

Projet de Chaire de professeur junior :
(En attente de validation définitive)

Jumeaux numériques pour la conduite de procédés alimentaires
et de bioprocédés

Introduction

Le développement rapide des capacités de calcul et l'émergence récente de nouvelles technologies numériques amènent à repenser la façon dont sont conçus et pilotés les procédés alimentaires et les bioprocédés. Le concept de *jumeau numérique* s'inscrit dans cette dynamique : il s'agit de développer une méthodologie et des outils permettant d'intégrer dans une approche holistique l'instrumentation à haut débit, la modélisation, la simulation en temps réel, la commande et l'aide à la décision. La notion de jumeau numérique d'un objet physique est déjà solidement ancrée dans certains domaines industriels, tels que l'aéronautique ou l'automobile, où elle a démontré son utilité, mais les réalisations appliquées au domaine des procédés alimentaires et des bioprocédés restent encore rares à ce jour.

Résumé

Les départements SPAB et MMIP sont co-porteurs de ce projet : SPAB notamment pour les aspects liés à l'instrumentation, à la conduite et à l'optimisation des procédés alimentaires ; MMIP notamment pour les aspects liés à la modélisation, à la simulation, à l'intelligence artificielle et au traitement des données. Ce poste serait fléché vers l'équipe ModIC (Modélisation et Ingénierie par le Calcul) de l'UMR Sayfood, avec de fortes interactions envisagées avec l'UMR MIA Paris-Saclay. Le professeur junior aura comme rôle principal de proposer des stratégies novatrices visant à développer des jumeaux numériques dans le cadre spécifique des procédés alimentaires et des bioprocédés, tout en synchronisant et en fédérant les compétences déjà présentes à APT. Les missions de formation se concentreront d'une part sur la rénovation d'enseignements existants sur la modélisation ou l'intelligence artificielle et d'autre part sur la construction de nouvelles formations liées aux spécificités des jumeaux numériques. Le vivier potentiel est vaste : ingénieurs agro-alimentaires avec une thèse en modélisation, docteurs en mathématiques appliquées ayant travaillé sur les méta-modèles et l'IA, spécialistes des capteurs avec une appétence pour les mathématiques appliquées...

Caractérisation du profil du point de vue Formation

A. Positionnement général des interventions sur le champ de la formation (grandes questions prises en charge et pour quels types de public)

Le département SPAB (Sciences et Procédés des Aliments et Bioproduits) positionne ses activités d'enseignement et de recherche dans la perspective générale des enjeux de la valorisation des ressources agricoles par leur transformation. Ses finalités concernent principalement l'alimentation humaine mais également la transformation des matières premières, les mécanismes et procédés de (bio)transformation et la caractérisation des fonctionnalités des bioproduits.

Le département MMIP (Modélisation Mathématique, Informatique et Physique) s'intéresse à la mise en place de méthodes de modélisation, de traitement et d'analyse de données pour aider à la prise de décision en utilisant des approches issues des mathématiques, de l'informatique et de la physique. La plupart des méthodes développées au sein du département sont centrées sur les données, au sens où elles sont guidées par les données et cherchent à en tirer de la connaissance en proposant notamment des modélisations adaptées.

Les interventions du/de la professeur junior se positionneront à l'interface entre les enseignements proposés par les deux départements : il s'agira de montrer que la simulation numérique, à la fois dans ses acceptions classiques et dans ses alternatives modernes, permet (1) de répondre à des questions que les expériences seules ne peuvent pas traiter ; (2) de comprendre des phénomènes complexes, de les décrire mais aussi de prévoir leur comportement et de les maîtriser ; et enfin (3) de concevoir des outils d'aide à la décision et d'optimisation des procédés, avec comme finalités l'amélioration de la qualité des produits, la sécurité des opérateurs et la sobriété.

