



# Proposition de Thèse CEA / IMT mines Alès



## Construction d'un jumeau numérique d'un procédé de vitrification en vue de son pilotage

### 1 CONTEXTE

Depuis 1968, le CEA travaille sur le développement des procédés de vitrification permettant de conditionner des produits de fission et actinides issus du retraitement des combustibles usés.

Parmi toutes les technologies émergentes de l'industrie 4.0, le Jumeau Numérique (JN) est une technologie qui vise à développer une réplique numérique la plus fidèle possible d'un objet, d'un processus ou d'un système au regard d'un objectif donné et d'un niveau de détail nécessaire et jugé suffisant pour un usage donné, par exemple, supervision, pilotage, optimisation et prédiction, apprentissage et entraînement d'un opérateur, ou encore maintenance préventive.

Ce double numérique doit s'appropriier l'ensemble des composants, des fonctions et des comportements et des propriétés de système réel en regard de ces usages attendus. Il repose donc sur l'exploitation de modèles de différentes natures (fonctionnels, organiques et comportementaux) de procédé et de données de diverses natures selon son état comme, par exemple, des données d'exploitation si ce système est effectivement utilisé. Sur la base de cette modélisation, le JN intègre ensuite la remontée d'informations venant de différents capteurs instrumentant le système étudié et connectés via des mécanismes d'IoT qui en mesurent en temps-réel des paramètres physiques jugés là aussi pertinents. Enfin, le JN est à même d'intégrer des algorithmes d'intelligence artificielle qui peuvent analyser certaines de ces données remontantes et des bases de données par exemple issues des utilisations passées.

L'objectif des travaux de thèse est de construire un premier prototype qui préfigurera le JN générique des procédés de vitrification. En utilisant les données acquises durant les essais déjà réalisés, d'une part, et les connaissances du procédé d'autre part, l'idée est de concevoir un jumeau numérique, fidèle et représentatif du système complet, qui une fois élaboré et validé, sera assez précis et réaliste pour permettre le pilotage du procédé, ceci notamment dans l'objectif d'optimiser voire de réduire les coûts des futurs essais. Ce projet de recherche vise à étudier l'apport et à démontrer l'intérêt de cette technologie appliquée aux procédés de vitrification, à un niveau exploratoire, au travers d'une Preuve de Concept (Proof of Concept ou PoC).

### 2 LE PROCÉDE VISE ET LES CHALLENGES DE LA THESE

Les procédés actuellement développés sont des systèmes complexes qui mettent en jeu trois composantes technologiques essentielles : le four, le calcinateur et le traitement des gaz. Le procédé cible est un procédé existant actuellement sur le site de Marcoule, échelle 1. Des modélisations du comportement physico-chimique ont été validées sur l'un des sous-systèmes, le four, où l'on dispose d'une modélisation Magnéto-Thermo-Hydraulique (MHT). Pour les autres composantes, ou sous-systèmes, il n'y a à ce jour pas de modélisation existante. En revanche, de nombreuses données issues des essais terrain sont disponibles. Des instrumentations particulières et des essais sont de même à envisager pour compléter les jeux de données nécessaires.

Pour concevoir un JN du procédé cible, il s'agira d'adopter une approche de modélisation combinant approche systémique et approches de traitements de données pour identifier les modèles manquants. Les recherches s'articuleront autour de 3 axes :

- Développement d'une méthodologie pour arriver à modéliser ce procédé autrement que par parties, avec une vision système globale et holistique, réaliste et aussi fidèle que possible pour répondre aux besoins de pilotage. La thèse visera à proposer de nouvelles modélisations en s'intéressant entre autres à la description des entrées/sorties, des fonctions et de l'architecture, aux langages de modélisation et à la sémantique opérationnelle devant être spécifiée pour permettre de rendre exécutable ces modèles. La méthodologie s'intéressera aussi à représenter d'autres procédés existants pour pouvoir être la plus générique possible.
- Fédération des modèles visant à combiner entre eux et à faire communiquer, donc à rendre interopérables tous les modèles alors disponibles et intégrer des remontées de données terrain pour construire une représentation numérique globale et jugée suffisamment fiable et crédible. Il s'agira alors de proposer une approche de fédération de modèles et de remontée des données terrain pour aller vers la génération du JN souhaité et des métriques pour juger de la crédibilité et de l'acceptabilité de la fédération de modèles obtenue.
- Développement d'interfaces utilisateur pour rendre utilisable ce JN par les utilisateurs finaux du procédé. Les travaux s'intéresseront à définir une approche de mise en œuvre et d'exécution du JN.

