



# Projet de thèse dans le cadre de la Chaire de Recherche IMT "Jumeaux Numériques pour les Systèmes Industriels de Production » (JNSIP)

## 1. CONTEXTE DES TRAVAUX : LA CHAIRE DE RECHERCHE IMT "JNSIP"

La Chaire de Recherche « Jumeaux Numériques des Systèmes Industriels de Production (JNSIP) » de l'Institut Mines Telecom (IMT) réunit des entreprises mécènes et des experts de plusieurs écoles de l'IMT pour développer des méthodes, techniques et outils autour du concept de Jumeaux Numériques (JN) de systèmes industriels complexes (produits / services, procédés et processus).

Les sociétés SIEMENS (fournisseur de solutions), INOPROD (cabinet conseil spécialisé dans le déploiement de solution de simulation de flux) et Pierre FABRE (pharmacie et cosmétique, utilisateur final) sont les partenaires industriels actuels de cette Chaire.

Les écoles Mines Saint-Etienne, IMT Mines Albi et IMT Mines Alès sont les partenaires académiques en charge des travaux de R&D au travers de sujets de thèse dont le sujet suivant.

L'ensemble des travaux de R&D de cette chaire se focalise de fait sur des problématiques de flux inter et intra entreprises. Il s'agit ici de développer des JN qui traitent de la dynamique d'un système de production et du système logistique qui l'accompagne. Cette dynamique s'exprime dans le temps et l'espace, et prend notamment en compte l'ensemble des ressources critiques (Machines, Hommes, Energies, Données, Matières) et les chaînes de valeurs associées allant du fournisseur jusqu'au client. Ces travaux permettront d'évaluer les principaux KPIs des systèmes productif et logistique étudiés en fonction de différents facteurs de complexité tels que leur taille, leur distribution géographique, leurs dépendances à d'autres systèmes, etc. Le but est d'alimenter quantitativement et qualitativement, en confiance, les processus d'aide à la décision et d'analyse de risques.

Pour ce faire, il est proposé ici de travailler sur la **construction et la maintenance de ces JN selon l'usage souhaité** (Process, Organisationnel Intra ou Inter-entreprise, Données) et de **selon leur nécessaire interopérabilité** (un JN devant par définition être fédéré avec d'autres pour en former un plus global ou en alimenter un autre). Cette aide à l'ingénierie, à l'évolution, au déploiement et au maintien de ces JN a pour objectif de respecter au mieux la règle des 3 "S" : Simplicité de conception, Simplicité de maintenance, et Simplicité d'utilisation. Cela induit des questionnements sur la contradiction souvent perçue entre la Simplicité recherchée de conception, de maintenance et d'utilisation et le Réalisme jugé suffisant et acceptable pour supporter les décisions.

Ces travaux s'appuieront sur les cas d'usages proposés par les partenaires industriels de la chaire, et plus particulièrement, par les utilisateurs-finaux. Les premiers cas d'usages pressentis concernent globalement la RSE, à travers l'Ecologie, l'Energie, et les aspects Sociaux.

## 2. PROBLEMATIQUE DES TRAVAUX

Un Jumeau Numérique (JN, Digital Twin ou DT) est défini dans certains standards comme une *réplique numérique d'un système réel* i.e., au sens général, d'un système caractérisé entre autres par sa complexité.

Nous considérons dans la suite des systèmes tels que : procédé, système de production, système logistique, ou entreprise. Le terme entreprise doit de même ici être défini au sens d'un ensemble d'unités d'organisation, éventuellement intriquées les unes dans les autres et interdépendantes, intra comme inter-sociétés et qui collaborent autour de la conception ou de la production d'un même produit par exemple.

