

JUMEAUX NUMÉRIQUES : UN ATOUT INCONTOURNABLE POUR L'INDUSTRIE 4.0

*Série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et
technologies sous-jacentes »*

À propos de la série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et technologies sous-jacentes » : issus du séminaire 2024 de l'Académie des technologies, les avis de cette collection proposent une liste (non exhaustive) des technologies et écosystèmes industriels à développer dès maintenant, pour assurer à la France (et l'Europe) la réindustrialisation, la souveraineté et la décarbonation de son économie à l'horizon 2035-2050.

En bref

Un jumeau numérique (ou *digital twin*) est une représentation d'un objet ou système physique sous forme de données, d'informations et de modèles associés, synchronisé ou non à l'évolution des processus réels et adapté aux besoins des acteurs concernés. La France et l'Europe disposent de champions dans le domaine : il faut en faire un atout. La diffusion des jumeaux numériques dans le tissu économique et industriel doit être favorisée, notamment par un accès renforcé aux offres à faible besoin en codage (par assemblage de modèles de composants en bibliothèque). Lancer un projet expérimental fédérateur, par exemple autour de la santé ou de la ville durable, permettrait d'articuler autour d'une direction de R&D solide l'ensemble des enjeux méthodologiques, technologiques et sociétaux ; l'État pourrait en être à l'initiative.

1. Face aux grands enjeux du XXI^e siècle

Un jumeau numérique (ou *digital twin*) est une représentation d'un objet ou système physique sous forme de données, d'informations et de modèles associés, synchronisé ou non à l'évolution des processus réels et adapté aux besoins des acteurs concernés. Exploitant les données collectées et l'intelligence artificielle (IA), il devient un outil clé pour optimiser le cycle de vie des systèmes, améliorer la collaboration et faciliter les échanges. Les jumeaux numériques permettent de déployer de nouveaux modèles économiques centrés sur la virtualisation du savoir et du savoir-faire.

La maîtrise des jumeaux numériques est cruciale pour la **compétitivité**, notamment dans les grands systèmes industriels, énergétiques ou urbains. Ils favorisent la collaboration au sein des entreprises étendues (ensemble d'acteurs associés pour un ou des projets communs), améliorent la compréhension des systèmes complexes et renforcent la coordination dans les écosystèmes intelligents.

Les jumeaux numériques sont composables et peuvent s'assembler en systèmes de systèmes : c'est le sujet le plus important pour l'accélération du *Digital Manufacturing* (approche intégrée centrée autour d'un système numérique).

Les jumeaux numériques seront critiques dans des secteurs comme les transports (aéronautique, ferroviaire, automobile, naval), l'énergie (nucléaire, grids, réseaux de chaleur), et seront décisifs pour la santé et la pharmacie, la ville intelligente, ou encore le génie civil et les matériaux. Ils permettent de mieux comprendre les architectures des systèmes, d'analyser, anticiper et optimiser leurs performances, leur sûreté et leur sécurité, leur impact carbone, etc. Surtout, la manipulation d'un avatar virtuel en lieu de son miroir réel ouvre la voie à des explorations nouvelles, depuis l'architecture d'un avion dont la technologie de propulsion n'existe pas encore aujourd'hui, jusqu'à l'évaluation pré-clinique d'un médicament potentiel sur une cohorte de patients virtuels mais néanmoins représentatifs du fonctionnement réel des processus modélisés.

Dans la mesure où les jumeaux numériques constituent une représentation du réel, ils posent d'emblée la question de la **confiance** qu'on peut avoir en eux. On retrouve ainsi tous les enjeux de la confiance autour de l'IA : qualité technique et éthique des données, qualité de l'apprentissage, évaluation des incertitudes. S'y ajoute l'enjeu de la confiance dans l'établissement du modèle et dans sa fidélité au regard de l'objectif visé. Cette question est identifiée depuis longtemps dans le cas des systèmes techniques où une vérité terrain est disponible, soit parce qu'elle se réduit à une connaissance physique, soit parce que les données sont disponibles et non sujettes à caution.

Cependant, les jumeaux numériques sont de plus en plus utilisés dans des contextes où une telle vérité terrain n'existe pas : systèmes du vivant, ville numérique, mobilités nouvelles, et même de très grands systèmes techniques comme les grilles énergétiques. Dans de tels cas, la confiance doit en particulier reposer sur des principes déontologiques ou éthiques tels qu'on les rencontre sur l'usage de l'IA : absence de biais dans les données, anonymisation, consentement et conditions d'usage s'il y a lieu. Plus généralement, et notamment dans le cas des systèmes humains, les jumeaux numériques ne sont pas exemptés des questions éthiques soulevées par l'utilisation en général des technologies numériques au sein des systèmes réels qu'ils simulent ; enjeux à aborder thématique par thématique, ce qui dépasse le cadre de cet avis.

