ACADÉMIE
DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

Les jumeaux numériques

Un atout incontournable pour l'industrie 4.0 et le développement des secteurs du vivant

Rapport de l'Académie

Académie des technologies
Le Ponant — Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS

+33(0)1 53 85 44 44

secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr

© Académie des technologies
ISBN : 979-10-97579-61-6

Couverture : Gorodenkoff - Adobe stock

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES

POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

LES JUMEAUX NUMÉRIQUES

UN ATOUT INCONTOURNABLE POUR L'INDUSTRIE 4.0 ET LE DÉVELOPPEMENT DES SECTEURS DU VIVANT

Rapport de l'Académie

Ce rapport a été rédigé sous la direction d'Albert BENVENISTE, avec les contributions d'Yves CASEAU, de Nicolas DEMASSIEUX, Patrick JOHNSON, Jean-Luc MOLINER, Sophie PROUST et de Gérard ROUCAIROL.

Il est le produit d'un groupe de travail dont la composition complète est précisée en annexe. Il répond à un processus rigoureux au sein de l'Académie des technologies garantissant son indépendance et son objectivité ; il a été approuvé et voté lors de l'Assemblée générale des académiciens.

Mars 2025

Sommaire

Résumé exécutif 7

Executive summary 9

Chapitre 1
Le jumeau numérique : une représentation numérique partagée 11

Chapitre 2
Genèse et racines du concept de jumeau numérique 14

Chapitre 3
Secteurs d'application 16

3.1. Secteur de référence : les systèmes critiques 16

3.1.1. Transports : aéronautique, ferroviaire, automobile, naval 16
3.1.2. Énergie : nucléaire, grids, réseaux de chaleur 17
3.1.3. Pourquoi des jumeaux numériques pour ces secteurs ? 17
3.1.4. Jumeaux numériques et certification 18

3.2. Autres secteurs 19

3.2.1. Santé et pharmacie 19
3.2.2. Systèmes militaires, ville intelligente 21
3.2.3. Le génie civil 22
3.2.4. Les matériaux 23

Chapitre 4
Jumeau numérique : éléments techniques 24

4.1. En guise de définition 24
4.2. Modèles multiéchelle ; continuité numérique 26
4.3. Combiner modèles, IA et données ; incertitudes 28
4.4. Combiner diverses vues ; synchroniser 30
4.5. Combiner virtuel et réel ; le métavers industriel 33
4.6. Rendre les jumeaux numériques accessibles ; *low-code/no-code* 33

Chapitre 5
Plateformes, standards, écosystèmes 36

5.1. Plateformes 36
5.1.1. Plateformes hôtes 36
5.1.2. Plateformes cadres de modélisation (*frameworks*) 37
5.1.3. Plateformes d'infrastructure : données, composants IA, *cloud* 38
5.1.4. Caveat sur la plateformisation des jumeaux numériques 39
5.2. Standards 39
5.3. Écosystèmes 40

Chapitre 6
Questions et observations 42

6.1. Enjeux 42
6.2. Confiance et éthique 43
6.3. Barrières technologiques et « vendor lock-in » 43
6.4. La France et l'Europe dans la compétition internationale 46
6.4.1. De grands acteurs dans l'ingénierie : Siemens, Schneider-Electric… 46
6.4.2. De grands acteurs dans l'édition, avec une bonne place pour l'Europe et la France 47
6.4.3. Une situation plus mitigée concernant l'usage des jumeaux numériques 49

Chapitre 7
Conclusions et recommandations 50

7.1. L'Europe et la France disposent de champions : il faut en faire un atout 50
7.2. Un *cloud* souverain européen est nécessaire 50
7.3. Accompagner le développement de cette technologie et sa pénétration 51

7.3.1. Élargir la population d'utilisateurs des jumeaux numériques (PME…) 51
7.3.2. Favoriser le développement d'un marché du jumeau numérique 51
7.3.3. Lancer un projet expérimental fédérateur 52