B. Etat des lieux des offres d'enseignement existantes à prendre en charge par le lauréat/ la lauréate ou à développer par le lauréat/ la lauréate (par type de formation : public visé, volume horaire, nombre d'étudiants concernés, langue utilisée pour la formation) en distinguant

- une période de cinq années pré-titularisation avec une montée en volume progressive de l'activité d'enseignement (à définir sur la base de 64 heures équivalent TD la première année et une évolution vers un service complet de 192 heures équivalent TD) ;
- une période post-titularisation pour laquelle, notamment, les attendus en termes d'interdisciplinarité, de formation innovante et tournée vers l'international devront être explicités

De nombreuses possibilités s'offrent au/à la professeur junior en matière d'enseignement. Il est souhaitable, initialement, que ses interventions soient concentrées dans des domaines sur lesquels son expertise est la plus grande, avant d'évoluer transversalement et de proposer des interventions sur des sujets plus éloignés de ses compétences initiales. Ainsi, les propositions suivantes ne sont pas classées temporellement ; le profil du candidat retenu permettra *in fine* de les organiser.

- 1) Coordonner une nouvelle UC à choix en 2^{ème} année de cycle ingénieur sur une des thématiques spécifiques des jumeaux numériques, par exemple sur les questions liées aux choix de modélisation.
- 2) Intervenir dans l'UE « Ingénierie par la simulation numérique » où pourront être présentés les jumeaux numériques et quelques thèmes choisis, par exemple ce qui concerne les méta-modèles obtenus à l'aide de réseaux de neurones.
- 3) Proposer une formation sur l'industrie 4.0¹ ou encore sur les problématiques d'optimisation des procédés à l'aide de jumeaux numériques. Ces enseignements pourront être proposés dans le cadre d'une nouvelle offre de Master mais aussi aux étudiants de la dominante Génie des Procédés et Production (GPP) d'APT, du Master *Génie des Procédés et Bioprocédés* (GPB) et du Master international *European Master on Food Studies* (EMFS).
- 4) Participer aux enseignements de la dominante InfOrMation à la Décision par l'Analyse et l'Apprentissage (IODAA) en proposant des cours sur les réseaux de capteurs avec un focus particulier sur le traitement en temps réel des données ou sur l'utilisation de réseaux de neurones pour les méta-modèles.
- 5) Répondre aux besoins en matière de développement de nouveaux enseignements dans les formations ingénieur et master en ce qui concerne la fusion de données hétérogènes, l'optimisation et l'aide à la conduite.

¹ L'industrie 4.0 est caractérisée par une convergence des mondes physiques et numériques à travers l'usage des systèmes cyber-physiques et de l'internet des objets.

Il/elle pourra aussi progressivement s'investir dans les enseignements de tronc commun en Analyse des Systèmes Dynamiques (ASD, 1^{ère} année cycle ingénieur), de Statistiques (1^{ère} ou 2^{ème} année cycle ingénieur), ou d'Informatique (1^{ère} ou 2^{ème} année cycle ingénieur), ou encore dans les cours de Génie Industriel des Aliments et des bioproduits (GIA, 2^{ème} année, D2) ou d'automatique (avec les Master GPB et EMFS ou encore avec les étudiants de la dominante GPP).

Au terme des 5 ans de sa chaire, on attend du/de la professeur qu'il/elle soit partie prenante sur une variété d'enseignements, dont les thèmes balayeront les différents aspects des jumeaux numériques. Il/elle pourra ainsi favoriser les synergies entre les enseignements, pour montrer aux étudiants que les frontières entre les disciplines sont poreuses et que de nombreux problèmes peuvent et doivent être traités en mobilisant des compétences diverses et issues de champs différents. Ce point semble fondamental dans la formation APT, centrée sur l'idée d'ingénieur généraliste, capable de s'adapter à des problèmes variés.

On attend de plus du/de la professeur qu'il/elle soit moteur pour la conception de nouveaux enseignements, voire de nouvelles formations. On peut envisager la création d'un master autour de l'industrie 4.0 qui laissera une part importante aux jumeaux numériques. Idéalement, une telle formation serait dispensée en anglais, à la fois pour attirer des étudiants internationaux et pour renforcer l'offre de formation APT en anglais.

C. Présentation de l'insertion dans les départements, les UFR ou les collectifs d'enseignement

Etant donné la transdisciplinarité du profil attendu, le/la professeur junior ne pourra pas s'inscrire dans un unique UFR ou collectif d'enseignement. Il sera amené à travailler avec les UFR du département MMIP (mathématiques, informatique et physique) et avec le groupe *Génie des procédés et modélisation* du département SPAB (qui n'est pas organisé en UFR). Cette insertion multiple fera écho à son positionnement en matière de recherche, intrinsèquement transversal.

