, le projet JUNEAU se dirige vers **l'utilisation du paradigme holonique** proposé initialement par [Koestler 1967]. Ce terme est une combinaison du mot grec *holos*, qui signifie « tout », avec le suffixe *-on* qui signifie « partie ». Un holon est une entité composée d'une partie physique et d'une partie numérique, qui décrit la partie physique (données statiques, comportements, etc.). Les holons forment un ensemble autocatalytique [Valckenaers 2020], décrit par l'effet Janus [Koestler 1979] statuant que les holons peuvent être regroupés pour former d'autres holons, conduisant à des structures hiérarchiques appelées holarchies (Figure 6), capables de représenter des niveaux d'un système ou d'une organisation. Il est alors possible d'incorporer dans ces structures des modes de pilotage centralisés, décentralisés ou hybrides

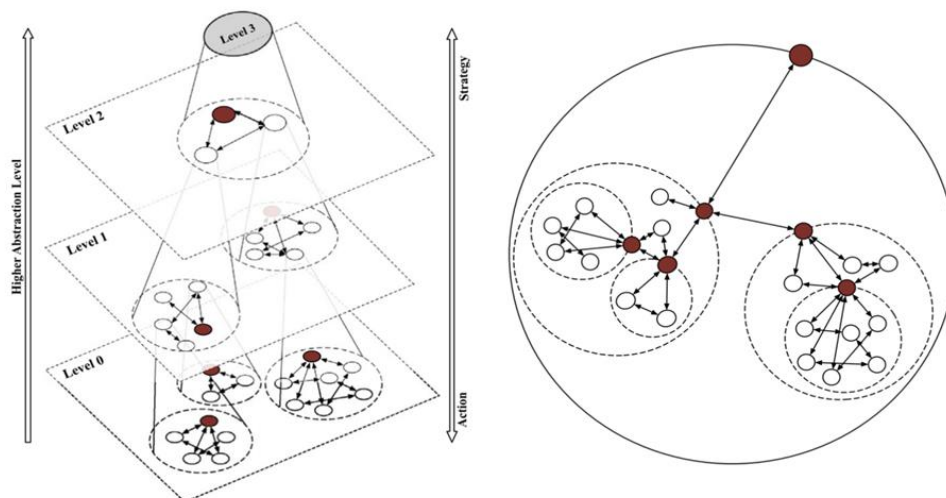
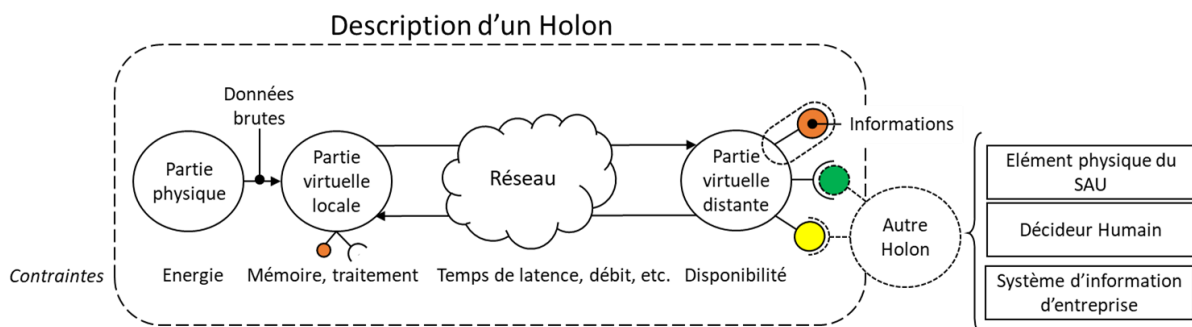


Figure 6 : Exemple d'holarchies multi-niveaux [Esmaili 2017].

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>		PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois	Aide : 450 k€
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications			

Un système holonique peut donc être considéré comme un « miroir informationnel et décisionnel » d'un système physique. Les architectures holoniques proposées dans la littérature sont nombreuses, spécialement en génie industriel, comme le montre [Derigent 2020] (PROSA, ADACOR, ADACORv2, POLLUX, etc.), dans des contextes de prises de décision en gestion de production de biens ou de services, en maintenance, etc. Ces architectures sont modulaires, peuvent évoluer dynamiquement et prendre en compte des entités de natures différentes. En ce sens, les approches holoniques sont bien adaptées pour la représentation des systèmes de production, voire hospitaliers comme le montre [Huet 2011] sur l'adaptation des systèmes holoniques au circuit du médicament d'un hôpital. En pratique, la mise en œuvre d'un système holonique nécessite de « digitaliser » le système cible en l'augmentant à l'aide une partie virtuelle locale (RFID, nœud de capteurs, etc.) couplée via le réseau à une partie virtuelle distante, le plus souvent un agent logiciel, capable de stocker de l'information, de prendre de décisions ou de communiquer avec d'autres holons (Figure 7).



En l'état actuel du projet, nous imaginons **adapter une architecture holonique classique pour digitaliser le SAU**. Par rapport à la littérature, cette architecture proposera des innovations en ce sens qu'elle (1) intégrera l'Humain en tant que décideur et acteur et (2) devra permettre la simulation du système étudié (par le biais d'un holon spécifique par exemple, tel que dans l'approche PROSIS [Pujo 2015]) pour la réalisation de scénarii *what-if*, utilisée dans les modes (b) et (c) de notre JN. Ce cadre est aussi parfaitement adapté aux problématiques des deux autres objectifs scientifiques OS2 (étude de la décision prise par la partie « agent » d'un holon) et OS3 (évolution dynamique de l'organisation et de la simulation).

## OS2 - Pilotage hybride et non-intrusif

L'architecture du JN est influencée par l'organisation du pilotage du système SAU. Vu les spécificités du SAU, notre second objectif scientifique est **de proposer un pilotage hybride en couplant les approches centralisées** (donnant généralement lieu à des problèmes NP-difficiles) **et décentralisées** (issues des approches multi-agents ou holoniques, ou d'une variante de la théorie des jeux, par exemple) pour aborder la problématique du parcours patient. Ceci nous permettra de nous approcher du cumul du meilleur des deux : **l'efficacité du centralisé en l'absence de perturbations** et la **réactivité et la résilience du décentralisé pour réagir** après chaque perturbation [Cardin, 2017]. Notre hypothèse est que l'application de ce couplage à la gestion du parcours patient d'un SAU permettra de piloter efficacement ce flux tout en faisant face aux imprévus.