7.4. Définition d'un cursus 52
7.5. IA et jumeaux numériques, IA pour les jumeaux numériques 53
7.6. Quelles recherches ? Pour une science de la représentation 53

7.6.1. La quête du *low-code/no-code* 55
7.6.2. Les verrous liés au caractère intégratif des jumeaux numériques 56

Annexes 57

Annexe 1 — Difficultés du *low-code/no-code* 57
Annexe 2 — Regard sur le rapport des académies scientifiques américaines 59
Annexe 3 — Entretien avec Vera Silva (GE Vernova) 61
Annexe 4 — Entretien avec Gilles Le Borgne (PSA puis Renault) et Armel Djeukou, Pierre Panfili (Airbus) 67
Annexe 5 — Entretien avec Thibault Lockhart (EDF nucléaire EPR2) 75
Annexe 6 — Entretien avec Marie-Luce Godinot, Bouygues 77
Annexe 7 — Un peu de futurisme, les jumeaux numériques vus par des jeunes 81
Annexe 8 — Acronymes 84
Annexe 9 — Contributeurs, interviews, conflits d'intérêt 85

Résumé exécutif

Un jumeau numérique est une réplique virtuelle d'un système réel. Il utilise des données en temps réel et des simulations pour représenter et prédire le comportement de son homologue réel. Les jumeaux numériques sont devenus centraux dans divers domaines tels que l'aéronautique et l'automobile, la santé et le vivant, l'énergie et la fabrication, pour aider à la conception, optimiser les performances, prévenir les pannes, et améliorer la maintenance.

Ils constituent une technologie clé pour le futur : 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 potentiel médicament sur une cohorte de patients virtuels mais néanmoins représentatifs du réel.

Par leur nature profondément collaborative, les jumeaux numériques transforment et vont continuer à révolutionner l'activité industrielle, économique, et sociétale : les jumeaux numériques agrègent l'ensemble des savoirs, connaissances, modèles et données, relatives à un système ou une famille de systèmes ; les jumeaux virtuels du réel peuvent être intimement partagés entre acteurs d'une même filière industrielle, tout en protégeant la propriété intellectuelle. Les leaders de demain sont ceux qui sauront porter et exploiter les savoir-faire. Les jumeaux numériques en seront le support.

Par leur nature profondément pluridisciplinaire, les jumeaux numériques sont à la croisée de nombreuses disciplines scientifiques, dont le génie logiciel, l'IA, le calcul scientifique, les statistiques, à quoi il convient d'y ajouter la connaissance physique approfondie de divers secteurs et de leurs systèmes. Au total, les jumeaux numériques apparaissent aujourd'hui comme la tour de Babel des savoirs et des savoir-faire. La barrière d'entrée est haute pour ceux

qui veulent y faire tout eux-mêmes. Aujourd'hui, la maîtrise approfondie des jumeaux numériques reste l'apanage de grands comptes industriels capables de croiser tous les savoirs requis et de porter les investissements associés. Faire de nos filières des écosystèmes puissants et novateurs passe pourtant par un accès considérablement élargi et partagé aux jumeaux numériques, incluant largement les PME. Les grandes plateformes du domaine sont donc une entrée incontournable. Elles sont développées et portées par une poignée de grands éditeurs dans le monde (États-Unis et Europe). Et, une fois n'est pas coutume, l'Europe et singulièrement la France y ont une place de tout premier plan. Nous sommes aujourd'hui dans une économie de la connaissance. Le jumeau numérique en devient une devise.

Après avoir approfondi toutes ces questions, le rapport formule les recommandations suivantes.

- Les jumeaux numériques sont une infrastructure de souveraineté. L'Europe et la France disposent de champions : il faut en faire un atout.

- Un *cloud* souverain européen est nécessaire au déploiement de jumeaux numériques de grandes chaînes de sous-traitance. À défaut, des développements à façon sont requis, à un coût prohibitif.