Selon son profil, le/la professeur junior prendra en charge des enseignements existants, dans une logique de répartition collégiale au sein des groupes. La personne recrutée participera activement à la modernisation en cours de ces enseignements, en proposant de nouvelles formes pédagogiques adaptées à l'évolution des publics étudiants et en renforçant la place des outils numériques et des logiciels libres. Il/elle sera force de proposition pour de nouveaux modules d'enseignement dans ses thématiques de recrutement. En effet, la notion de jumeau numérique est appelée à prendre une place croissante dans l'usine de demain et il paraît important de familiariser les différents publics d'étudiants APT (élèves ingénieurs, masters, doctorants) avec ce concept.

Des unités d'enseignement à choix sur la modélisation et l'optimisation de (bio) procédés, construites avec des chercheurs de l'UMR MIA Paris-Saclay, ont déjà été proposées avec succès aux étudiants APT. Or, des modèles basés sur des techniques d'intelligence artificielle permettent des simulations très rapides particulièrement intéressantes pour une utilisation temps réel dans le cadre de jumeaux numériques. Le/la professeur junior profitera de son statut transversal au sein des départements pour maintenir et intensifier ces collaborations permettant aux étudiants de bénéficier d'enseignements au plus proche des activités de recherche.

Par ailleurs, le/la professeur junior sera invité(e) à s'impliquer dans la vie collective en participant aux différentes instances, commissions et groupes de travail des départements, de l'UMR et de l'établissement.

Caractérisation du profil du point de vue Recherche

A. Problématique générale de recherche pluridisciplinaire, ancrage(s) disciplinaire(s), lien à la stratégie des départements, de l'unité d'accueil et de l'établissement, plus-value pour AgroParisTech

L'émergence récente des nouvelles technologies de l'information offre des opportunités inédites aux industries utilisant des procédés et des bioprocédés. Les « doubles » ou « jumeaux » numériques des objets réels (ici, opérations unitaires, ateliers, usines) permettent d'intégrer de grands volumes de données issus de capteurs et d'outils analytiques afin de réaliser en temps réel diagnostic, prédiction, optimisation et conduite du procédé suivi.

Le concept de jumeau numérique d'un objet physique est déjà solidement ancré dans certains domaines industriels, tels que l'aéronautique ou l'automobile, où il a démontré son utilité. Un jumeau numérique est un « double » virtuel d'un objet naturel ou industriel, intimement connecté via des systèmes d'échanges de données avec celui-ci. Les principaux verrous dans la conception de jumeaux numériques résident dans le développement des éléments suivants :

- Un réseau de capteurs haut débit pour mesurer les grandeurs essentielles liées aux matières premières, au produit fini, aux conditions opératoires du procédé et de son environnement.
- Une plateforme pour stocker les données et connecter ces capteurs, des actionneurs, les modèles et les applications d'interface avec les opérateurs et les managers.
- Un outil numérique haute performance qui permet en temps réel d'optimiser l'exploitation, de former les opérateurs, de faciliter le diagnostic, d'aider à la maintenance prédictive et à la prise de décisions dans un environnement complexe et multicritère.

Les réalisations concrètes dans les industries alimentaires et des bioprocédés sont encore rares, mais plusieurs équipes de recherche reconnues (Université de Leuven en Belgique, Université de Wageningen aux Pays-Bas, Université de Cornell aux Etats-Unis) se positionnent résolument sur le sujet. L'usine de demain, sobre et flexible, devra nécessairement établir des passerelles entre le monde numérique (IA, big data...) et le domaine des procédés dont les outils et méthodes traditionnelles devront évoluer pour inclure les concepts issus de ces disciplines.