L'OS2 vise à étudier le couplage d'une organisation centralisée avec une décentralisée pour **créer une organisation hybride capable de basculer entre son mode centralisé et son mode décentralisé**. Basculer de la décision centralisée vers la décentralisée est facile car les agents partent des dernières décisions reçues de l'AC (Autorité Centrale) comme point de départ de leurs interactions pour décider entre eux qui fait quoi. La bascule dans l'autre sens est plus compliquée car passer de décisions décentralisées vers des décisions centralisées nécessite que l'AC prenne en compte ce que les agents sont en train de faire. Par exemple, si les agents se sont mis d'accord de façon décentralisée de faire les tâches 1 à  $n$  pendant les dix prochaines minutes, cela signifie (i) que l'AC dispose de dix minutes pour proposer un nouveau plan aux agents, (ii) que ce plan doit tenir compte du fait que les tâches 1



<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>		PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois	Aide : 450 k€
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications			

à  $n$  auront été réalisées ou seront en cours de réalisation lors de la bascule vers la décision centralisée et (iii) que les agents ne feront pas tous cette bascule en même temps, mais après que chacun aura achevé sa tâche (parmi les tâches 1 à  $n$ ). Autrement dit, le caractère dynamique du système à contrôler est l'une des principales difficultés à gérer dans l'hybridation. Cela est dû au fait que la dynamique du système physique désynchronise le modèle utilisé par l'AC de l'état présent des agents-soignants. En effet, l'aide à la décision apportée par l'AC à un instant donné se base sur un état antérieur du SAU. Durant le laps de temps entre l'évaluation de l'état du SAU et l'aide à la décision proposée par l'AC, la prise de décision effectuée par les agents-soignants (décentralisée) biaise la perception que l'AC a de l'état du SAU et, par conséquent, peut rendre inapplicable les propositions de l'AC.

Ensuite, le retour d'information des systèmes locaux (agents-soignants dans le contexte du SAU) est un autre levier permettant l'hybridation. Ce retour amène les questions de la quantité ou volume d'informations à remonter, de leur retard, voire de l'absence de retour d'informations et des conséquences sur l'aide à la décision proposée par l'AC.

Enfin, la dimension humaine doit nécessairement être considérée dans un système où l'humain est au centre de la décision. Par exemple, l'acceptabilité du système par l'humain (non prise en compte et/ou non remise en question des décisions proposées, non remontée des informations, etc.), la compréhension de l'humain des décisions proposées par l'humain ou encore la prise en compte de l'autonomie des agents-soignants restent des verrous scientifiques difficiles à résoudre, et pas uniquement au sein des SAU mais aussi dans d'autres types de systèmes de production.

[Moyaux 2012] a montré que peu d'études comparent de façon quantifiée l'efficacité d'une organisation plus ou moins (dé-)centralisée de la prise de décision dans un même système. Exceptés nos travaux [Moyaux 2020, Moyaux 2022], très peu comparent l'efficacité de plus que deux organisations plus ou moins (dé-)centralisées de la décision dans un même système. [Davidsson 2007] fournissent l'une des rares exceptions en comparant quatre organisations de la décision (une centralisée pure, une décentralisée pure et deux partiellement (dé-)centralisées) pour un même système de production. Le plus souvent, seuls deux niveaux de (dé-)centralisation sont comparés, à savoir l'approche décentralisée proposée et qui est comparée à l'organisation optimale/centralisée [Kivelevitch 2013, Sallez 2010].

Concernant l'hybridation de ces deux types d'organisation, autrement dit de la bascule d'une organisation (dé-)centralisée vers l'autre type d'organisation, plusieurs architectures de pilotage hybrides ont déjà été proposées par la communauté des systèmes de production dits intelligents [Derigent 2020] mais, à notre connaissance, l'hybridation entre approches centralisée et décentralisée n'a pas encore été explorée dans le contexte d'un SAU, même si des approches développées dans le contexte industriel peuvent être adaptées au contexte du projet JUNEAU.

### OS3 - Cycle de vie des JN

Un système complexe tel qu'un JN évolue au cours de sa vie, autant par la dynamique propre du jumeau physique que par l'évolution des hypothèses de modélisation du JN. La question de **la maîtrise d'un tel système** est forte, surtout si nous tenons compte du système applicatif concerné.

Ainsi, au travers de l'étude des interactions entre tous les agents du système et la compréhension du système dynamique associé, il est possible d'obtenir une modélisation et un contrôle organisationnel. La morphologie organisationnelle doit être comprise comme la **représentation de l'état global du système multi-agents sous la forme d'une représentation dans un espace géométrique** [Cardon 2004]. L'évolution de cette représentation permet de quantifier par les interactions locales entre les agents un comportement global dit organisationnel. Une application de cette approche à une situation de crise a été proposée par [Lachtar, 2013]. Cette idée permet d'aborder la modélisation sous une forme peu commune et liée à la physique. En effet, un certains nombres d'approches physiques — notamment celles liées au groupe de renormalisation — permettent d'inférer le comportement organisationnel. D'un point de vue moins système dynamique mais plus algébrique, beaucoup de travaux se sont focalisés sur une caractérisation via le plus souvent une étude spectrale de la matrice Laplacienne du graphe représentant les interactions entre les agents.

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>	PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications		Aide : 450 k€

Nous souhaitons ici donner des invariants géométriques et/ou topologiques tels qu'ils ont été introduits par exemple par [Munch 2013, Markdhal 2018] pour **caractériser le système coopératif entre les agents dans leur prise de décision**.

D'autre part, pour tirer profit de cette massification des données et assurer l'évolution du JN au cours du temps, il est crucial de mettre à jour les modèles de simulation. Dans ce contexte, le paradigme DDDS (Dynamic Data Driven Simulation) [Darema 2004] nous intéresse. Le principe est que la simulation est continuellement comparée aux données du système réel afin d'assurer sa justesse vis-à-vis du système réel et d'obtenir une meilleure qualité de prédiction et d'analyse. Les approches DDDS s'intéressent à deux problématiques liées à ce principe : (1) quand réaliser la mise à jour et (2) comment la réaliser ? La mise à jour du modèle de simulation nécessite d'évaluer la différence entre les systèmes réel et simulé à un instant  $t$  dans le temps. Cette évaluation peut par exemple se faire via une fonction d'adaptation [Frazzon 2018] ou une carte de contrôle [Noyel 2016]. Lorsque cette différence devient significative, la mise à jour du modèle peut se faire selon plusieurs modes. Il peut s'agir (1) de la reconstruction d'un nouveau modèle de simulation si celui-ci a été obtenu par des approches « boîte noire » de type réseaux de neurones ou (2) du changement des paramètres du modèle initial si celui-ci est constitué de primitives connues [Goodall 2019], via l'assimilation de données remontées du terrain. Néanmoins, ce second type d'approches est moins en mesure de faire évoluer automatiquement la topologie du modèle. Nous souhaitons donc proposer **une approche méthodologique assurant la justesse dans le temps des modèles de simulation** proposés par le projet JUNEAU, selon une procédure couplant adaptation du modèle de simulation par des méthodes « boîte blanche » tant que cela reste possible, puis par des méthodes « boîte noire » afin de proposer à l'utilisateur de nouvelles topologies lorsque l'initiale n'est plus représentative du système réel.