2. Le positionnement mondial de la France et de l'Europe

L'Europe et la France disposent d'acteurs de rang mondial sur les **offres** en technologies du jumeau numérique¹ :

- dans l'ingénierie : Schneider-Electric (France) : fournit produits, services et logiciels utilisant les jumeaux numériques pour la conception, la gestion de produits et les services, en interne et avec des partenaires.

¹ Les citations d'entreprises et de solutions privées citées ici ne correspondent pas à une quelconque recommandation de l'Académie des technologies à leur égard. Il s'agit simplement d'illustrer les positionnements des différents pays.

- dans l'édition : 3DS (France) et Siemens (Allemagne) : une forte présence internationale (USA, Chine).
 - **Dassault Systèmes (3DS)** : leader dans les jumeaux numériques avec 25 000 employés, 350 000 clients. Ses solutions sont largement utilisées, notamment dans la conception de 90 % des avions, 70 % des véhicules thermiques et 85 % des électriques, ainsi que dans 80 % des projets nucléaires, 70 % des nouveaux médicaments et 50 % des équipements médicaux² ;
 - **Siemens** : Sa plateforme *Xcelerator* (SaaS) intègre des outils comme *Simcenter* pour la modélisation, la simulation, et le Product Lifecycle Management (PLM).

Les USA disposent de deux majors avec Ansys (Sinopsys) avec sa plateforme Ansys Twin Builder, et Mathworks avec son environnement Matlab/Simulink enrichi de l'outil Simscape. Ansys a historiquement une position dominante dans le calcul des structures et la mécanique (ouvrages d'art, avions, voitures...), tandis que Matlab est issu de la communauté des automaticiens (conception des automatismes et des contrôles temps-réel des systèmes). A ce tandem on peut ajouter IBM et sa plateforme Rhapsody, bien que le volet modélisation numérique ne soit guère traité par cette plateforme.

Nous n'avons pas connaissance de grandes plateformes émanant de l'Asie.

La situation est en revanche plus mitigée concernant les usages des jumeaux numériques.

Le domaine des jumeaux numériques est riche d'une multiplicité de formalismes et de techniques, dont beaucoup sont difficiles d'accès. Les utilisateurs avertis que sont les grands industriels des secteurs critiques ont perçu l'importance de cette technologie, et ont, en conséquence, développé les expertises et mis sur pied les équipes pour la maîtriser. Pour beaucoup d'entre eux (et en France, on peut en particulier citer EDF et le secteur aéronautique), des jumeaux numériques ont été développés « à la main » avec des efforts conséquents demandant un savoir-faire acéré. Des éléments de plateforme ont même été développés permettant une réutilisation sur plusieurs projets.

Mais s'en tenir à ce type d'approche limite considérablement la pénétration de la technologie des jumeaux numériques dans des secteurs plus larges de l'activité économique. Cet obstacle concerne tout particulièrement les PME. Il explique en grande partie la faible pénétration des jumeaux numériques en France, celle-ci étant largement limitée aux grands comptes disposant en interne d'une maîtrise approfondie de ses différents piliers technologiques et scientifiques. La situation concernant ce point précis est plus favorable dans l'Europe du Nord (en incluant le Benelux) : le tissu des petites sociétés commercialisant des bibliothèques de modèles y est plus riche ; le recours à des sociétés faisant du service dans les domaines de la modélisation et de l'automatique y est plus développé. Et, partant, l'écosystème des utilisateurs de la technologie jumeaux numériques est plus fort.

3. Les technologies clefs à horizon 2035-2050

- Intelligence artificielle (IA) : pour l'analyse, la prédiction et l'optimisation des systèmes complexes, l'IA est un moteur essentiel des jumeaux numériques. Tout d'abord, l'IA hybride (qui combine apprentissage machine et logique mathématique) sert l'accélération des performances. Ainsi chez Michelin, l'apprentissage machine est utilisé pour explorer plus vite l'espace de conception. L'utilisation de réseaux de neurones³ permet d'interpoler à coût réduit des simulations, ce qui permet de prédire les résultats et les performances de façon approximative, mais suffisamment précise pour guider l'exploration. Combiner, par l'IA hybride, la modélisation fondée sur les principes de la physique, avec l'apprentissage à partir de données, permet de construire des modèles au plus juste (dits *at scale*) et plus efficaces. Les modèles de type grands modèles de langage (cf. chatGPT)

² <https://www.3ds.com/fr/about/company/what-is-dassault-systemes>

³ Un concept au cœur des systèmes d'intelligence artificielle, inspiré initialement du fonctionnement du cerveau humain.