- Il est essentiel d'accompagner le développement de cette technologie et sa pénétration. Les écosystèmes doivent se développer. Parmi les priorités figurent tous les moyens techniques facilitant l'accès aux jumeaux numériques et à leurs usages. Ce sont autant de terrains de conquête pour une science de la représentation.

- Comme pour l'IA, une nouvelle génération d'ingénieurs doit être formée, plus flexible et moins prisonnière des silos disciplinaires.

- IA et jumeaux numériques vont de pair, mais un grand enjeu reste est de développer une IA pour les jumeaux numériques, une IA qui mêle intimement données et modèles, une IA de confiance.

Executive summary

A digital twin is a virtual replica of a real system. It uses real-time data and simulations to represent and predict the behavior of its physical counterpart. Digital twins have become central in various fields such as aerospace and automotive, healthcare and life sciences, energy, and manufacturing, aiding in design, optimizing performance, preventing failures, and improving maintenance.

They are a key technology for the future: manipulating a virtual avatar instead of its real-world counterpart paves the way for new explorations, from designing an aircraft with a propulsion technology that does not yet exist to conducting preclinical evaluations of a potential drug on a cohort of virtual yet representative patients.

Due to their inherently collaborative nature, digital twins are transforming and will continue to revolutionize industrial, economic, and societal activities. Digital twins aggregate all knowledge, models, and data related to a system or a family of systems. Virtual counterparts of real-world systems can be closely shared among stakeholders in the same industrial sector while protecting intellectual property. Tomorrow's leaders will be those who can harness and leverage this expertise, and digital twins will be their main pillar.

Because of their deeply interdisciplinary nature, digital twins sit at the crossroads of many scientific disciplines, including software engineering, AI, scientific computing, and statistics, in addition to deep physical knowledge of various sectors and their systems. As a whole, digital twins today resemble a Tower of Babel of knowledge and expertise. The entry barrier is high for those who wish to develop them independently. Currently, in-depth mastery of digital twins remains the domain of major industrial players capable of integrating all required expertise and making the necessary investments. However, building powerful and innovative industrial ecosystems requires

significantly broader and more shared access to digital twins, including small and medium-sized enterprises (SMEs). The major platforms in this field are therefore an essential gateway. These platforms are developed and maintained by a handful of major software providers worldwide (in the United States and Europe). And, for once, Europe—particularly France—holds a leading position.

We are now in a knowledge-driven economy, where digital twins are becoming a currency.

After exploring these issues in depth, this report makes the following recommendations:

- Digital twins are an infrastructure of sovereignty. Europe and France have leading players in this field and must turn this into an advantage.

- A sovereign European cloud is necessary for deploying digital twins in large subcontracting chains. Without it, customized developments would be required at prohibitive costs.

- Supporting the development and adoption of this technology is essential. Ecosystems must grow, and priorities should include all technical means that facilitate access to digital twins and their applications—key areas for advancing a new science of representation.

- Like AI, a new generation of engineers must be trained—more flexible and less confined to disciplinary silos.

- AI and digital twins go hand in hand, but a major challenge remains: developing AI specifically for digital twins—an AI that intimately combines data and models, an AI that is trustworthy.

Chapitre 1

Le jumeau numérique : une représentation numérique partagée

Commençons par la question suivante, posée à Mistral.ai : *Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ?*[1] Voici la réponse :

> *Un jumeau numérique est une réplique virtuelle d'un objet, d'un processus ou d'un système physique. Il utilise des données en temps réel et des simulations pour représenter et prédire le comportement de son homologue physique. Les jumeaux numériques sont souvent utilisés dans divers domaines tels que la fabrication, l'aérospatiale, la santé et l'énergie pour optimiser les performances, prévenir les pannes, et améliorer la maintenance.*
>
> *Voici quelques caractéristiques clés des jumeaux numériques :*
>
> 1. *Modélisation précise : Ils reproduisent fidèlement les caractéristiques physiques et les comportements de l'objet ou du système réel.*
> 2. *Données en temps réel : Ils intègrent des capteurs et des systèmes de collecte de données pour obtenir des informations en temps réel sur l'état de l'objet physique.*
> 3. *Simulation et prédiction : Ils permettent de simuler différents scénarios et de prédire les performances futures, aidant ainsi à la prise de décision.*