Si le concept de JN n'est globalement pas nouveau, il apparaît aujourd'hui comme pertinent pour de nombreux secteurs industriels afin de répondre à des usages et des objectifs particuliers comme, par exemple :

- Piloter la solution mise en place dans un environnement donné pour remplir sa mission en tenant compte de la remontée en temps réel de données terrain ;
- Maintenir et faire évoluer cette solution en conditions opérationnelles ;
- Former des opérateurs à l'utilisation de cette solution ;
- Détecter les besoins puis reconfigurer l'architecture physique du système cible ;
- Etudier le comportement global de ce système cible lorsqu'il est soumis à différents événements (ex : défauts d'approvisionnement, défaut qualité, pannes, etc.) qui peuvent s'avérer difficiles, voire risquées et coûteuses à expérimenter dans la réalité.
- ...

De fait, un Jumeau Numérique peut bien entendu ne pas être unique pour un même système car il est dédié à un de ces usages et doit donc couvrir des besoins particuliers. Cependant, différents jumeaux d'un même système doivent donc être cohérents, se compléter et être interopérables afin d'offrir au final une vision plus réaliste, conforme et fidèle du système physique puisque ce dernier sera représenté avec des points de vue différents. L'ensemble de ces JN peut alors former à son tour un Jumeau Numérique plus représentatif qui permet alors d'améliorer la confiance globale de toutes les parties prenantes du système cible, quels que soient leurs besoins et usages propres. Une décision prise par exemple en maintenance, et qui utiliserait donc un JN dédié à cet usage, va nécessairement influencer le pilotage qui utiliserait lui aussi un JN dédié avec des effets de bord qui restent encore aujourd'hui difficilement prévisibles sans cette vision globale du système cible.

Ensuite, le système cible peut exister auquel cas un JN doit être développé, testé et validé de manière à démontrer sa gémellité c'est-à-dire sa conformité, sa cohérence et sa fidélité par rapport au système cible pour un usage attendu et dans un ou des environnements dits opérationnels réels. Le système cible peut aussi être encore en création auquel cas un JN doit être développé pas à pas, testé et validé au fur et à mesure de la maturation du système en cours de développement en restant en cohérence avec le processus de conception. Dans les deux cas, le JN et le système cible qu'il représente doivent nécessairement interagir et communiquer afin de faire perdurer cette idée de gémellité entre un système évoluant dans le temps et l'espace et une représentation qui se doit alors d'être mise en jour pour prendre en compte cette évolution ou l'influencer. Un JN est donc plus précisément un artefact à la fois logiciel et matériel qui virtualise le comportement, la structure et le fonctionnement, se synchronise avec le système cible tel qu'il est déployé, installé, paramétré et exploité dans son environnement (ex : un système de production au sein d'une usine) et doit donc être maintenu dans le temps pour faire perdurer de cette gémellité.

Enfin, un JN doit aussi permettre d'accéder, de manipuler, analyser, visualiser, ... différentes données, informations et connaissances nécessaires pour les différents acteurs impliqués en phase d'exploitation et de maintenance de chaque JN. Ces manipulations et analyses reposent sur des fonctionnalités que ces acteurs souhaitent : simuler, optimiser, tester une configuration, valider, aider à la décision... Il ne doit donc pas être vu comme une simple représentation géométrique de la solution comme cela est souvent intuitivement évoqué, comme une base de données ou encore comme une simulation numérique. Il est en effet censé être suffisamment réaliste et fidèle de la solution retenue, vue sous différents angles et points de vue, pour servir les objectifs de ces acteurs.

Il est donc proposé de définir globalement un Jumeau Numérique comme une structure de modèles du système cible, de données, d'informations et de connaissances s'y rapportant, dont tous les éléments sont :

- Connectés et fédérés, et de fait sémantiquement et pragmatiquement interopérables (i.e. sans ambiguïté d'interprétation ou d'usage) ;
- Dont l'exécution est traçable i.e. la simulation, l'animation, l'interprétation, l'analyse via des mécanismes formels par exemple d'analyse de dépendance ou via des modules d'analyse basés sur des techniques issues de l'IA.

Chaque JN fournit donc résultats réalistes et crédibles qui seront alors à la base de démonstrations de diverses natures (ex : performance, accessibilité, sûreté, etc.).