Les thèmes de recherche abordés sont donc variés, allant de l'instrumentation à l'intelligence artificielle en passant par la modélisation, l'automatique, le traitement de données et la visualisation, avec les contraintes spécifiques amenées par les applications souhaitées aux procédés agroalimentaires et aux bioprocédés. Ces thématiques recouvrent les problématiques d'intérêt des départements SPAB et MMIP. Elles s'intégreront naturellement au sein de l'UMR Sayfood et pourront amener à des collaborations avec l'UMR MIA Paris-Saclay. Pour APT, le/la professeur junior constituera un élément fédérant deux départements sur un projet commun ambitieux. Il/elle agira aussi comme une vitrine auprès du monde industriel et des universités nationales et internationales en devenant une référence sur le thème des jumeaux numériques. Ainsi, il confirmera le rôle moteur exercé par APT sur des questions scientifiques de pointe en matière d'agro-industrie.

B. État des lieux de la recherche à AgroParisTech sur la problématique justifiant l'accompagnement renforcé (charge d'enseignement allégée et aide financière pour coordonner un programme doctoral ou post-doctoral) du nouveau recruté/de la nouvelle recrutée offert par le dispositif CPI

Outre les difficultés intrinsèques à la réalisation individuelle des éléments constitutifs d'un jumeau numérique, un des verrous scientifiques principaux à leur développement est la nécessité de conjuguer des compétences issues de nombreuses disciplines (informatique, mathématiques, physique, génie des procédés, biologie...) à travers un large spectre de savoir-faire (allant par exemple de la conception et de l'instrumentation des opérations unitaires à la création de méta-modèles générés par IA et à la visualisation 3D). La conception d'un jumeau numérique constitue donc un projet transdisciplinaire ; elle nécessite un porteur capable à la fois d'interagir avec des experts issus de champs variés mais aussi d'apporter la vision, la compréhension et l'esprit de synthèse qui permettra au jumeau numérique de voir le jour.

Le poste proposé s'inscrit dans ce contexte. Il vise à renforcer la capacité d'AgroParisTech à répondre à un enjeu prometteur de modernisation des industries des procédés dans le cadre de l'industrie 4.0 pour des performances accrues en termes technico-économiques mais également de flexibilité, de sécurité et de sobriété. L'originalité et la spécificité du poste résident notamment dans la conception des modèles non seulement pour la compréhension des phénomènes, le dimensionnement et l'ingénierie de procédés, mais surtout pour une utilisation de ces modèles dans

une configuration juste-à-temps afin de fournir aux opérateurs et aux décideurs un tableau complet des performances, points d'attention, alarmes, pistes d'optimisation, prédiction de la qualité du produit.

C. Etat des lieux des équipes de recherche nationales et internationales travaillant sur la problématique et positionnement du poste dans cet ensemble

Le génie des procédés alimentaires est l'ensemble des méthodes et techniques mises en œuvre pour dimensionner et optimiser les conditions opératoires des procédés utilisés pour transformer les produits et ingrédients d'origine biologique. Cette discipline intéresse de longue date les enseignants-chercheurs d'AgroParisTech. La modélisation mécanistique (initée dans le domaine du génie chimique puis déployée dans le domaine des bio-industries) puis la simulation numérique infléchissent de plus en plus nettement les évolutions de la discipline. L'implémentation d'approches multi-échelles, multiphasiques et multiphysiques a permis le développement de modèles qui nous permettent de formaliser, capitaliser et valoriser les données acquises expérimentalement, tout en accompagnant et guidant la démarche la conception (design) de produits et des procédés eux-mêmes. Le niveau de réalisme atteint par un modèle physique basé sur la résolution numérique d'un certain nombre d'équations aux dérivées partielles est, nous le savons, directement lié aux coûts de calcul (mémoire et temps) ; ce coût rendant les modèles très réalistes difficilement utilisables lors d'applications d'ingénierie et d'optimisation à base de modèle et encore moins pour des applications en temps réel.