1 Merci à Paul Friedel pour l'initiative de cette question, sachant que la même question posée à ChatGPT (ChatBox AI, version 4 de ChatGPT) a reçu une réponse très similaire.

4. *Optimisation : Ils aident à optimiser les processus de fabrication, la maintenance et les opérations en identifiant les points de défaillance potentiels et en suggérant des améliorations.*

5. *Interaction bidirectionnelle : Les modifications apportées au jumeau numérique peuvent être appliquées à l'objet physique et vice versa, créant une boucle de rétroaction continue.*

Les jumeaux numériques sont un élément clé de l'Industrie 4.0 et de la transformation numérique, permettant aux entreprises de devenir plus agiles, efficaces et innovantes.

Pour cette brève introduction, la description ci-dessus est un bon point de départ, à condition d'y rajouter la caractéristique qui suit :

6. La nature *intégrative* des jumeaux numériques est un élément essentiel. Un jumeau numérique a vocation à être partagé par tous les métiers de l'entreprise, depuis la conception d'un système sur la base d'une étude marketing ou la découverte d'un nouveau produit[2], jusqu'à sa décommission, en passant par la fabrication, la vente, et l'opération. Les intervenants peuvent être des acteurs différents d'une chaine OEM/sous-traitants[3].

Par ces caractéristiques, les jumeaux numériques sont un catalyseur puissant d'accompagnement du changement puisqu'ils décloisonnent les schémas organisationnels et permettent la mise en œuvre effective de différents modes de collaboration ; ils permettent de nouveaux modèles économiques centrés sur la virtualisation du savoir et du savoir-faire ; ils contribuent à l'intégration du numérique dans tous les secteurs de la société.

2 Ce service est central pour la recherche de nouvelles molécules et médicaments, ou de nouveaux matériaux.

3 OEM : *Original Equipment Manufacturer,* il s'agit du systémier.

Ce concept et son importance sont aujourd'hui bien perçus. Mais quelles sont ses filiations et sa genèse ? Quels sont les secteurs qui l'utilisent et le tirent en avant et pourquoi ? Quels sont les éléments techniques qui le constituent ? Nous examinerons ces questions. Puis nous passerons en revue le paysage des jumeaux numériques (quelle offre internationale ? Quels usages ?) et nous procéderons aux recommandations.

Chapitre 2

Genèse et racines du concept de jumeau numérique

Selon Wikipedia[4], «*The first digital twin, although not labelled as such, came about at NASA during the 1960s as a means of modelling the Apollo missions. NASA used simulators to evaluate the failure of Apollo 13's oxygen tanks*.» On peut aussi donner l'exemple de l'aéronautique, où le Boeing 777, premier cas d'utilisation d'une maquette numérique, était conçu dans la décennie 1980 à 70 % par le donneur d'ordre et à 30 % par son écosystème, tandis que, pour le 787, ces proportions ont été inversées.