Les challenges de cette thèse sont donc d'arriver à modéliser, fédérer, simuler et instrumenter un procédé complexe avec une vision à fois système et données pour atteindre un niveau de réalisme par rapport au procédé qui soit suffisant au regard des objectifs que se fixent les pilotes du « Procédé fil rouge », et plus généralement de tout procédé a terme.

### 3 TRAVAUX PROPOSES

Les travaux essentiels à mener à bien au cours de cette thèse consisteront à :

- Mener à bien une revue de la littérature académique et industrielle sur différents sujets : la modélisation systémique, la position du jumeau numérique et sa contribution à l'échelle industrielle (thématique, valeur ajoutée, originalité, principes, ...), les standards de fait et les normes sur la fédération et l'alignement de modèles, les méthodes de modélisation et d'identification des procédés complexes, la simulation et l'émulation de modèles, les outils afférents, le domaine nucléaire et plus particulièrement la vitrification de déchets, ... ;
- Cartographier les données de référence sur les différents procédés existants : modélisations existantes, données issues d'essais précédents, configurations des procédés soumis aux essais, scénarios testés, etc. Les données alimentant les différents modèles du JN doivent être pertinentes en termes de volume, variabilité et vélocité en particulier. Cet état des lieux des données donnera lieu à l'analyse du travail à réaliser (qualitatif et quantitatif) pour créer le JN voire de morceler le JN du procédé en un JN propre à chacun des trois sous-systèmes. Cela aboutira à la définition du périmètre d'intérêt pour les développements du JN dans le cadre de cette thèse et permettra de déterminer le procédé cible des travaux, appelé « procédé fil rouge ».
- Développer et outiller la méthode de construction de d'exécution du JN en combinant approche système basée modèles et basée données. Cela nécessite de proposer les concepts, les langages de modélisation (syntaxe abstraite, syntaxes concrètes principale et alternative métier, sémantique opérationnelle), la démarche de modélisation devant être suivie (générique et sa déclinaison spécifique sur le procédé fil rouge) et le ou les outils support de modélisation et de fédération / alignement de modèles puis de mise en œuvre (exécution)

d'un JN opérationnel ;

- Développer et outiller les moyens et techniques visant alors la remontée des données terrain en temps-réel, en tout cas au regard des constantes de temps du « Procédé fil rouge » ;
- Intégrer techniquement les outils et moyens développés ci-avant pour faire émerger une preuve de concept (POC) sur le « Procédé fil rouge » ;
- Vérifier et valider le POC dans un contexte général pour des utilisations d'aide au pilotage ;
- S'impliquer dans une campagne de publication et de diffusion vers les communautés académiques et industrielles.

#### 4 ENCADREMENT ET FINANCEMENT

La thèse se déroulera au CEA, centre de Marcoule (BP17171 30207 BAGNOLS/CEZE), avec des périodes sur le site Louis Leprince-Ringuet, (7 rue Jules Renard, 30100 Alès) de l'IMT mines Alès encadré par des E/C du thème ISCR (Ingénierie de Systèmes Complexes pour les activités à Risques) du Laboratoire des Sciences des Risques (LSR) de l'IMT Mines Alès.

L'Ecole Doctorale de rattachement est l'ED I2S de l'Université Montpellier (ED n°166).