## 1.4 Méthodologie et gestion des risques

### Méthodologie

Le consortium est relativement petit et le pilotage d'un tel projet peut sembler facile dans un premier temps. Cependant, les trois objectifs scientifiques sont fortement liés entre eux et nous avons l'ambition de **développer une preuve de concept du JN**. C'est pourquoi nous adoptons une approche agile sur ce projet, avec des liens forts entre les différents WP qui seront définis ci-dessous. De fait, le projet est décomposé de manière macroscopique (Figure 8) en :

1. Une **phase d'analyse et de modélisation** du système physique (WP1), avec élaboration de scénarios d'usage du JN. Cette phase sera fortement basée sur le CHU de Saint-Étienne, avec la possibilité de s'ouvrir à d'autres centres de la région Auvergne-Rhône-Alpes ;
2. Une **phase exploratoire scientifique**, avec les WP2 à 4 correspondant chacun aux trois objectifs scientifiques cités précédemment. Cette phase est le cœur des contributions scientifiques du projet ;
3. Une **phase de prototypage et de démonstration** (WP5), avec la volonté de développer un POC (Proof-Of-Concept) permettant d'une part de valider la faisabilité des solutions proposées dans la phase exploratoire et d'autre part d'avoir un retour du terrain et des potentiels utilisateurs sur l'approche JN.

De nombreuses interactions sont prévues entre les différents WPs, permettant des échanges et un partage de connaissances et de pratiques rapide entre les différents membres du consortium. Enfin, des séjours sur les différents sites sont programmés.

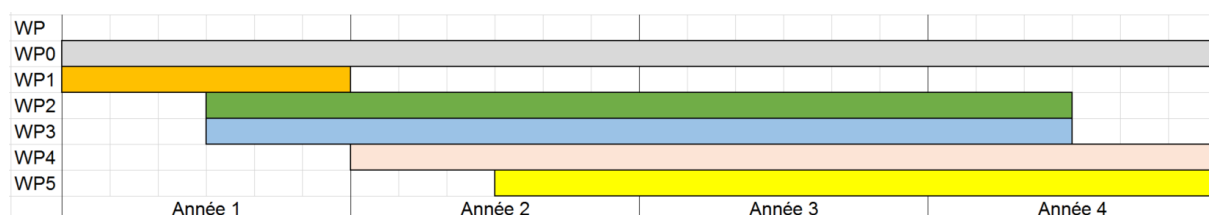


Figure 8 : GANTT macroscopique du projet

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>		PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois	Aide : 450 k€
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications			

### Structuration détaillée du projet

Le tableau ci-dessous (figure 9) détaille la répartition des efforts en homme.mois (h.m) par WP entre les trois partenaires du projet.

WP	Nom	Début	Fin	Durée	Leader	DISP		CRAN		CHU		TOTAL
						Perm	Non-P	Perm	Non-P	Perm	Non-P	
WP0	Gestion de projet	0	48	48	DISP	7		2		1		10
WP1	Modélisation du SAU	0	12	12	DISP	4		3		2	12	21
WP2	Architecture de JN	6	42	36	CRAN	6	3	8	23			40
WP3	Pilotage hybride	6	42	36	DISP	9	30	5	3			47
WP4	Cycle de vie du JN	12	48	36	CRAN	5	12	5	16			38
WP5	Démonstrateur	18	48	30	CHU	5	15	3	6	2		31
<b>TOTAL</b>						<b>36</b>	<b>60</b>	<b>26</b>	<b>48</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>187</b>

Figure 9 : Répartition des efforts en h.m par WP

WPO	Gestion de projet		
Début :	M0	Fin :	M48
Partenaire	<b>DISP (V. Cheutet)</b>	CRAN	CHU
Effort (h.m)	7	2	1
<b>Description &amp; Objectifs</b>			
Le WPO déterminera et maintiendra la structure de gouvernance du projet, supervisera les décisions de gestion, s'assurera de la bonne exécution du budget, coordonnera les activités de gestion des données et connaissances et livrables, et enfin s'assurera que les résultats seront diffusés dans la ou les communautés concernées.			
<b>Description des travaux</b>			
Tâche 0.1 : Management du projet et assurance qualité			
Cette tâche concerne les aspects managériaux et administratifs tels que la gestion juridique, contractuelle, éthique, financière et administrative globale du consortium, la définition et application du plan d'assurance qualité, le contrôle et affinement des objectifs stratégiques du projet et la gestion des risques. <i>Livrables : Assurance Qualité et Accord de consortium.</i>			
Tâche 0.2 : Animation et suivi des lots			
Cette tâche s'assure que les travaux des lots restent en ligne avec les attendus du projet (et justifient les éventuelles déviations) et que les livrables et rapports d'avancement respectent les échéances et les attentes. <i>Livrables : 8 rapports d'avancement, un par réunion de pilotage, un par plénière.</i>			
Tâche 0.3 : Dissémination et valorisation			
Cette tâche réalise, suit et éventuellement suscite : la production scientifique et technique, les actions de communication, la présence sur des salons, l'animation d'un site web et les possibilités d'exploitation ultérieure des résultats. <i>Livrables : Site web de communication, Publications scientifiques et participation à des événements scientifiques.</i>			
<b>Gestion des risques</b>			
Les partenaires ont déjà coordonné et/ou participé à des projets académiques et/ou industriels (FUI, ANR, CPER, CIFRE...). Le DISP et le CHU collaborent déjà depuis de nombreuses années. Même s'ils n'ont pas encore travaillé ensemble sur un projet de type ANR PRC, le DISP et le CRAN se connaissent à travers le GDR MACS et le GIS S.mart, et ont la volonté de développer leur collaboration scientifique et technique. La crise sanitaire que nous vivons depuis mars 2020 a conduit l'enseignement supérieur à s'adapter au télétravail. Par conséquent, l'ensemble des partenaires ont l'expérience des outils de visioconférence et de travail collaboratif.			

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>		PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois	Aide : 450 k€
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications			
<b>WP1</b>	<b>Modélisation du SAU</b>		
Début :	M0	Fin :	M12
Partenaire	DISP	CRAN	<b>CHU (O. Mory)</b>
Effort (h.m)	4	3	14
<b>Description &amp; Objectifs</b>			
Le WP1 vise à observer, analyser et modéliser le SAU de manière détaillée pour bien définir le cadre précis d'étude du JN qui sera défini ensuite. Ce WP abordera aussi bien la dimension parcours (i.e. processus) que celle informationnelle nécessaire au développement du JN.			
<b>Description des travaux</b>			
Tâche 1.1 : Modélisation du parcours patient			
A partir de visites de terrain et d'interviews des acteurs (personnel administratif, soignant et médical) aussi bien du SAU du CHU St Étienne que d'autres centres, et d'une revue de la littérature sur les cas de modélisation et simulation des services d'urgences [Salmon 2018], une formalisation du parcours du patient sera réalisée. Cette modélisation doit rendre compte des processus mis en œuvre, des ressources mobilisées et des données manipulées. Pour cela, un langage standardisé et structuré tel que BPMN sera utilisé. Ce formalisme présente l'avantage d'être explicite et offre une compréhension facile pour le personnel de l'hôpital qui pourra alors valider le modèle qui servira de base au JN.			
<i>Livrables : Modélisation du SAU orientée flux et données.</i>			
Tâche 1.2 : Analyse du SI hospitalier			
Cette tâche vise à construire un modèle ontologique des données que le jumeau physique et le JN s'échangeront. Ce modèle sera basé sur les données gérées actuellement par le Système d'Information hospitalier et il sera complété par d'éventuelles données manquantes, issues de la littérature ou des interviews d'autres centres. Il pourra aussi ouvrir la piste à une captation complémentaire de données qui se devra d'être la moins intrusive possible dans le travail opérationnel du SAU.			
<i>Livrables : Modèle ontologique des données et informations du SAU nécessaire au JN.</i>			
<b>Gestion des risques</b>			
La crise sanitaire actuelle peut potentiellement augmenter la tension du SAU en cas de pic épidémique. Les précédentes collaborations entre le CHU et le DISP permettent de s'appuyer sur les connaissances déjà acquises par l'équipe du contexte spécifique.			