Dans le secteur automobile, l'usage des jumeaux numériques date de la fin des années 90 ou début des années 2000. En fait trois vues étaient gérées en parallèle jusqu'aux années 2018/2020[5] : 1/ les composants physiques et les pièces via le PLM[6] pour la conception, la vie d'une série, et l'après-vente, 2/ l'approche système avec une gestion des exigences (cahier des charges), des modèles (monophysiques, puis multiphysiques) et des validations (numériques et/ou expérimentales) pour le domaine des systèmes critiques, et 3/ le système industriel pour la fabrication (*shop floor)*. Les autres domaines de l'entreprise (achat, logistique, finances…) étaient à l'écart de ces processus avec des outils dédiés. Cette situation engendrait (et engendre encore) beaucoup de non-valeur ajoutée. Une étude interne PSA des années 2013 montrait que 80 % du temps des ingénieurs était consacré à la validation des données d'entrée de conception. Grâce à ce support numérique, tout insatisfaisant qu'il fût, le secteur automobile a vu une migration, depuis une filière où des sous-systèmes complets équipés de leur électronique embarquée (freins, moteur, air conditionné/chauffage…)

4 https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin

5 Selon la pratique en vigueur dans le groupe PSA.

6 *Product Lifecycle Management tool*, il s'agit d'une base de données équipée ou non d'ontologies.

étaient assemblés par le constructeur d'automobiles, à un monde où celui-ci devient un intégrateur qui définit une architecture système assemblant des composants nus autour d'une architecture logicielle et matérielle de communication et de calcul. De nouveaux acteurs apparaissent, de nouveaux métiers naissent chez les sous-traitants de premier rang.

La filiation du concept résulte en fait de la fusion de deux branches distinctes. Une première branche traite du concept de modèle comme résultant d'une combinaison données/connaissances physiques, et de son utilisation pour la conception et le monitoring en vue de la maintenance. Cette branche, qu'on peut voir comme un enrichissement de l'activité traditionnelle de simulation, fut développée en milieu académique dès les années 1980-1990. L'émergence de l'IA et du *machine learning* vers 2010 fut la cause d'un changement de braquet de cette première branche. La seconde branche traite du partage de données et d'informations entre les différents domaines de l'entreprise, elle est fille du génie logiciel, qui émergea en milieu académique dès les années 1980, également. La fusion de ces deux branches s'est avérée utile et efficace grâce à l'explosion des infrastructures de données et calcul de type *cloud*.

Ce n'est que récemment (vers 2020) que l'alignement de toutes ces planètes permit de révolutionner l'offre en infrastructures de jumeaux numériques par les grands éditeurs du domaine.

Chapitre 3

Secteurs d'application

Commençons par une revue de quelques secteurs d'application importants, avec leurs motivations. Si nous ne prétendons pas à l'exhaustivité, nous pensons néanmoins avoir passé en revue suffisamment de secteurs pour appréhender les motivations dans leur diversité. Nous prenons comme cas de référence les systèmes industriels critiques, où l'usage des jumeaux numériques est devenu incontournable. Puis on indique les déclinaisons pour d'autres secteurs où le concept a pris de l'importance. Dans les regards vers le passé que nous porterons, nous conservons le terme de « jumeau numérique » alors même que le vocable n'était pas encore né.

3.1. Secteur de référence : les systèmes critiques

Les grands secteurs où le concept a commencé à être élaboré dès 1980 sont les suivants.

3.1.1. Transports : aéronautique, ferroviaire, automobile, naval

Nous avons déjà évoqué le secteur automobile. Le cas de l'aéronautique est emblématique. C'est comme émanation d'un outillage pour l'avionneur Dassault que l'outil Catia pour la CAO en mécanique a été d'abord conçu, puis soutenu par un partenariat avec IBM. Ce stimulus initial est à l'origine d'un des majors du jumeau numérique à ce jour : Dassault-Systèmes (3DS). Ce sujet est aujourd'hui l'un des sujets clés pour les constructeurs d'avions ou de fusées, et aussi pour une grande agence comme la NASA. Les progrès de ces 30 dernières années dans le secteur ferroviaire n'ont été possibles que par le recours aux jumeaux numériques, tant pour les matériels roulants que pour la gestion du réseau et du trafic. Naval group est également un grand utilisateur de la technologie.

