

# Systèmes cyber-physiques et jumeaux numériques, déclencheurs et conditions d'une adoption accélérée

Par Pascal BROSSET  
Accenture

Le terme de systèmes cyber-physiques (SCP), apparu à la même époque que l'Industrie 4.0, a été l'objet d'une abondante littérature académique en décrivant le potentiel dans des domaines d'application allant de l'industrie à la santé. Pour rappel, le terme a été introduit en 2006 par le Dr Helen Gill de la National Science Foundation (NSF) aux États-Unis. Ce concept a été développé pour décrire l'intégration de l'informatique avec les processus physiques, où des systèmes embarqués et des réseaux surveillent et contrôlent les processus physiques, généralement avec des boucles de rétroaction où les processus physiques affectent les calculs et *vice versa*.

La convergence de facteurs socio-économiques et du progrès en termes d'intelligence artificielle crée une accélération dans l'adoption des SCP, souvent confondus avec les jumeaux numériques. Cet article explore, du point de vue des industriels, les raisons de cette accélération et ses implications.

L'un étant le pendant virtuel de l'autre, les jumeaux numériques et les systèmes cyber-physiques sont indissociables, surtout dans le domaine des opérations. C'est pourquoi le deuxième terme est aujourd'hui beaucoup plus utilisé par les industriels et nous l'utiliserons aussi dans cet article qui adopte résolument ce point de vue pratique.

Encore relégué au rang de concept il y a encore moins de 10 ans, avec autant d'interprétations que de directeurs industriels, les jumeaux numériques sont maintenant acceptés comme la fondation conceptuelle et technique de toute stratégie ambitieuse de digitalisation des opérations dans l'industrie. Un jumeau numérique opérationnel est aujourd'hui généralement compris comme un modèle (sémantique) complet des opérations en représentant tant la dimension physique que procédé. Ce modèle permet d'évaluer en quasi temps réel tout événement opérationnel avéré ou anticipé, allant de la dérive d'un paramètre de processus à l'annulation d'une commande, par rapport à l'état de l'ensemble des opérations. Cette évaluation contextualisée permet la décision, humaine ou automatisée d'actions correctives minimisant l'impact sur la performance. La généralisation des jumeaux numériques opérationnels permet donc d'envisager des usines dites autonomes, c'est-à-dire capables d'anticiper et de s'adapter en continu et de façon optimale aux inévitables variations de leur environnement. C'est pourquoi McKinsey estime que le lien entre les mondes physique et numérique, facilité par les jumeaux numériques, pourrait générer jusqu'à 11,1 trillions USD par an en valeur économique d'ici 2025. Cet impact inclut des secteurs tels que l'aérospatiale, la défense, l'industrie manufacturière et les biens de consommation courante.

Dans cet article, nous proposons d'explorer les raisons de cette évolution et de son accélération récente, ses implications pour l'industrie afin que cette accélération génère effectivement les résultats escomptés.

## FACTEURS D'ACCÉLÉRATION SOCIO-ÉCONOMIQUES

### Rareté des talents

Suite au changement de génération en cours dans l'industrie, et pour des raisons sans doute liées au système éducatif, les industriels font face à une difficulté croissante et devenant critique à recruter de nouveaux talents, des opérateurs aux ingénieurs de production. L'expertise tacite qui, encore aujourd'hui « fait tourner » les usines n'est plus transmise et doit être formalisée et même modélisée. Par leur capacité à intégrer des données hétérogènes pour modéliser les opérations et intégrer des logiques d'apprentissage, les jumeaux numériques permettent cette formalisation.

Corollairement, la notion d'usine autonome<sup>1</sup>, jusqu'alors objectif théorique et lointain, devient donc un impératif à moyen terme pour de nombreux responsables industriels dans la plupart des secteurs industriels.