<b>WP2</b>	<b>Architecture de JN</b>		
Début :	M6	Fin :	M42
Partenaire	DISP	<b>CRAN (H. Bril)</b>	
Effort (h.m)	9	31	
<b>Description &amp; Objectifs</b>			
Le WP2 s'intéresse à l'architecture holonique du JN. Son objectif sera d'adapter une architecture holonique classique pour digitaliser le SAU, et l'enrichir par un accès à un (des) modèle(s) de simulation du système étudié (par le biais d'un holon spécifique), afin de produire un modèle d'architecture intégrant l'Humain et des capacités de prévisions.			
<b>Description des travaux</b>			
Tâche 2.1 : Etat de l'art des architectures holoniques			
L'objectif de cette tâche est d'étudier l'ensemble des architectures holoniques disponibles dans la littérature, et de produire un état de l'art détaillé de celles les plus adaptées au contexte du projet JUNEAU. Si les acteurs du projet ont une très bonne connaissance des architectures proposés en génie industriel, ils devront explorer les travaux plus proches des besoins du projet JUNEAU et identifier les verrous à lever pour une meilleure adaptation au contexte de l'étude.			
<i>Livrables : Etat de l'art des architectures holoniques d'intérêt pour le projet JUNEAU</i>			

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>		PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois	Aide : 450 k€
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications			
Tâche 2.2 : Modélisation de l'architecture			
L'état de l'art produit précédemment sera utilisé en conjonction avec les résultats du WP1 pour modéliser une ou plusieurs architectures potentielles permettant de digitaliser l'ensemble des éléments du SAU. De plus, cette architecture devra aussi exploiter/être compatible avec les WP3 et WP4, afin de pouvoir intégrer leurs résultats dans l'architecture lors de son déploiement (WP5).			
<i>Livrables : Modèles d'architectures holoniques pour le SAU.</i>			
<b>Gestion des risques</b>			
Les membres du consortium disposent d'une importante expérience dans le domaine des systèmes holoniques de production (systèmes contrôlés par le produit, produit intelligent, matière communicante) et travaillent actuellement sur l'intégration des facteurs humains dans ce type d'architecture [Valette 2021]. De plus, ils possèdent une importante expérience sur les architectures de JN [Pystina 2021, Liu 2022].			
<b>WP3</b>	<b>Pilotage hybride</b>		
Début :	M6	Fin :	M42
Partenaire	<u><b>DISP (T. Moyaux)</b></u>	CRAN	
Effort (h.m)	39	8	
<b>Description &amp; Objectifs</b>			
Le WP3 vise à proposer un modèle de décision hybride centralisé/décentralisé. Nous ajouterons au JN une couche d'aide à la décision centralisée, puis une couche décentralisée, avant de les coupler. Le principal verrou scientifique est dans ce couplage puisqu'il faut gérer la transition entre décentralisé et centralisée.			
<b>Description des travaux</b>			
Tâche 3.1 : Proposer un modèle de prise de décision centralisée du SAU.			
La tâche 3.1 implémente la couche centralisée d'aide à la décision fournie par le JN. Pour cela, le JN simule les futurs possibles selon les différentes décisions que le décideur humain (autorité centrale) souhaiterait tester afin d'évaluer leurs conséquences. Par exemple, il est maintenant 14h et le JN montre ce qu'il pourrait se passer si le nombre de soignants change à 16h soit en baissant d'une personne, soit en restant le même, soit en augmentant d'une personne.			
<i>Livrables : Modèle AnyLogic de pilotage du SAU mis à jour avec les données du JN pour piloter le SAU de manière centralisée.</i>			
Tâche 3.2 : Proposer un protocole d'interaction pour prendre des décisions décentralisées.			
La tâche 3.2 implémente la couche décentralisée du JN pour quantifier l'écart que le JN peut avoir avec la réalité lorsque les soignants décident de leurs actions en interagissant entre eux plutôt qu'en suivant la décision de l'autorité centrale.			
<i>Livrables : Modèle reposant sur la bibliothèque « Agent » d'AnyLogic pour piloter le SAU.</i>			
Tâche 3.3 : Coupler les modèles de 3.1 et 3.2 et gérer la bascule entre eux.			
La tâche 3.3 couple les modèles de prise de décision des tâches 3.1 et 3.2 et, en particulier, comment se passe la transition entre ces deux modes. Nous avons vu que la transition du mode centralisé (implémenté dans la tâche 3.1) vers le décentralisé (tâche 3.2) est gérée naturellement par les interactions (décentralisées) entre les agents. Au contraire, nous avons aussi vu que la transition de retour à la décision centralisée nécessite d'être gérée car l'autorité centrale doit prendre en compte la dynamique du SAU. En effet, les agents continuent d'interagir (de manière décentralisée) pour décider qui fait quoi pendant que l'autorité centrale cherche un nouveau plan global, donc ce que chaque agent fait ou va bientôt faire doit être pris comme point de départ de ce nouveau plan.			
<i>Livrables : Modèle AnyLogic de décision hybride centralisée/décentralisée. Publications scientifiques et participation à des événements scientifiques et industriels.</i>			
<b>Gestion des risques</b>			



<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>		PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois	Aide : 450 k€
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications			

Les membres du consortium ont déjà une très forte expérience sur cette thématique [Moyaux 2020, Moyaux 2022, Derigent 2020] et pourront s'appuyer sur des applications déjà traitées (logistique et système de production) comme base de leurs propositions.