Des études récentes publiées par des collectifs experts reconnus (par ex. Verboven *et al.*, 2020, *Current Opinion in Food Science*²; Datta *et al.*, 2022, *Nature Food*³) soulignent l'intérêt des jumeaux numériques pour la transformation de produits alimentaires, c'est-à-dire des répliques numériques prédictives d'un ou de plusieurs procédés de transformation. Les modèles développés sont actualisés avec l'assimilation de données obtenues en temps réel pendant l'opération, rendant possible l'optimisation et le pilotage de l'opération. L'implémentation de telles répliques numériques ne serait possible qu'en employant des outils numériques très performants à la fois pour le calcul du problème direct (modélisation des phénomènes) que pour l'analyse et l'assimilation de données collectées en temps réel pour proposer une rétroaction efficace (problème inverse). De telles techniques se développent actuellement en utilisant les nouvelles possibilités offertes par les réseaux de neurones (Em Karniadakis *et al.*, 2021, *Nature Physics*⁴). D'après Verboven *et al.*, (2020)², la faisabilité et les apports de cette démarche, pour prometteuse qu'elle le soit, restent à démontrer pour les procédés alimentaires. Les efforts en cours sont néanmoins nombreux, comme l'atteste la longue liste de références présentée par Datta *et al.* (2022)³.

Dans les domaines traditionnellement en pointe pour l'utilisation des outils numériques (mécanique, électronique, aéronautique, automobile...), les réalisations sont effectivement nombreuses, y compris dans le périmètre de l'université Paris-Saclay, par exemple au Laboratoire de mécanique Paris-Saclay (ex-Université Paris Sud, CentraleSupélec, ENS, CNRS). En revanche, les réalisations concrètes dans les industries alimentaires et des bioprocédés sont encore rares bien que plusieurs équipes de recherche reconnues (par exemple Université de Leuven en Belgique, Université de Wageningen aux Pays-Bas, Université de Cornell aux Etats-Unis) affichent de programmes ambitieux dans le domaine. Enfin, quelques travaux récents démontrent la faisabilité de cette approche pour les produits alimentaires (Cabeza-Gil *et al.*, 2023, *Journal of Food Engineering*)⁵.

Au vu du contexte disciplinaire international, il nous paraît donc très opportun de positionner ce poste non seulement dans le domaine de la modélisation des procédés mais plus particulièrement dans la thématique des jumeaux numériques. Les compétences en génie de procédés alimentaires et en modélisation présentes dans l'UMR SayFood permettent de prioriser les phénomènes en jeu au sein d'une ou plusieurs opérations unitaires et le/la professeur junior contribuerait à bâtir un modèle à la fois réaliste et capable de respecter le cahier de charges imposé par les contraintes technologiques d'utilisation en temps réel. L'UMR SayFood serait ainsi en mesure d'entamer sa trajectoire vers l'utilisation de modèles conçus dans une logique de jumeaux numériques.

² Verboven *et al.* 2020, *Digital twins of food process operations: the next step for food process models?* *Current Opinion in Food Science*, doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.002

³ Datta *et al.* 2022, *Computer-aided food engineering*, *Nature Food*, doi.org/10.1038/s43016-022-00617-5

⁴ Em Karniadakis *et al.* 2021, *Physics-informed machine learning*, *Nature Physics*, <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>

⁵ Cabeza-Gil *et al.* 2023, *Digital twins for monitoring and predicting the cooking of food products : A case study for a French crêpe*, *Journal of Food Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111697>

D. Présentation de l'insertion dans l'unité d'accueil

Le(a) professeur junior recruté(e) sera rattaché(e) à l'équipe ModIC (Modélisation et ingénierie par le calcul) de l'UMR SayFood. Cette équipe compte actuellement 12 permanents (chercheurs INRAE, ingénieur de recherche et enseignants-chercheurs AgroParisTech des départements MMIP et SPAB) et une dizaine de doctorants. Elle développe une expertise dans la représentation des phénomènes ayant lieu lors de la transformation de produits d'origine biologiques et travaille en interaction avec l'ensemble de l'UMR.

Le(a) professeur junior recruté(e) s'insérera dans les thématiques présentes dans l'équipe ModIC, afin de profiter de l'expertise et du réseau de collaborations des chercheurs confirmés, tout en étant force de proposition pour développer les thèmes de recherche liés à l'utilisation temps réel des modèles, en continuant et en initiant des collaborations pertinentes avec les autres équipes et des laboratoires français et étrangers.