### 3. PROJET DE THESE

**Le travail proposé portera sur la façon de concevoir, composer et fédérer des JN qui se focalisent chacun sur des points de vue différents d'un même système. Le but est de développer une approche permettant de créer et de disposer d'un ensemble de JN interopérables, maintenables dans le temps et adaptés aux usages attendus.**

**Titre :** Développement d'une approche pour l'ingénierie et la maintenance de jumeaux numériques basée modèles, interopérabilité et usages

**Mots clés :** Jumeau Numérique, méthode, Systémique, Système Complexe, Ingénierie Système, Ingénierie Système Basée Modèles (ISBM), Maintenance, Interopérabilité, Usage

#### 3.1 OBJECTIFS DES TRAVAUX

Cette aide à l'ingénierie, à l'évolution, au déploiement et au maintien de ces JN a pour objectif de lever la contradiction forte qui existe entre la simplicité recherchée de conception, de maintenance et d'utilisation et le réalisme jugé suffisant et acceptable pour supporter les décisions.

Pour ce faire, il sera nécessaire de travailler sur la construction de JN (Process, Organisationnel Intra ou Inter-entreprise, Données) et de travailler à leur nécessaire évolutivité pour faire face aux usages attendus et à leur interopérabilité. Une approche de type Ingénierie Système Basées Modèles et Données (MBSE ou Model Based System Engineering) sera alors mise en avant pour viser ces objectifs.

Les questions à traiter durant ces travaux sont donc :

- Comment définir les besoins des acteurs métier impliqués dans la phase de conception, d'exploitation et de maintenance d'un JN ?
- Comment choisir, extraire, aligner et rendre interopérables des modèles de nature hétérogènes et de différents degrés de détail (dont d'autres jumeaux numériques), données, informations ?
- Comment construire et développer techniquement un Jumeau Numérique en 1) fédérant et/ou composant ces modèles, données, informations, et connaissances, 2) mettre en place un mécanisme de jumelage terrain / virtuel pour permettre la remontée et l'échange de données terrain, et 3) en développant ou réutilisant des fonctionnalités disponibles dans des outils de modélisation et de simulation actuellement développés par SIEMENS, mais aussi des outils de gestion et de sécurisation de données complexes, de traçabilité, des modules de remontée de données terrain utilisant des techniques d'IoT, ...) existants ?
- Comment enfin maintenir le Jumeau Numérique tout au long du cycle de vie du système qu'il représente en restant continuellement aptes à juger, valider et justifier le niveau de réalisme et de fidélité de ce dernier ?

#### 3.2 CADRE DE RECHERCHE

La thèse sera effectuée au LSR (Laboratoire de Sciences du Risque) de l'IMT Mines Alès.

L'Ecole Doctorale de rattachement est l'ED I2S de l'Université Montpellier. Les travaux se dérouleront au Laboratoire des Sciences des Risques (LSR) de l'IMT Mines Alès, 6 avenue de Clavières, 30100 Alès (<http://mines-ales.fr/>).

Le thème ISCR (Ingénierie de Systèmes Complexes pour les activités à Risques) du Laboratoire des Sciences des Risques (LSR) de l'IMT Mines Alès travaille sur le développement des aspects conceptuels, méthodologiques et techniques pour soutenir des activités d'ingénierie, de la conception jusqu'à la réalisation et au développement, d'un système complexe. Les Enseignants-Chercheurs de ce thème visent donc le développement de concepts, de méthodes et d'outils pour modéliser, vérifier, valider, simuler et évaluer des artefacts jugés satisfaisants pour répondre à l'ensemble des besoins, contraintes et usages des parties prenantes impliquées ou concernées par ces activités d'ingénierie.

Vous aurez accès aux moyens matériels et aux ressources du Laboratoire selon vos besoins.