<b>WP4</b>	<b>Cycle de vie du JN</b>		
Début :	M6	Fin :	M42
Partenaire	DISP	<u>CRAN (W. Derrigent)</u>	
Effort (h.m)	17	21	
<b>Description &amp; Objectifs</b>			
Le SAU est un système dynamique, évoluant au cours de sa vie, autant par la dynamique propre du jumeau physique que par la modification des hypothèses de modélisation du jumeau. L'objectif de ce WP est de produire des méthodes et procédures permettant de détecter ces évolutions et mettre à jour le modèle de simulation. Ce WP souhaite aborder deux représentations différentes du SAU, selon une approche par objets (agents représentant le système) et par processus.			
<b>Description des travaux</b>			
Tâche 4.1 : Quelle morphologie organisationnelle et quelle représentation abstraite sont nécessaires pour le contrôle de l'organisation ?			
La tâche 4.1 se concentre sur l'étude globale et organisationnelle du SAU. En concordance avec la tâche 2.2 sur l'architecture pour déterminer l'ensemble des données ou agents nécessaire à la modélisation de l'organisation, elle permettra de représenter l'évolution des prises de décisions et de donner une idée de la bonne interaction entre les acteurs. Le socle théorique associé devrait permettre aussi d'avoir une connaissance et les limites de fonctionnement du système. Enfin, les dérivées des interactions observées permettront à la tâche 4.2 de mettre à jour le modèle de simulation. <i>Livrables : Modèle de représentation de l'organisation induit par l'architecture holonique.</i>			
Tâche 4.2 : Mettre à jour le modèle de simulation de processus pour représenter le système réel			
Cette tâche vise à intégrer les données produites par le système réel afin de mettre à jour la simulation. L'idée est d'adopter des techniques d'assimilation des données, permettant de modifier le modèle initial en en respectant la topologie. Si on considère le SAU comme un réseau de files d'attente, cette approche vise à modifier les paramètres de ce réseau sans ajouter de nouveaux serveurs ou de nouvelles files. La mise en œuvre nécessite donc une étude des mécanismes proposés dans la littérature, les plus adaptés aux modèles de simulation qui seront utilisés dans le projet JUNEAU. Outre la question du « comment », se pose aussi la question du « quand » réaliser cette mise à jour. Les approches proposées pourront s'appuyer sur des travaux tels que [Thomas 2018] et seront développées conjointement à celles de la tâche 4.1. <i>Livrables : Procédures de mises à jour du modèle de simulation.</i>			
<b>Gestion des risques</b>			
La question de l'évolution dynamique des modèles est une question difficile, mais certains membres du consortium ont une expertise solide en simulation et morphologie organisationnelle. Le sujet étant assez exploratoire, les risques de ne pas aboutir à un résultat performant nous semblent néanmoins plus importants que pour les autres WPs. La structure du projet a donc été pensée en ce sens, de manière modulaire. En cas de manque de résultats sur ce WP, cela n'empêchera pas de démontrer les autres aspects de JUNEAU dans le WP5.			

<b>WP5</b>	<b>Démonstrateur</b>		
Début :	M18	Fin :	M48
Partenaire	<u>DISP (V. Cheutet)</u>	CRAN	CHU
Effort (h.m)	20	9	2

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>	PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications		Aide : 450 k€
<b>Description &amp; Objectifs</b>		
Le WP5 propose le développement d'un prototype partiel du JN qui permettra de qualifier les résultats du projet vis-à-vis d'un environnement aussi proche que possible de celui d'utilisation.		
<b>Description des travaux</b>		
Tâche 5.1 : Définition d'un émulateur du SAU		
Compte tenu du contexte applicatif, afin de s'immiscer au strict minimum dans un premier temps dans la vie du CHU, une émulation de ce service sera construit à partir des résultats du WP1 et des données déjà captées et disponibles. <i>Livrables : Emulation du SAU.</i>		
Tâche 5.2 : Prototypage et expérimentation à base d'émulation		
Nous nous basons sur une approche agile pour le développement du prototype, avec des sprints réguliers en phase avec les premiers résultats des WP2 à WP4. Chaque résultat de sprint sera évalué dans un premier temps sur l'émulation du SAU obtenue à la tâche 5.1. <i>Livrables : Prototype du jumeau validé en environnement émulé.</i>		
Tâche 5.3 : Expérimentation et analyse d'impact en contexte hospitalier		
Des expérimentations avec des utilisateurs finaux de cet outil seront ensuite programmées, pour vérifier une ergonomie satisfaisante et adapter le jumeau aux usages. Cette phase s'appuiera sur les contacts du CHU de Saint-Etienne. Enfin, un chiffrage du JN et une analyse d'impact sera menée pour quantifier le déploiement de cette approche au sein du SAU. <i>Livrables : Synthèse des retours d'expérience, Analyse d'impact.</i>		
<b>Gestion des risques</b>		
Les membres du consortium ont une très bonne expérience dans le prototypage logiciel de solutions Système d'Information, sur la base de méthode agile type SCRUM. Pour cela, une vision modulaire du JN sera mise en place. De plus, de fortes interactions entre le prototypage et les WP2 à WP4 seront mises en œuvre. La création d'une émulation du SAU permettra une validation en environnement laboratoire des différentes briques, avant des expérimentations pour les utilisateurs finaux du JN.		

## 2 Organisation et réalisation du projet

### 2.1 Coordinateur scientifique et son consortium / son équipe

#### Coordinateur

**Vincent CHEUTET** (PU INSA Lyon) est directeur du laboratoire DISP. Auteur ou coauteur de plus de 50 articles de revues ou en conférences internationales, membre du comité de direction du GDR MACS, il a également participé à différents projets, principalement nationaux (FUI) et industriels (3 CIFRE) et porte aujourd'hui une action nationale du GDR MACS sur les JN de Systèmes de Production. Une thèse soutenue en mars 2022 est en collaboration avec le CHU de Saint-Etienne [Pealat 2020]. Ses activités de recherche portent principalement sur l'agilité des Systèmes d'Information et les outils d'aide à la décision et lui permettront de contribuer principalement aux WP2 & WP3. Actuellement, il ne pilote ni ne participe à aucun autre projet collaboratif, ce qui lui permettra de s'investir dans le projet JUNEAU malgré ses responsabilités.

#### Consortium

Le consortium est constitué de deux laboratoires de recherche (DISP & CRAN) et du CHU Saint-Etienne. Les membres impliqués du DISP et du CRAN sont fortement impliqués dans la communauté sur des thématiques proche du Jumeau Numérique (membre IFAC, porteur d'une action GDR MACS, co-responsable d'un CT de la SAGIP, etc.).

L'objectif scientifique du **laboratoire DISP** (Décision et information pour les Systèmes de Production, UR4570) est d'améliorer la performance, l'agilité et la résilience des systèmes de production de biens et de services, en les abordant simultanément dans leurs dimensions structurelles,

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>	PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications		Aide : 450 k€

décisionnelles, informationnelles et humaines. Outre Vincent CHEUTET, les membres du DISP impliqués seront :

- **Guillaume BOULEUX** (MCF HDR Univ. Jean Monnet Saint-Etienne, co-responsable de l'axe Gestion et Optimisation des Opérations et responsable scientifique du projet PHRC-15-PREPS-15-000668 PREDAFLU avec le CHU de Saint-Etienne) : Ses activités de recherche portent sur la géométrie et la topologie des informations, appliquées aux systèmes hospitaliers (WP1 & WP4).
- **Thierry MOYAUX** (MCF INSA Lyon) : Ses recherches étudient l'application conjointe des systèmes multi-agents et de la recherche opérationnelle au pilotage de systèmes de production (WP3).
- **Lorraine TRILLING** (MCF INSA Lyon) : Ses activités portent sur la modélisation, l'amélioration de l'efficacité des processus, l'aide à la décision et l'amélioration des performances, particulièrement dans les systèmes de santé (WP1 & WP3).