### Montée des exigences

Entre le niveau d'automatisation des usines et le déploiement de programmes d'excellence industrielle, les *leaders* des différentes industries ont atteint des niveaux de performance élevés au niveau de chaque équipement ou d'ilots de fabrication. Les prochaines opportunités sont généralement liées à des problèmes de type qualité, économies d'énergie ou adaptation à la demande qui demandent de maîtriser les opérations dans leur ensemble. Là encore, la puissance et flexibilité des jumeaux numériques, liées comme nous le verrons à l'essor de l'IA, les rendent incontournables pour l'optimisation multicritères d'une usine intégrée.

## FACTEURS D'ACCÉLÉRATION TECHNOLOGIQUE

La concurrence de ces exigences nouvelles et l'arrivée à maturité de technologies sous-jacentes créent les conditions d'une adoption accélérée des jumeaux numériques dans les 5-10 prochaines années.

### Adoption croissante de l'ingénierie systèmes

Une des conditions à la généralisation des jumeaux numériques est, de façon évidente, la capacité à les modéliser, et ce de façon modulaire. La montée en puissance de l'ingénierie systèmes (*model-based system engineering*<sup>2</sup>) initialement liée à la complexité croissante

---

<sup>1</sup> Une usine autonome est une installation de production où les processus de fabrication sont largement automatisés et contrôlés par des systèmes cyber-physiques sans intervention humaine directe. Ces usines utilisent des technologies avancées telles que l'Intelligence artificielle (IA), l'Internet des objets (IoT), la robotique, l'apprentissage automatique et les jumeaux numériques pour optimiser les opérations et la prise de décision en temps réel.

<sup>2</sup> Le *model-based systems engineering* (MBSE) est une méthode d'ingénierie qui repose sur la création et l'utilisation de modèles numériques tout au long du cycle de vie du système pour soutenir les activités de conception, d'analyse, de vérification et de validation. Contrairement aux méthodes traditionnelles basées sur des documents, la MBSE utilise des représentations formelles pour améliorer la compréhension, la communication et la gestion des systèmes complexes.

des produits et systèmes (mécanique > électronique > numérique > connecté) a naturellement conduit à son extension vers la conception des moyens de production. Les suites intégrées d'éditeurs tels que Dassault Systems permettent aujourd'hui la conception, simulation et validation concurrente du produit et de son système de production.

Les systèmes de production modernes, généralement adéquatement instrumentés, sont donc conçus comme ces SCP.

## Évolution des architectures industrielles

La deuxième condition de généralisation est la possibilité, non seulement d'acquérir et intégrer un grand nombre de paramètres, mais également de les analyser en temps réel pour détecter les variations correspondant à des événements significatifs par rapport au bruit de fond, et finalement de permettre leur évaluation instantanée dans le contexte du jumeau numérique.

Ce besoin combiné d'instantanéité et de puissance est aujourd'hui bien supporté par les architectures hybrides de type *cloud and edge*<sup>3</sup>, combinant une capacité de calcul locale (*edge*) et la puissance du *cloud* dans une architecture basée événements à faible latence. À titre d'illustration, un événement généré par le premier niveau d'analyse sur un serveur local peut être évalué dans le *cloud* et déclencher un changement de consigne transmis au système de contrôle en moins d'une seconde.

Il ne s'agit bien entendu pas de remplacer ledit système de contrôle, mais de le compléter pour adresser des dérives, par exemple de qualité, qui demandent à être résolues dans un contexte bien plus vaste que celui de la machine sous le contrôle dudit système.

## Pénétration croissante de l'IA et *machine learning*

L'évaluation et résolution de dérives dans un contexte étendu à l'ensemble de l'usine se prête particulièrement bien au *machine learning* (ML<sup>4</sup>), pour peu que les données nécessaires soient disponibles de façon fiable et structurée. Pour le développement de logiques d'évaluation, il est typique de passer 80 % du temps et des ressources à structurer les données et 20 % au développement algorithmique.

Par la rigueur qu'ils amènent naturellement dans la gestion et structuration des données industrielles, les jumeaux numériques accélèrent le développement d'algorithmes de ML qui sont progressivement intégrés dans ceux-ci pour la détection et prédiction d'anomalies et le support à la décision. Cette intégration confère aux jumeaux numériques des capacités d'auto-apprentissage, d'adaptation à l'environnement et d'amélioration de performance.