peuvent de leur côté générer toutes sortes de scripts : du langage naturel, mais également des objets et des scènes 3D. L'entrée n'est pas nécessairement réduite à un texte, mais peut être multimodale (texte, image, son). Dans ces contextes les grands modèles de langage fournissent une aide précieuse pour diverses phases de la conception des systèmes ;

- Cloud/edge computing : ils permettent le traitement, le stockage et la synchronisation des données à grande échelle, tout en optimisant les ressources et en réduisant la latence (délai de communication) ;
- Internet des objets (IoT) : les capteurs connectés fournissent les données en temps réel nécessaires pour représenter et synchroniser les jumeaux numériques avec leurs équivalents physiques ;
- 5G/6G et réseaux de communication : la connectivité haute performance est essentielle pour transférer rapidement les données entre les systèmes physiques, les jumeaux numériques et les utilisateurs.

Par ailleurs, le couplage bidirectionnel du réel et de son jumeau est un enjeu fort de maîtrise technologique. Les jumeaux numériques ont le plus souvent été entraînés avec des données réelles pour calibrer des simulations qui sont jouées ensuite. Des données réelles (de préférence un autre jeu de données) sont également utilisées pour valider ou invalider le modèle. Il est possible, sous certaines conditions, d'entraîner le modèle en boucle continue, faisant du jumeau numérique un outil de pilotage du réel ; on parle alors de jumeau numérique à chaud.

4. Les recommandations de l'Académie des technologies

- **L'Europe et la France disposent de champions : il faut en faire un atout.** Il faut promouvoir une politique où les deux plateformes dominantes (Siemens et 3DS) joueraient le rôle d'infrastructure de partage de données, modèles, et connaissances, pour les filières ;
- **Un cloud souverain européen est nécessaire.** En l'absence d'une telle infrastructure, dès qu'un industriel met en jeu des données critiques, il est condamné au sur-mesure, ce qui coûte cher. On ne peut que se joindre aux nombreuses alertes aux autorités européennes et nationales sur ce sujet ;
- **Accompagner le développement de cette technologie et sa pénétration :**
 - o Élargir la population d'utilisateurs : les éditeurs ainsi que les communautés *open source* doivent continuer à développer l'offre à faible besoin en codage, et à la renforcer ; ces approches, reposant sur l'assemblage de sous-modèles en bibliothèques, sont détaillées dans le rapport Jumeaux numériques de l'Académie des technologies, où elles sont désignées sous le vocable *low-code/no-code* ;
 - o Favoriser le développement d'un marché : dans lequel, au sein des chaînes fabricants/sous-traitants, les composants et sous-systèmes puissent être proposés accompagnés de leur jumeau numérique, permettant ainsi à l'intégrateur des conceptions exploratoires de systèmes ;
 - o Lancer un projet expérimental fédérateur, par exemple autour de la santé, ou de la ville durable, ce qui permettrait d'articuler autour d'une direction de R&D solide l'ensemble des enjeux méthodologiques, technologiques et sociétaux. L'État pourrait en être à l'initiative.
- **Définition d'un cursus de science de la représentation**, en lien avec le monde universitaire. Un frein à la définition d'un cursus est toutefois la nature très parcellisée du domaine, avec l'existence de forts silos. Avoir des consortiums ou des associations aiderait ;

- **L'IA pour les jumeaux numériques** : c'est dans une imbrication intime entre IA et jumeaux numériques que l'IA trouve sa place, celle de l'IA dite hybride. Son impact y sera renforcé par les progrès encore attendus au niveau de l'IA de confiance. Nous recommandons donc que les programmes de recherche sur l'IA comportent un volet "IA pour les jumeaux numériques".

Pour aller plus loin :

On pourra utilement se reporter la production complémentaire de l'Académie des technologies : [Les jumeaux numériques. Un atout incontournable pour l'industrie 4.0 et le développement des secteurs du vivant](#) (mars 2025)

Auteur principal (liens d'intérêts en relation avec le thème, le cas échéant) : Albert Benveniste (membre du Conseil scientifique de Safran). L'auteur remercie Jean-Claude André, Alain Cadix, Didier Evrard et François Lefaudeux pour leurs relectures attentives.

La déontologie académique exige que tout contributeur à l'élaboration d'un rapport n'apporte au collectif que sa seule expertise, en se gardant de promouvoir tout intérêt personnel, institutionnel ou corporatiste. L'indépendance de nos positions est assurée par le caractère collectif de nos travaux. Ce document a été validé par l'Académie des Technologies selon la procédure disponible sur le site de l'Académie.