Le **CRAN** (Centre de Recherche en Automatique de Nancy, UMR CNRS 7039) mène des recherches en automatique, traitement du signal, génie informatique, ingénierie de la santé et biomédical. Les chercheurs impliqués dans ce projet appartiennent au département ISET (Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques) qui traite des problématiques scientifiques de modélisation, d'évaluation et de prise de décision pour le contrôle et le pilotage des systèmes éco-techniques :

- **Hind BRIL EL HAOUZI** (PU Univ. Lorraine et co-directrice du département ISET) : Ses travaux de recherche portent sur l'aide à la décision pour les systèmes de production. Elle s'intéresse, plus spécifiquement, aux approches anthropocentriques pour le pilotage et la simulation (WP2 & WP4).
- **William DERIGENT** (PU Univ. Lorraine) : Ses activités de recherche portent sur la modélisation de l'information et le processus de digitalisation des systèmes cyber-physiques (WP2 & WP4).
- **Guillaume DEMESURE** (MCF, Univ. Lorraine) : Ses activités de recherche traitent du contrôle décentralisé des agents autonomes avec des approches automatiques basées sur la théorie du consensus par exemple.

Le **CHU de Saint-Etienne** sera le terrain d'observation et d'application privilégié du projet. Dr Olivier MORY est le responsable de l'équipe des urgences pédiatriques et du pôle "Couple Mère et Enfant" du CHU et a publié divers articles dans le domaine des maladies infectieuses et de la vaccinologie et avec le DISP [Pealat 2020].

## Tableau d'implication du coordinateur et des responsables scientifiques des partenaires dans d'autres projets en cours

Nom du participant au projet	Personne. mois	Intitulé de l'appel à projets, agence de financement, montant attribué	Titre du projet	Nom du coordinateur du projet	Date début - Date fin
H. BRIL	3	H2020-DT-2018-2020	DIH4CPS	R.Gonçalves (UNINOVA)	01/20 - 12/22
H. BRIL	14	ANR générique 2020	IsoBIM	H.BRIL	01/20 - 06/24

## 2.2 Moyens mis en œuvre et demandés pour atteindre les objectifs

Pour atteindre les objectifs du projet, deux doctorants seront recrutés, l'un dédié aux WP2 & WP4 et le second au WP3. De plus, un Post-Doc sera recruté pour le WP1 (modélisation du SAU) et un ingénieur sera recruté pour le WP5 (démonstrateur), en collaboration avec les doctorants et les équipes informatiques des partenaires.

### Justification DISP

Sur le projet, sera recruté côté DISP :

- 1 doctorant contribuant principalement sur le WP3 et participant au WP5, ayant des compétences en génie industriel (simulation, optimisation, modélisation) = 118 k€
- 1 ingénieur (sur 1 an) travaillant sur le WP5, ayant des compétences en informatique et Systèmes d'Information = 52 k€

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>	PRC
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications		Aide : 450 k€

- 1 stagiaire (6 mois) travaillant sur les WP2 & WP5, ayant des compétences en Systèmes d'Information et en ontologie = 3.6 k€
- 1 stagiaire (6 mois) travaillant sur le WP4, ayant des compétences en mathématiques appliquées = 3.6 k€

En soutien, il sera nécessaire d'investir dans 2 ordinateurs, support au travail du doctorant et de l'ingénieur (3 k€), ainsi que 2 licences Anylogic, logiciel choisi pour développer les simulations à base d'agents (achat d'une licence recherche = 3,1 k€).

Enfin des frais liés aux missions (coordination du projet, visite du SAU du CHU Saint-Etienne, interviews d'experts, etc.) et à 2 conférences internationales sont à prévoir (11 k€).

#### Justification CRAN

Sur le projet, sera recruté côté CRAN :

- 1 doctorant contribuant principalement sur les WP2 et WP4 et participant au WP5, ayant des compétences en génie industriel et informatique (modélisation, simulation, Système d'Information) = 118 k€
- 1 stagiaire (6 mois) travaillant sur les WP3 & WP5, ayant des compétences en gestion des opérations et architecture holonique = 3.6 k€
- 1 stagiaire (6 mois) travaillant sur le WP4, ayant des compétences en simulation = 3.6 k€

En soutien, il sera nécessaire d'investir dans 2 ordinateurs, support au travail du doctorant et des stagiaires (3 k€). Enfin, des frais liés aux missions (coordination du projet, visite du SAU du CHU Saint-Etienne, interviews d'experts, etc.) et à 2 conférences internationales sont à prévoir (11 k€).

#### Justification CHU Saint-Etienne

Sur le projet, sera recruté côté CHU :

- 1 Postdoc travaillant sur le WP1, ayant des compétences en génie industriel (modélisation, simulation) et Systèmes d'Information, avec une expérience précédente dans les systèmes de santé = 52 k€

En soutien à l'expérimentation et à la collecte de données, du petit matériel informatique (capteurs, tablettes, etc.) est prévu à hauteur de 5 k€ en support aux expérimentations. Enfin, des frais liés aux missions (coordination du projet, interviews d'experts, etc.) et à 1 conférence internationale sont à prévoir (5 k€).

#### *Moyens demandés par grand poste de dépense et par partenaire*

	DISP	CRAN	CHU
Frais de personnel	177 000 €	125 200 €	52 000 €
Coûts des instruments et du matériel (dont consommables scientifiques)	3 000 €	3 000 €	5 000 €
Coûts des bâtiments et des terrains	0 €	0 €	0 €
Prestation de service et droits de propriété intellectuelle	6 200 €	0 €	0 €
Frais généraux non forfaitisés	11 000 €	11 000 €	5 000 €
Frais d'environnement**	25 636 €	18 096 €	8 060 €
<b>Sous-total</b>	<b>222 836 €</b>	<b>157 296 €</b>	<b>70 060 €</b>
<b>Aide demandée</b>	<b>450 192 €</b>		

### 3 Impact et retombées du projet

#### Retombées socio-économiques

De par sa nature, le JN s'inscrit dans la transformation numérique de l'hôpital. Il devrait contribuer à un **meilleur pilotage du SAU**, en particulier en cas de **situations de tension**, par une meilleure visualisation du système et un partage des connaissances entre les différents acteurs. Le résultat

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>		<b>PRC</b>
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois	Aide : 450 k€
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications			

escompté est une politique de gestion des opérations d'un service d'urgences dans ses dimensions technique, humaine et économique en améliorant globalement l'affectation de ressources aux besoins des patients tout au long de leur parcours de soins au sein du SAU. Par exemple, cette meilleure gestion réduirait la durée de séjour moyenne des patients tel qu'il a pu être mesuré par les travaux de [Kadri 2014] pour lequel l'outil de détection temps réel de mise en tension des urgences pédiatriques du centre hospitalier de Valenciennes a montré une amélioration notable de plus 30% sur le temps de prise en charge des patients par l'Infirmière d'Orientation et d'Accueil. Les travaux de [Bouleux 2015] ont montré également qu'un outil automatique et temps réel de détection précoce de mise en tension a permis de gagner près de 3 semaines sur la mise en place de structures organisationnelles au sein du SAU pédiatrique de Saint-Étienne.