3.1.2. Énergie : nucléaire, grids, réseaux de chaleur

Les jumeaux numériques ont été importants depuis longtemps (les années 1970) pour la conception des centrales nucléaires et leur sécurité. La migration du parc énergétique vers le renouvelable (particulièrement éolien et solaire) a profondément changé la nature du réseau, avec une production réalisée par une grande population de petits producteurs décentralisés. Le caractère irrégulier de ce type de production a conduit au concept de *smart grid* (réseau électrique intelligent), où cette production décentralisée doit être gérée en connexion avec le réseau, et en y adjoignant de plus en plus des politiques d'influence sur la demande. De nombreuses communautés urbaines ont développé des réseaux de chaleur alimentés par le recyclage ou certaines activités industrielles et alimentant particuliers et activités économiques. La complexité de la mise au point de tels systèmes a exigé le recours aux jumeaux numériques. Dans ce secteur comme dans d'autres, on trouve des jumeaux numériques à différents niveaux d'agrégation, du composant de base d'un produit, au produit, et aux réseaux locaux ou globaux qui incluent ce produit. Dans certains cas, le jumeau numérique est également amené à inclure un modèle des utilisateurs (personnes ou organisations) du produit ou du réseau, par exemple un modèle de la réaction potentielle des clients à une proposition de type « *demand-response* », c'est-à-dire à l'offre d'une rétribution en échange d'une réduction de la consommation du client pendant une période de pointe.

3.1.3. Pourquoi des jumeaux numériques pour ces secteurs ?

La conception et la gestion de tout le cycle de vie des systèmes pour ces secteurs nécessitent de maitriser, depuis la conception jusqu'à la décommission et le recyclage en passant par la fabrication, l'exploitation et la maintenance, un nombre élevé de vues différentes :

- architecture du système (de quoi se compose-t-il ?) ;
- fonction : le service qu'est censé rendre le système ;
- performance ;

- sûreté (*safety* en anglais) ;
- sécurité (*security* en anglais) et cybersécurité ;
- plus des aspects divers tels qu'énergie, impact carbone, …

Et il convient d'y adjoindre les vues que l'ingénierie de conception partage avec les activités de vente, d'après-vente, voire de recyclage. Ces différentes vues sont toutes essentielles, et les différents métiers de l'entreprise (conception, fabrication, vente, opération), ainsi que les différents maillons de la chaine de sous-traitance, ont besoin d'y accéder et d'intervenir dessus. Ces vues sont de nature différente, mais sont liées. Les maitriser conjointement n'est possible que par un recours partagé aux jumeaux numériques.

3.1.4. Jumeaux numériques et certification

Nous avons argumenté sur le caractère essentiel des jumeaux numériques pour le secteur des systèmes critiques. Nous avons, aussi, souligné la particularité de ce secteur, à savoir le rôle contraignant de la certification et de ses autorités. La grande question du numérique et du virtuel au regard de la certification est la suivante : *dans quelle mesure un support numérique peut-il permettre de réduire les tests qui sont effectués sur les prototypes successifs, pour obtenir la certification du système conçu ?*

Une étape historiquement caractéristique fut (autour de 2010) l'acceptation, par les autorités de certification en aéronautique, du compilateur certifié pour le langage Scade permettant de spécifier un logiciel embarqué sur un système critique. Auparavant, le code objet devait être testé ; depuis, il suffit de tester le code source (les autorités du nucléaire n'ont pas franchi cette étape à ce jour). De même, le combat pour faire reconnaitre des validations formelles de certains codes comme valant test, reste permanent. L'IA, de par le caractère fondamentalement statistique de sa démarche, est encore largement bloquée en certification (d'où le projet IA de confiance lancé par les industriels de certains secteurs critiques, nous y reviendrons). Dans la mesure où les jumeaux numériques impliquent toutes ces technologies (et d'autres), la reconnaissance, par des autorités de certification, des jumeaux

numériques comme objets sur lesquels le test virtuel serait reconnu reste un avenir souhaitable, mais encore lointain.