Jumeaux numériques et IA sont donc indissociables et c'est leur association qui accélère, du point de vue technique, leur adoption dans l'industrie. L'émergence de l'IA générative va amplifier le phénomène.

---

<sup>3</sup> *L'edge computing* consiste à décentraliser le traitement des données, en rapprochant les capacités de calcul et de stockage des dispositifs générant les données, tels que les capteurs IoT, les appareils mobiles, ou les systèmes embarqués. Cette approche réduit la latence, améliore la bande passante et permet une prise de décision plus rapide en analysant les données localement.

<sup>4</sup> Le *machine learning* (apprentissage automatique) est une sous-discipline de l'intelligence artificielle (IA) qui se concentre sur le développement de systèmes capables d'apprendre et de s'améliorer automatiquement à partir de l'expérience et des données sans être explicitement programmés pour chaque tâche.

### *Interface en langage naturel*

Même s'il est grandement facilité par la structure en graphe, l'accès à l'expertise formalisée par un jumeau numérique peut rester complexe pour l'utilisateur moyen. Cette même structure permet par contre d'utiliser les *large language models* (LLM<sup>5</sup>) pour accéder en langage naturel à cette expertise. Cette capacité est aujourd'hui démontrable et en cours de validation par certains industriels.

Ces mêmes LLMs permettent par ailleurs d'enrichir le jumeau numérique avec la vaste base de documents non structurés, rapports, manuels et même photos, qui sont disponibles mais mal exploités dans les intranets des entreprises. À terme, même si cet usage n'en est encore qu'au stade de l'expérimentation, ce mode conversationnel d'accès permettra également de formaliser l'expertise tacite d'experts et d'en personnaliser l'accès en fonction du niveau d'expertise de l'opérateur y faisant appel.

### *Prototypage rapide*

De même que l'IA générative permet de générer automatiquement des programmes informatiques, elle permet aussi d'accélérer le développement de cas d'usage basés sur le jumeau numérique. Une application simple, déjà disponible aujourd'hui, permet de générer des rapports complexes grâce à des interrogations successives, puis de transformer ces rapports en code exécutable qui sera déclenché en réaction à un événement, fournissant ainsi instantanément le contexte nécessaire à la prise de décision afférente.

Une autre utilisation, de nouveau déjà explorée pour le développement d'applications classiques, est la génération automatique de tests et jeux de données de validation, phase essentielle du déploiement opérationnel de cas d'usage pouvant impacter la sécurité, qualité ou performance des opérations. Outre la validation, cette même capacité de génération de jeux de données synthétiques est utilisée pour l'entraînement d'algorithmes de ML, par exemple pour les systèmes de vision artificielle de plus en plus utilisés pour le contrôle en ligne de procédés complexes.

### *Capacités de simulation*

L'IA générative est utilisée aujourd'hui pour optimiser la conception de produits, par génération de milliers de prototypes, et cette approche peut aussi être utilisée pour simuler différentes configurations de machines/lignes/usines et flux de produits pour identifier les paramètres qui minimisent les temps d'arrêt et maximisent l'efficacité.

### Environnements synthétiques de simulation

Une autre conséquence de la difficulté à recruter des opérateurs est un intérêt grandissant pour les robots homomorphiques capables de remplacer ceux-ci sans modification de l'environnement de travail. Ceci demandera une capacité d'apprentissage non seulement des modes opératoires, mais également de l'insertion dans un environnement non dédié. Cet apprentissage ne sera possible que dans des environnements virtuels/synthétiques qui seront aussi utilisés pour augmenter la définition et fidélité de simulations mettant en jeu, par exemple, une automatisation poussée des flux physiques par des flottes de chariots autonomes.