Concernant l'adéquation aux défis sociétaux et retombées pour la société, les défis soulevés à la fois au niveau conceptuel sur (1) les modèles de maturité et le cadre de modélisation générique, (2) l'exploitation de la masse de données issue des Systèmes d'Information ou Systèmes Cyber-Physiques pour la génération et la mise à jour des modèles de simulation et (3) les challenges technologiques au niveau des langages et paradigmes de programmation sont autant de points, si nous réussissons à bien les mener, qui permettront de proposer des recommandations et des bonnes pratiques de modélisation couvrant un large panel de domaines d'application et de situations d'usage. Enfin, placer l'Homme au centre de la boucle de décision pour que la technologie s'adapte à l'homme et non l'inverse, place aussi ce projet dans une tentative de prendre en compte un des défis sociétaux qui est la place de l'Homme dans l'usine du futur.

### Impacts scientifiques et technologiques

Il est clair que les objectifs et les questions scientifiques posées dans ce projet sont novateurs et permettront d'enrichir la littérature. Les spécialistes du domaine pourront trouver un nombre important de concepts fondamentaux, ainsi qu'une preuve de faisabilité.

Le projet est à l'interface entre le monde hospitalier, le génie industriel et les Systèmes d'Information. En effet, le projet JUNEAU permettra d'explorer une approche originale de l'usage de la simulation pour la planification et le pilotage des SAU. L'utilisation du modèle de simulation, comme un miroir du modèle de décision, travaillant en totale symbiose grâce à un échange mutuel de services (que nous pouvons grouper dans l'enrichissement des modèles de pilotage et la validation des modèles de simulation) permettra une totale synchronisation entre les systèmes numériques et les systèmes physiques.

Par conséquent, ce projet s'inscrit totalement sur l'axe E.5 « Modèles numériques, simulation, applications » avec le contexte applicatif du SAU. Ainsi, les présents travaux visent à travailler sur les verrous « modélisation de problèmes complexes » et « construction de modèles guidés par les données, hybridés » pour le développement d'un JN, à travers des problèmes de modélisations guidées par les données et workflows (OS1), d'optimisation hybride (OS2) et d'une modélisation et gestion originale de la dynamique des modèles (OS3).

### Politique de dissémination et transfert

Les résultats scientifiques de ce projet seront valorisés au travers de publications dans des journaux des communautés du Génie Industriel et de la Santé tels que : Engineering Applications of Artificial Intelligence, Computers in Industry, Computers in Industrial Engineering, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, etc. Aider l'organisation d'un CHU étant aujourd'hui redevenu un objectif national, et comme cela a été le cas lors du projet PHRC-15-PREPS-15-000668, des reportages de télévision locales ou régionales pourront être réalisés afin de promouvoir l'impact positif d'un tel projet du point de vue sociétal. Des communications dans des conférences de ces domaines sont prévues (IFAC World Congress, IFAC INCOM, IMS, SOHOMA, etc.).

Des actions de communication orientées usagers (i.e. praticiens du mode hospitalier) sont aussi envisagées avec, par exemple, des articles dans BMC Medical Informatics and Decision Making, Journal of Medical Internet Research/JMIR Medical Informatics ou encore Journal of Biomedical Informatics ou des présentations dans des salons professionnels dédiés (Santé-Expo Paris Healthcare Week).



<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>	<b>PRC</b>
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications		Aide : 450 k€

## 4 Bibliographie

- Ajmi F., Zgaya H., Ben Othman S., Hammadi S. (2019) **Agent-based dynamic optimization for managing the workflow of the patient's pathway**, Simulation Modelling Practice and Theory, 96:101935 (10.1016/j.simpat.2019.101935)
- Alam K.M., El Saddik A. (2017) **C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems**. IEEE access, 5: 2050-2062 (10.1109/ACCESS.2017.2657006)
- Augusto V., Xie X. (2014) **A modelling and simulation framework for health care systems**. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems, 44 (1): 30-46 (10.1109/TSMC.2013.2239640)
- Bouleux G., Marcon E., Mory O. (2015) **Early Index for Detection of Pediatric Emergency Department Crowding**. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 19(6):1929-1936. (10.1109/JBHI.2014.2350996)
- Boyle L.M., Marshall A.H., Mackay M. (2021) **A framework for developing generalisable discrete event simulation models of hospital emergency departments**. European Journal of Operational Research (10.1016/j.ejor.2021.12.033)
- Bruynseels K., Santoni de Sio F., van den Hoven J. (2018) **Digital twins in health care: ethical implications of an emerging engineering paradigm**, Frontiers in Genetics, 9: 31 (10.3389/fgene.2018.00031)
- Cardin O., Trentesaux D., Thomas A., Castagna P., Berger T., El-Haouzi H.B. (2017) **Coupling predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures: state of the art and future challenges**. Journal of Intelligent Manufacturing, 28(7): 1503-1517 (10.1007/s10845-015-1139-0)
- Cardon A. (2004). **Etude de la conception et du contrôle comportemental d'une organisation massive d'agent**, <http://admiroutes.asso.fr/larevue/2001/22/Robot.pdf>
- Croatti A., Gabellini M., Montagna S., Ricci A. (2020) **On the integration of agents and digital twins in healthcare**, Journal of Medical Systems, 44: 161 (10.1007/s10916-020-01623-5)
- Curtis C., Liu C., Bollerman T.J. & Pianykh O.S. (2018) **Machine learning for predicting patient wait times and appointment delays**, J. of American College of Radiology, 15(9):1310-1316 (10.1016/j.jacr.2017.08.021)
- Darema F. (2004). **Dynamic data driven applications systems: A new paradigm for application simulations and measurements**. Int. Conf. on Computational Science, 662-669 (10.1007/978-3-540-24688-6\_86)
- Davidsson P., Persson J.A., Holmgren J. (2007) **On the integration of agent-based and mathematical optimization techniques**. In KES International Symposium on Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications (pp. 1-10). Springer, Berlin (10.1007/978-3-540-72830-6\_1)
- Derigent W., Cardin O., Trentesaux D. (2020) **Industry 4.0: contributions of holonic manufacturing control architectures and future challenges**. Journal of Intelligent Manufacturing, 32(7):1797-1818 (10.1007/s10845-020-01532-x)
- Erol T., Mendi A. F., Dogan D. (2020). **The digital twin revolution in healthcare**, 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), 1–7.
- Esmaeili A., Mozayani N., Motlagh M.R., Matson E.T. (2017) **A socially-based distributed self-organizing algorithm for holonic multi-agent systems: Case study in a task environment**, Cognitive Systems Research. 43: 21–44 (10.1016/j.cogsys.2016.12.001)
- Frazzon E.M., Kück M., Freitag M. (2018) **Data-driven production control for complex and dynamic manufacturing systems**. CIRP Annals, 67(1), 515–518 (10.1016/j.cirp.2018.04.033)
- Goodall P., Sharpe R., West, A. (2019). **A data-driven simulation to support remanufacturing operations**. Computers in Industry, 105, 48–60 (10.1016/j.compind.2018.11.001)
- Huet J.-C. (2011) **Proposition d'une méthodologie de réingénierie pour le contrôle par le produit de systèmes manufacturiers : Application au circuit du médicament d'un hôpital**. Thèse doctorat, Univ. Clermont-Ferrand II
- Kadri F. (2014) **Contribution à la conception d'un système d'aide à la décision pour la gestion de situations de tension au sein des systèmes hospitaliers. Application à un service d'urgence**, Thèse doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis
- Karakra A., Fontanili F., Lamine E., Lamothe J. (2019) **Hospit'Win: A Predictive Simulation-Based Digital Twin for Patients Pathways in Hospital**. Proceedings of IEEE EMBS – BHI, Chicago (USA) (10.1109/BHI.2019.8834534)
- Kivelevitch E., Cohen K., Kumar M. (2013) **A market-based solution to the multiple traveling salesmen problem**. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 72: 21–40 (10.1007/s10846-012-9805-3)
- Koestler A. (1967) **The ghost in the machine**. Hutchinson.
- Koestler A. (1979) **Janus: A summing up**. Bulletin of the Atomic Scientists, 35(3): 4 (10.1080/00963402.1979.11458590)
- 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 (10.1016/j.ifacol.2018.08.474)