Toutes ces réserves ayant été formulées, il faut quand même rappeler qu'il existe des situations et des étapes à franchir où le jumeau numérique est incontournable, et donc accepté comme argument par les autorités de certification. Le plus simple est d'utiliser un exemple que tout le monde comprendra. En aéronautique civile, une étape essentielle à la certification d'un nouvel avion est celle de *l'ouverture du domaine de vol* : jusqu'à quelle altitude et quelle vitesse l'avion sera-t-il autorisé à voler[7] ? Il sera évident pour tout le monde que cette étape ne peut pas être franchie par des essais en vol… précisément pas ! Depuis longtemps, cette étape est franchie par le recours à un jumeau numérique qui prédit le comportement aéroélastique de l'avion, jumeau numérique qui aura été auparavant recalé sur des données de banc de test au sol, par apprentissage.

3.2. Autres secteurs

Nous passons en revue quelques secteurs, avec un but illustratif plutôt qu'une prétention à l'exhaustivité.

3.2.1. Santé et pharmacie

Le monde de la santé est confronté à de multiples défis : évolution de la population, maladies chroniques, évolution des thérapeutiques, systèmes de production et chaines logistiques en véritable tension, pratiques médicales et parcours patients. Il s'est converti depuis plusieurs décennies à la puissance du monde virtuel.

En découverte et conception de médicaments, la modélisation-simulation et l'IA (depuis le screening virtuel jusqu'aux très récentes avancées sur la structure 3D des protéines grâce à l'IA générative) ont permis d'accélérer la proposition de nouveaux candidats médicaments et l'appréhension, via des

7 Sous peine de périr d'une instabilité aéroélastique appelée flottement, à quoi aucun avion ne peut survivre.

expérimentations virtuelles, de leurs caractéristiques en termes d'efficacité, de sûreté, de rétrosynthèse et de production, ainsi que de biocompatibilité.

En essais cliniques, les dernières avancées mettent en avant des jumeaux numériques de cohortes, tenant lieu de bras synthétiques de contrôle[8], ainsi que de patients synthétiques anonymisés sur lesquels on peut coupler des jumeaux d'organes, permettant d'envisager des bras synthétiques expérimentaux.

En gestion hospitalière, le lieu de soin devient un système hybride de conduite et de coordination de multiples parcours patients, chacun donnant lieu à autant de jumeaux opérationnels. On peut ainsi proposer des optimisations du fonctionnement des services.

Pour les dispositifs médicaux, les approches classiques d'objets manufacturiers sont utilisées pour les dispositifs eux-mêmes ; on les couple à des modèles d'organes et à des modèles de principes actifs (*reagents*) ; l'intégration inhérente aux jumeaux numériques s'avère ici essentielle.

En pratique médicale, les jumeaux numériques font leur entrée et permettent d'ores et déjà pour certains actes (cardiologie ou neurologie par exemple) des gains considérables de performance (division par 2 ou 3 des interventions en bloc) ainsi qu'en qualité de soin (baisse des retours après interventions).

Enfin, les jumeaux numériques ont un impact fort sur les chaines de valeurs grâce au développement des CDMOs (*Contract Development Manufacturing Organisations*) en pharmacologie.

8 Selon https://stayrelevant.globant.com/fr/technology/healthcare-life-sciences/quand-le-recrutement-de-patients-ne-suffit-pas-comment-les-bras-temoins-synthetiques-peuvent-ameliorer-la-conception-des-essais-cliniques/ : Le bras témoin synthétique (SCA), un type de bras témoin externe, est une approche innovante selon laquelle les chercheurs utilisent des données pour construire un groupe témoin virtuel ou synthétique plutôt que de recruter de nouveaux patients pour un groupe témoin. L'élaboration d'un SCA implique l'utilisation de données de patients trouvées dans des jeux de données préexistants, tels que les dossiers médicaux électroniques (DME), qui sont dépersonnalisées ou dépouillées de toute information personnellement identifiable (PII). Ces témoins imitent les patients réels qui seraient autrement recrutés pour l'essai.