Plus proche de nous, les simulations générées par IA sur la base d'un jumeau numérique peuvent être utilisées pour former les opérateurs dans un environnement virtuel, sans risque pour leur sécurité. Ces simulations peuvent reproduire des scénarios dangereux

---

<sup>5</sup> Un *large language model* (LLM) est un type avancé de modèle d'apprentissage automatique spécifiquement conçu pour comprendre et générer du langage naturel. Ces modèles sont caractérisés par leur grande taille, mesurée par le nombre de paramètres qu'ils contiennent, et leur capacité à traiter de grandes quantités de texte pour réaliser diverses tâches linguistiques.



ou complexes, permettant aux travailleurs d'acquérir de l'expérience et des compétences en toute sécurité.

### Moteurs génériques de simulation

Ces mêmes capacités de simulation utilisées pour la conception des lignes de production doivent aussi être utilisables lors du fonctionnement de l'usine, par exemple pour reconfigurer les flux internes suite à un changement du planning de production. Les moteurs actuels reposant sur des algorithmes de type événements discrets seront complétés dans certains cas par la même approche de génération et évaluation de scénarios. Cette approche sera grandement facilitée par des moteurs génériques qui peuvent être combinés dans un des environnements de simulation susmentionnés.

### Modèles cognitifs et systèmes adaptatifs

Comme mentionné ci-dessus, les jumeaux numériques permettront la formalisation progressive de savoir-faire tacites de gestion des opérations. Qu'en est-il des opérations manuelles qui resteront impossibles à automatiser, comme les assemblages complexes en petite série ?

L'IA générative doit permettre d'analyser les opérations, par exemple *via* des caméras analysant les mouvements des opérateurs, en extraire des séquences type et intervenir ensuite de façon ponctuelle pour guider ou valider l'assemblage des prochains produits du même type. Cette technique est d'ailleurs envisagée pour réduire les risques en salle d'opération en levant potentiellement des alarmes à destination du chirurgien.

Cette approche pose bien entendu des questions importantes de confidentialité mais, moyennant l'explication transparente des mécanismes d'anonymisation mis en place, ces mentors virtuels peuvent se généraliser.

## IMPLICATIONS POUR L'INDUSTRIE

Les investissements consentis ces cinq dernières années par les géants du cloud et leurs partenaires font que la technologie est largement disponible pour supporter l'évolution vers des architectures industrielles tirant pleinement parti de jumeaux numériques. Par contre, ceci n'est pas une condition suffisante pour que l'adoption soit généralisée et génératrice de valeur. Cette adoption généralisée demandera des approches collaboratives tant au niveau des secteurs industriels que des entreprises elles-mêmes.

### **Émergence de standards d'interopérabilité et collaboration**

La création d'un jumeau numérique complet d'une usine demande d'agréger un volume considérable de données venant de dizaines de sources internes et externes à l'entreprise. Il est donc indispensable qu'émergent des standards de définition et d'interopérabilité de jumeaux numériques. À terme, tout équipement devra être fourni avec son jumeau numérique prêt à être intégré dans celui de la ligne et de l'usine.

C'est l'objectif du standard *Asset Administration Shell* (AAS) proposé par l'Industrial Digital Twin Association (IDTA), en collaboration avec d'autres organismes normatifs, visant à standardiser la manière dont les informations sont gérées et échangées entre les actifs (machines, dispositifs, systèmes) dans un environnement industriel. Les objectifs de l'AAS sont parfaitement alignés avec les conditions de la généralisation de l'utilisation des jumeaux numériques :

- interopérabilité : faciliter l'échange d'informations entre différents systèmes et équipements en utilisant des standards ouverts et assurer que les actifs de différents fabricants puissent interagir et communiquer de manière transparente ;

- gestion du cycle de vie : gérer et documenter toutes les phases de vie de l'actif, de sa conception à son démantèlement et conserver les données historiques pour faciliter l'analyse et l'amélioration continue ;
- flexibilité et adaptabilité : permettre la configuration et la reconfiguration des actifs en fonction des besoins changeants du processus de production et s'adapter à différentes échelles, des petits dispositifs aux grandes installations industrielles ;
- sécurité et conformité : garantir la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité des informations échangées et assurer la conformité avec les normes et réglementations industrielles et de sécurité.