<b>AAPG2022</b>	<b>JUNEAU</b>	<b>PRC</b>
Coordonné par :	Vincent CHEUTET	Durée : 48 mois
CES 46 : Modèles numériques, simulation, applications		Aide : 450 k€

- Lachtar D., (2013). **Contribution des systèmes multi-agent à l'analyse de la performance organisationnelle d'une cellule de crise communale**, Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Liu Y., Moyaux T., Bouleux G., Cheutet V. (2022) **An agent-based architecture of the Digital Twin for an Emergency Department**. Pré-publication <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03607543v1>
- Markdahl J. (2018) **A geometric obstruction to almost global synchronization on Riemannian manifolds**, <https://arxiv.org/abs/1808.00862>
- Melesse T.Y., Di Pasquale V., Riemma S. (2020) **Digital twin models in industrial operations: A systematic literature review**, *Procedia Manufacturing*, 42:267–272 (10.1016/j.promfg.2020.02.084)
- Moyaux T., McBurney P. (2012) **Centralised vs. Market-based and Decentralised Decision-Making: A Review**, *Cybernetics & Systems*, 43(7):567-622 (10.1080/01969722.2012.703911)
- Moyaux T., Marcon E. (2020). **Cost of selfishness in the allocation of cities in the Multiple Travelling Salesmen Problem**, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 89:103429 (10.1016/j.engappai.2019.103429)
- Moyaux T. (2022) **Organisations (de-)centralised to a greater or lesser degree for allocating cities in two Multiple Travelling Salesmen Problems**. Pré-publication <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03601601>
- Munch E. (2013). **Applications of persistent homology to time varying systems**, Thèse doctorat, Université Duke, <https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/handle/10161/7180>
- 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, (10.1016/j.promfg.2017.07.198)
- Noyel M., Thomas P., Thomas A., Charpentier P. (2016) **Reconfiguration process for neuronal classification models: Application to a quality monitoring problem**. *Computers in Industry*, 83:78–91 (10.1016/J.COMPIND.2016.09.004)
- Patrone C., Lattuada M., Galli G., Revetria R. (2018). **The role of internet of things and digital twin in healthcare digitalization process**, *WCECS 2018*, 30–37 (10.1007/978-981-15-6848-0\_3)
- 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**, *Advancing Technology Industrialization Through Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques*. 605–615 (10.3233/FAIA190084)
- Pealat C., Bouleux G., Cheutet V., Maignan M., Provoost L., Mory O. (2020) **Extraction of clinical codes associated with winter respiratory virus from Emergency Department by a Manifold-based approach**, *Proceedings of 2020 ICPR, Milan, Italy*
- Pujo P., Broissin N., Ounnar F. (2015) **PROSIS : An isoarchic structure for HMS control**. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7):1034-1045, (10.1016/j.engappai.2009.01.011)
- Pystina K., Sekhari A., Gzara L., Cheutet V. (2021) **Digital Twin for production systems: a literature perspective**. *Proceedings of IEEE SOHOMA'21, Cluny - France*
- Redelinghuys A.J.H., Basson A.H., Kruger K. (2019) **A six-layer architecture for the digital twin: a manufacturing case study implementation**. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31: 1383–1402 (10.1007/s10845-019-01516-6)
- Sallez Y., Berger T., Raileanu S., Chaabane S., Trentesaux D. (2010) **Semi-heterarchical control of FMS: From theory to application**. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(8): 1314–1326 (10.1016/j.engappai.2010.06.013)
- Salmon A., Rachuba S., Briscoe S., Pitt M. (2018) **A structured literature review of simulation modelling applied to Emergency Departments: Current patterns and emerging trends**. *Operations Research for Health Care*, 19: 1–13 (10.1016/j.orhc.2018.01.001)
- Semeraro C., Lezoche M., Panetto H., Dassisti, M. (2021) **Digital twin paradigm: A systematic literature review**. *Computers in Industry*, 130 (10.1016/j.compind.2021.103469)
- Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. (2019) **Digital Twin in Industry: State-of-the-Art**, *IEEE Trans. Ind. Informatics*, 15(4):2405–2415 (10.1109/TII.2018.2873186)
- Thomas P., El-Haouzi H.B., Suhner M.C., Thomas A., Zimmermann E., Noyel, M. (2018) **Using a classifier ensemble for proactive quality monitoring and control: the impact of the choice of classifiers types, selection criterion, and fusion process**. *Computers in Industry*, 99: 193–204 (10.1016/j.compind.2018.03.038)
- Valckenaers P. (2020) **Perspective on holonic manufacturing systems: PROSA becomes ARTI**. *Computers in Industry*, 120: 103–226 (10.1016/j.compind.2020.103226)
- Valette E., Demesure G., El-Haouzi H.B., Pannequin R. (2021) **Formal and modelling frameworks for Social Holonic Control Architectures**. *Computers in Industry*, 132: 103521 (10.1016/J.COMPIND.2021.103521)