### 3.3 DEROULEMENT PROPOSE

Outre les activités classiques de formation doctorale, ces travaux vont essentiellement consister à :

- Mener à bien et croiser une approche descendante et une approche remontante de R&D :
  - Approche descendante : elle prendra essentiellement la forme d'une revue systématique de la littérature (articles, standards, normes, référentiels, travaux de groupes d'experts...) prenant en compte les mots clés de ces travaux
  - Approche remontante : elle sera basée sur des études terrain fournies par les end-users et les intégrateurs de solutions membres de la Chaire, et des REX autour de la conception, du développement et des usages de Jumeaux Numériques à vocation industrielle ;
- Développer et outiller la méthode pour assurer les objectifs des travaux : usages, interopérabilité et maintenance de Jumeaux Numériques existant ou en création. Cela nécessite de proposer les concepts, les langages (e.g. de modélisation, de fédération, de simulation, ...), une démarche opérationnelle graduelle et assurant la confiance des parties prenantes à la fois de la conception et de la réalisation du JN ;
- Valider cette méthode et tester l'outillage sur un exemple industriel fourni dans le cadre de la Chaire ;
- S'impliquer dans une campagne de publication et de diffusion vers les communautés académiques et industrielles.

## 4. CANDIDATURE

### 4.1 CANDIDAT

Vous êtes titulaire d'un diplôme de Master ou d'Ingénieur (portant la mention sur le grade de Master). Vous avez de l'appétence pour les compétences suivantes :

- Approche Système
- Jumeau Numérique
- Modélisation : multi paradigmes et multi langages / Méta modélisation / Discrète, Temps réel / Transformation, Alignement, et Fédération de modèles
- Simulation / Cosimulation / Emulation : standards, techniques et outils
- Données complexes : techniques et principes de traitements
- Ouverture d'esprit et curiosité, autonomie et force de proposition (juger, décider, convaincre)
- Appétence appréciée pour le développement informatique

Un niveau de langue B1 au moins est exigé en anglais et/ou en français.

### 4.2 DOSSIER DE CANDIDATURE

Ce dossier doit être constitué des pièces suivantes :

- Un CV détaillé ;
- Une lettre de motivation décrivant l'intérêt et les souhaits au regard du domaine et du sujet proposés ;
- Des pièces attestant son niveau de diplôme i.e. du grade de master (obtenu ou en cours d'obtention) ;
- Lettres de recommandation avec coordonnées précises des personnes signataires ;
- Tous documents jugés nécessaires pour attester de la pertinence de la candidature selon le ou la candidat.e comme, par exemple, références ou présentation des travaux de R&D menés à bien durant la scolarité et/ou dans le cadre d'expériences professionnelles antérieures.

Une entrevue entre le (la) candidat(e) et les parties prenantes industrielles et académiques de cette thèse sera organisée très rapidement. Pour cela, le (la) candidat(e) devra présenter son projet de recherche et de développement au regard du sujet de thèse proposé.

### 4.3 CALENDRIER

- La durée de la thèse est de 36 mois.
- Date limite de candidature : 30/05/2023
- Date de début de la thèse : Plus rapidement possible à partir de septembre 2023

## 5. CONTACTS

- Souad RABAH-CHANIOUR - Laboratoire des Sciences des Risques (LSR) / IMT Mines Alès : [souad.rabah-chaniour@mines-ales.fr](mailto:souad.rabah-chaniour@mines-ales.fr), tél. +33 4 34 24 62 92
- Vincent CHAPURLAT - Laboratoire des Sciences des Risques (LSR) / IMT Mines Alès : [Vincent.chapurlat@mines-ales.fr](mailto:Vincent.chapurlat@mines-ales.fr), tél. +33 4 34 24 62 87 - mob. +33 6 22 23 79 93
- Matthieu LAURAS – Centre de Génie Industriel (CGI) / IMT Mines Albi, [matthieu.lauras@mines-albi.fr](mailto:matthieu.lauras@mines-albi.fr), tél. +33 5 63 49 3216
- Frédéric GRIMAUD – Institut Henry Fayol / Mines Saint-Etienne, [frederic.grimaud@mines-stetienne.fr](mailto:frederic.grimaud@mines-stetienne.fr), tél. +33 4 77 42 01 77