Un travail de fond est nécessaire pour rendre les modèles mécanistiques, réalistes mais lourds, compatibles avec les contraintes de temps réel. Cela peut passer par le développement de méta-modèles en utilisant notamment des techniques issues de l'intelligence artificielle (fouille de données, deep learning...). A cette fin, une synergie avec l'UMR MIA Paris-Saclay sera à construire, notamment sur les aspects traitement des données (avec l'équipe Solstis) et intelligence artificielle (avec l'équipe Ekinocs).

E. Programme de recherche possible lors de la période de pré-titularisation, potentiels projets à mettre en œuvre à plus long terme

Les activités du professeur junior seront orientées vers le développement de modèles, de capteurs et d'outils d'aide à la décision dans la perspective unifiée de création de jumeaux numériques. Dans ce cadre, il/elle pourra s'intéresser aux points suivants. L'ordre dans lequel ils seront traités dépendra des compétences apportées par le/la candidat(e).

- Participer à la conception, à l'instrumentation et à la commande de procédés, en tenant compte des contraintes fortes des jumeaux numériques. Par exemple, les besoins liés à la simulation et à l'aide à la décision impliquent l'intégration d'un réseau de capteurs et d'actionneurs dans un procédé, ce qui pose différents défis. D'une part, des problèmes émergent en termes d'acquisition, de stockage et de traitement des données. Ces difficultés amènent à envisager le développement d'une plateforme numérique capable de gérer le flux important de données et de l'exploiter efficacement. D'autre part, l'existence de ce réseau a aussi des conséquences en amont sur la conception du procédé, et en aval sur sa commande. En particulier, les spécificités des procédés alimentaires, notamment en matière de contact alimentaire, restreignent fortement les possibilités de positionnement des capteurs ainsi que le type de capteurs utilisables. Tout le processus de conception d'un procédé doit donc être repensé et adapté dès le départ pour s'accorder aux besoins du jumeau numérique. Enfin, les stratégies habituelles d'asservissement doivent être rendues compatibles avec la grande quantité de données disponibles et le type de modèles utilisés. Ceci implique de développer de nouvelles lois de commande mais aussi probablement de repenser les conditions de stabilité et de robustesse utilisées traditionnellement pour garantir les performances des systèmes. Ces activités pourront se faire en lien avec le département SPAB et avec l'équipe Halle de l'UMR Sayfood.

- Développer de nouveaux modèles de procédés alimentaires et de bioprocédés, qui s'attacheront à être à la fois descriptifs des dynamiques complexes, multi-échelles et couplées des phénomènes modélisés, mais qui seront aussi exploitables par la suite dans un jumeau numérique. En effet, il existe deux grandes familles de modèles largement utilisés aujourd'hui. D'une part, certaines méthodes de modélisation font usage d'équations aux dérivées partielles issues de la physique et de la chimie. Les modèles ainsi obtenus ont des capacités prédictives bien connues, mais nécessitent des ressources importantes en termes de simulation. Ceci se traduit par des temps de calcul relativement longs qui rendent ces modèles inutilisables en temps réel. D'autre part, des modèles simplifiés et bien plus légers existent, par exemple des modèles compartimentaux, mais leurs capacités prédictives sont souvent beaucoup plus limitées et cela limite leur usage à des contextes très spécifiques. Ainsi, obtenir un modèle bien adapté à la finalité du jumeau numérique implique des choix spécifiques en termes de modélisation, pour réussir un compromis entre la généralité des capacités prédictives d'une part et la facilité à être simulé en temps réel d'autre part. Ces activités pourront se faire en lien avec le département SPAB et avec l'équipe ModIC de l'UMR Sayfood.

- Etudier mathématiquement les modèles et concevoir des méta-modèles. Cette activité, complémentaire du point précédent, vise à utiliser des méthodes mathématiques et informatiques pour alléger les modèles tout en conservant leurs capacités prédictives. On pourra ici envisager l'usage de techniques de réduction de modèles (réduction de dimension, analyse entrée-sortie, perturbations singulières...) ou bien de développement de méta-

Version de travail avant ouverture potentielle du poste

modèles, notamment basés sur les réseaux de neurones. Cette stratégie, que l'on peut rassembler avec l'arsenal fourni par le champ de l'intelligence artificielle, se propose de fournir des solutions novatrices pour réussir le compromis évoqué précédemment entre capacités prédictives et rapidité de simulation. Elle a déjà été utilisée dans d'autres domaines d'applications avec succès et peut donc constituer une piste intéressante pour les procédés alimentaires et les bioprocédés. Ces activités pourront se faire en lien avec le département MMIP, avec l'équipe ModIC de l'UMR Sayfood et avec l'équipe Ekinocs de l'UMR MIA.