L'encadrement sera le suivant :

- Co-encadrant industriel : Caroline CHABAL, Ingénieur de recherche CEA, caroline.chabal@cea.fr, tel : 04 66 39 78 68
- Co-encadrant académique : Souad RABAH-CHANIOUR, Maître-Assistant IMT Mines Alès, souad.rabah-chanior@mines-ales.fr, tel. : 04 34 24 62 92
- Directeur de thèse : Vincent CHAPURLAT, Professeur IMT Mines Alès, vincent.chapurlat@mines-ales.fr, mob : 06 22 23 79 93

Le **Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA)** est un établissement public qui joue un rôle majeur dans la recherche, le développement et l'innovation. Au sein du CEA, la direction des énergies (DES) du CEA apporte aux pouvoirs publics et aux industriels les éléments d'expertise et d'innovation pour la mise en œuvre d'un système énergétique bas carbone. La Direction des énergies s'intéresse à tous les modes de production d'énergie bas carbone (énergie nucléaire, énergies renouvelables), à leurs interactions au sein du réseau (stockage, pilotage, conversion), à la problématique des ressources dans une logique de cycle fermé des matières, tout en prenant en compte les dimensions technico-économiques, sociétales et politiques. A Marcoule, des équipes du CEA ont développé depuis plus de 40 ans une forte compétence dans le domaine de la vitrification de déchets radioactifs. Les procédés mis en œuvre dans les ateliers de vitrification de la Hague intègrent chaque fois les nouvelles technologies développées par ces équipes.

Le thème **ISCR** du **Laboratoire des Sciences des Risques (LSR)** travaille sur le développement des aspects conceptuels, méthodologiques et techniques pour soutenir des activités d'ingénierie d'un système complexe qui visent à produire et réaliser un artefact jugé satisfaisant pour répondre à l'ensemble des besoins, contraintes et usages des parties prenantes impliquées ou concernées par ces activités d'ingénierie. L'objectif est de leur permettre de comprendre, exprimer des besoins, modéliser, comparer des solutions et progresser en confiance (V&V et évaluation). Les publications des E/C impliqués dans l'encadrement des travaux de thèse et les thèses soutenues sont accessibles sur <https://hal.mines-ales.fr/>.

La durée du CDD est de 36 mois avec une rémunération brute annuelle selon les conventions CEA.

## 5 PROFIL RECHERCHE

Le(la) candidat(e) doit être titulaire d'un diplôme de Master 2 ou d'Ingénieur, mettant en avant notamment des compétences dans le domaine du Génie Système, du Génie Industriel ou du Génie Logiciel.

Plus particulièrement, des connaissances et des expériences dans les domaines suivants seront particulièrement appréciées :

- Modélisation de systèmes complexes, modélisation multiphysique ; identification ;
- Vérification et Validation de modèles ;
- Analyse et traitement de données ;
- Techniques de fédération, de transformation et d'alignement de modèles, interopérabilité ;
- Développements informatiques et IHM pour outiller et développer le JN de la PoC.

Le(la) candidat(e) doit faire preuve de qualités d'organisation, de rigueur et doit être force de proposition et d'implication dans divers développements à prévoir dans le cadre de la POC. Par ailleurs, le sujet étant appelé à être pluridisciplinaire, une grande curiosité intellectuelle et des capacités relationnelles et d'adaptation à un secteur complexe sont également exigées.

## 6 CANDIDATURE

Tout(e) candidat(e) intéressé(e) est prié(e) de faire parvenir au plus vite son dossier de candidature par courrier électronique **simultanément** à toutes les personnes suivantes :

- Caroline CHABAL : [caroline.chabal@cea.fr](mailto:caroline.chabal@cea.fr)
- Souad RABAH-CHANIOUR : [souad.rabah-chaniour@mines-ales.fr](mailto:souad.rabah-chaniour@mines-ales.fr)
- Vincent CHAPURLAT : [vincent.chapurlat@mines-ales.fr](mailto:vincent.chapurlat@mines-ales.fr)

Ce dossier doit être constitué des pièces suivantes :

1. Un CV détaillé ;
2. Une lettre de motivation décrivant l'intérêt et les souhaits au regard du domaine et du sujet proposés ;
3. Des pièces attestant du niveau de diplôme (obtenu ou en cours d'obtention) ;
4. Tous documents jugés nécessaires dont, en particulier, lettres de recommandation avec coordonnées précises des personnes signataires et présentations 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 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.