L'émergence de plateformes ouvertes permettant la conception collaborative de jumeaux numériques serait un puissant accélérateur d'adoption de standards tels que l'AAS.

## Évolution des organisations

La mise en œuvre d'un jumeau numérique est très différente de celle d'une application de type MES (*manufacturing execution system*<sup>6</sup>) et demande une évolution profonde de la collaboration entre l'informatique, l'*engineering* et les opérations. En effet, un jumeau numérique est en évolution constante, tant du point de vue du modèle de données que des cas d'usage qu'il supporte et s'apparente plus à une plateforme qu'à une application classique. Alors qu'un MES est généralement développé sur la base de spécifications fonctionnelles établies en collaboration entre les utilisateurs et l'informatique, puis modélisée, développée et déployée par l'informatique, un jumeau numérique implique une répartition très différente de rôles :

- le modèle de données, généralement de la responsabilité de l'informatique et conçu selon des critères techniques, devient la responsabilité des opérations et est développé selon des critères opérationnels. L'objectif est que ce modèle de données soit exploitable par des experts, humains ou systèmes, à des fins de décision, et qu'il puisse être conçu et enrichi de façon évolutive. Le rôle de l'informatique est de mettre à disposition la plateforme technologique et méthodologique permettant aux fonctions *engineering* et opérations de collaborer pour la définition, la gestion et la gouvernance du modèle de données et services associés ;
- sa gouvernance, en particulier, doit être assurée par l'*engineering* et les opérations, et non par l'informatique. Cela demande l'émergence de nouveaux rôles telles que « propriétaire de données », en charge de la structuration et qualité des données pour un domaine particulier. L'expérience prouve que ce sont ces rôles qui conditionnent le succès d'une démarche de jumeau numérique ;
- la mise à disposition des services d'accès aux données est aussi fondamentale, la complexité d'un jumeau numérique réservant son accès direct aux spécialistes. Une partie importante de la collaboration entre l'*engineering*, l'informatique et les opérations est donc la définition de services d'accès aux données structurées par le jumeau sous forme de services (*data services/products*) formellement décrits dans un catalogue avec leurs méthodes d'accès. Ces services évolueront de façon régulière, reflétant la couverture croissante du jumeau numérique et de l'intelligence associée.

---

<sup>6</sup> Un *manufacturing execution system* (MES) est un système informatique utilisé en milieu industriel pour suivre et documenter la transformation des matières premières en produits finis. Le MES assure la gestion des processus de production, la visibilité et traçabilité des opérations de fabrication et la génération de rapports.

La mise en œuvre de ces évolutions d'organisation et de la gouvernance associée permet une structuration et accélération de l'innovation des procédés et de la valeur associée :

- chaque nouveau cas d'usage augmente la couverture du jumeau numérique et l'intelligence des services associés ;
- ceux-ci sont mis à disposition de l'ensemble de l'organisation sous forme de services intelligents, base d'un prochain cycle d'innovation.

C'est le déclenchement et l'amplification de ce cycle d'innovation qui est le principal objectif de la mise en œuvre d'un jumeau numérique, en support de l'évolution vers l'usine autonome.

## CONCLUSION

Les jumeaux numériques sont indissociables et symbiotiques de l'application à l'échelle de l'IA aux opérations industrielles, laquelle permettra de concilier efficacité économique et sobriété environnementale. Les conditions techniques sont réunies pour leur adoption progressive, mais celle-ci demandera des modèles de collaboration différents et plus ouverts, tant dans l'entreprise qu'entre elles.

Confrontée au besoin de retrouver une souveraineté industrielle dans un environnement géopolitique marqué par la montée des dangers, l'Europe a une opportunité unique de se réindustrialiser en tirant pleinement profit de cette digitalisation des *assets*. Avec des champions comme Dassault Systems, Siemens, SAP et Schneider Electric, ces investissements peuvent combiner efficacité économique et sobriété environnementale, tout en offrant des emplois industriels hautement qualifiés et attractifs pour les générations futures.