- Concevoir un outil d'aide à la décision, incluant les aspects gestion et traitement des données, simulation, visualisation 3D et optimisation multicritère. Il s'agirait ici de trouver les outils adaptés lorsqu'ils existent ou plus vraisemblablement de développer de nouveaux outils numériques regroupant ces différentes facettes du jumeau numérique. Le traitement des données s'attachera aux caractéristiques spécifiques de celles-ci, par exemple leur obtention en temps réel, leur caractère fortement hétérogène (à la fois en termes de grandeur physique, de fréquence de mesure ou d'incertitude associée) ou encore le besoin de les inclure dans des modèles dynamiques pour générer en retour des données de simulation qui seront ensuite elles-mêmes utilisées pour la visualisation et la commande. Ces considérations nécessiteront l'usage de techniques à l'interface entre les statistiques et l'informatique. La visualisation s'attachera à proposer aux utilisateurs un cadre ergonomique permettant de suivre efficacement le déroulement du procédé, d'appliquer les ajustements nécessaires au moment opportun et d'éclairer les choix dans la conduite du procédé en vue de son optimisation. Ces activités pourront se faire en lien avec le département MMIP, avec l'équipe ModIC de l'UMR Sayfood et avec les équipes Solstis et Ekinocs de l'UMR MIA.

Enfin, il est attendu du/de la professeur junior qu'il/elle s'intéresse aux synergies possibles avec les autres équipes du plateau de Saclay, par exemple au travers des plateformes constituées par les graduate schools Sciences de l'Ingénieur, Mathématiques ou Informatique.

F. Lien entre les activités de recherche et les activités de formation

Les activités de recherche et de formation sont traditionnellement entremêlées dans le cadre des stages ou simplement des visites en laboratoire de recherche ou de la formation par la recherche des doctorants. On attendra cependant du/de la professeur junior qu'il participe de manière plus prégnante à ce lien.

Pour cela, il/elle pourra concevoir une formation doctorale autour du thème des jumeaux numériques. Cette formation pourra compléter judicieusement les formations déjà proposées sur les thèmes connexes de la modélisation et de l'estimation de paramètres et ainsi s'inscrire dans la dynamique de formation aux outils méthodologiques impulsée par l'équipe ModIC. Il/elle pourra aussi s'investir dans le programme *La recherche et moi* auprès des étudiants en 1^{ère} année d'APT pour sensibiliser le plus tôt possible les étudiants au monde de la recherche. Enfin, on peut envisager la conception d'un démonstrateur de jumeau numérique, au format pilote, qui pourrait être installé dans la halle industrielle. Il aurait pour vocation à la fois d'expérimenter les modèles ou les techniques développées dans le cadre des travaux de recherche mais aussi de proposer un exemple concret permettant aux étudiants d'être exposés aux jumeaux numériques et de s'imprégner de leur fonctionnement et de leurs atouts pour mieux les porter ensuite dans le monde industriel.

Vivier potentiel de recrutement

On peut envisager les profils suivants de recrutement (liste non exhaustive) :

- ingénieur agro-alimentaire avec une thèse en modélisation
- mathématicien ayant travaillé sur l'optimisation, les méta-modèles et l'IA
- spécialiste des capteurs avec une appétence pour les mathématiques appliquées
- automaticien avec une expérience forte du génie des procédés alimentaires ou des bioprocédés

Le caractère très transversal des jumeaux numériques demande des profils particuliers, et le/la professeur recruté(e) aura besoin d'investir initialement beaucoup de temps et de ressources pour construire le réseau et l'environnement de recherche nécessaires à la réalisation du projet, ce qui justifie de faire appel à la structure des CPJ.

Contact

Emmanuel Bernuau (emmanuel.bernuau@agroparistech.fr)