

## HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Date de la soutenance : **23 février 2024**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **Monsieur HENRY Sébastien**

Titre des travaux : « *De l'estimation d'état de systèmes à événements discrets au jumeau numérique, développement d'outils d'aide à la décision* »

### Résumé



La problématique scientifique de cette HDR est centrée sur l'estimation d'état de systèmes à événements discrets appliquée aux systèmes de production. Dans un monde idéal en imaginant disposer d'une estimation extrêmement précise à chaque instant, les systèmes de production auraient d'une part des performances exceptionnelles avec des indicateurs proche des 100% grâce à une anticipation de tous les aléas à venir et d'autre part une capacité d'adaptation extrêmement rapide face à l'évolution des produits à fabriquer et de leur environnement. Mais, les systèmes de production sont des systèmes complexes dont les modèles actuels reproduisent partiellement leur comportement réel et dont l'observation reste très partielle. Le facteur humain est certainement non négligeable mais il existe d'innombrables autres facteurs de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. En effet à ces différentes échelles, les modèles sont le plus souvent disjoints ne permettant pas de refléter les interactions entre ces échelles. Afin de positionner cette problématique scientifique au regard de l'état de l'art, ce mémoire introduit en premier lieu le concept de système à événements discrets. Avant de décliner ce concept aux systèmes de production, les caractéristiques de ces derniers sont identifiées au travers de la quatrième révolution industrielle que nous vivons. Un état de l'art sur la modélisation des systèmes cyber-physique de production (CPPS - Cyber-Physical production System) et les limites actuelles pour les usages souhaités finit de positionner la problématique scientifique.

Une vision d'ensemble des résultats scientifiques est ensuite apportée avec une classification des travaux basée sur quatre critères. Le premier critère concerne l'approche et la méthodologie de construction des modèles. Le second critère est relatif aux éléments dont l'état est modélisé et considéré comme données d'entrée pour l'estimation. Les éléments dont nous cherchons à estimer l'état constitue le troisième critère. Enfin, l'horizon temporel associé à la fonction visée (détection, diagnostic ou pronostic) forme le quatrième critère. Sur la base de ces critères, la classification amène à identifier trois classes principales. La première concerne l'estimation d'état présent d'un système cyber. L'estimation d'état passé et présent d'un système physique constitue la deuxième classe. Enfin, l'estimation d'état futur d'un système physique forme la troisième et dernière classe. Après cette classification, les travaux associés à chaque classe sont présentés avec le même schéma : besoin industriel, problématique scientifique, résultats obtenus et enfin perspectives.

Le projet scientifique vise à développer une approche de conception et de calibration du jumeaux numériques de systèmes de production. Avant de détailler ce dernier, le concept de jumeau numérique est d'abord discuté en veillant à mettre en exergue les caractéristiques principales. La première d'entre elle qui est fondamentale est la notion indissociable de gestion du cycle de vie du concept de jumeau numérique. Tous les secteurs étant

désormais concernés par ce concept de jumeau numérique, de l'énergie à la santé jusqu'aux transports et aux bâtiments, sa déclinaison aux systèmes cyber physique de production est débattue en considérant : les particularités des CPPS, le coût et le bénéfice d'un jumeau numérique au regard du cycle de vie du CPPS, les différents niveaux à considérer et enfin la place de l'humain dans un jumeau numérique. De cette discussion émerge le projet scientifique vers une approche centrée ingénierie système et encapsulation pour concevoir un jumeau numérique multi-échelles et multi-physiques. Ce projet est consolidé en considérant les similitudes entre le cycle de vie d'un bâtiment et un CPPS. De ce rapprochement, une approche de co-construction des jumeaux numériques est proposée à partir du partage de données entre acteurs dans un contexte d'industrie 4.0 où l'accès sécurisé aux données des différents acteurs industriels sera extrêmement simple. Enfin face à l'urgence climatique, cette dimension est intégrée au projet scientifique.