3.2.2. Systèmes militaires, ville intelligente

Les notions de jumeau numérique pour ces deux domaines partagent un certain nombre de caractéristiques :

Le jumeau a vocation à décrire un système de systèmes (*Systems of Systems*, SoS, en anglais). Dans le contexte militaire et l'exemple du champ de bataille, chaque équipement (terrestre ou aérien ou naval) est un système qui est modélisé avec son environnement, et ces systèmes sont dynamiquement créés, supprimés, ou reconfigurés. Il en va de même pour le volet mobilité des modèles de ville intelligente. La gestion de cet aspect dynamique est une difficulté spécifique, ce qui motive le concept spécifique de SoS.

Outre le comportement de chacun de ces systèmes, le jumeau numérique doit décrire leurs interactions ainsi que l'environnement dans lequel ils évoluent. Il y a donc un fort volet cartographique. Un exemple où les jumeaux numériques sont particulièrement importants dans le secteur militaire est la cartographie temps-réel pour les aéronefs avec la tâche dite de SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), qui consiste à effectuer le recalage permanent de l'aéronef sur la carte virtuelle embarquée. D'autres cas de ce type existent.

Tous ces jumeaux numériques ont vocation à être utilisés de manière hybride, pour partie sous forme numérique, pour partie bouclés sur le système réel. Cela se rapproche donc des technologies de réalité augmentée, mais aussi de l'utilisation de la simulation dite HiL (*Hardware in the Loop*) très développée dans le secteur automobile. Un autre exemple est celui de la simulation de l'interaction humain-système. Tout ceci exige donc que le jumeau numérique puisse opérer en temps réel.

Des outils offrant ces types de support sont développés dans le secteur militaire. Ils sont généralement confidentiels et non commercialisés en tant que tels. Nous n'avons pas connaissance d'un outil générique commercial (du type 3D-Experience de 3DS) offrant cette classe de caractéristiques.

3.2.3. Le génie civil

L'usage des jumeaux numériques dans le cas des grands ouvrages de génie civil est spécifique. Ces jumeaux numériques sont individuels, car ces ouvrages sont tous différents, et construits en utilisant de l'apprentissage, car les paramètres et les modèles mécaniques qui permettent de les concevoir ne peuvent être connus qu'imparfaitement avant la construction. Ce sont les mesures et l'auscultation durant la construction et la mise en charge (éventuellement lors des séismes subits) qui permettent d'apprendre ce que sont les lois de comportements effectives et les paramètres de ces lois. Cette spécificité est importante pour les ouvrages souterrains et pour les grands barrages dont la compréhension de la géologie échappe en partie à la connaissance, quelles que soient les reconnaissances faites. Dans le cas des grands barrages en remblais, c'est le corps même du barrage qui est constitué de matériaux naturels aux caractéristiques en partie incertaines et dont les dimensions granulaires ne permettent pas de les analyser en laboratoire. Le jumeau numérique est la seule manière de comprendre leur comportement.

Cette démarche progressive et apprenante suppose une stratégie de mise en place d'appareils de mesures et de mesures *in situ* tout au long de la construction de l'ouvrage. Ce sont ces mesures qui permettent de déterminer la justesse du modèle et la confiance qu'on lui accorde dans une « zone de pertinence » qui ne peut pas être totale. Les mesures dans le cas du génie civil permettent également de justifier ou de mettre en cause le modèle de comportement mécanique : il est fréquent que l'on constate qu'une variation de la charge dans sa grandeur et dans sa direction conduit à des choix de paramètres différents alors que le matériau est le même « apparemment ». C'est la preuve que le modèle de comportement est lacunaire et que le jumeau doit être amélioré ou exploité avec prudence. Ce principe de jumeaux numériques apprenants a été développé spécifiquement pour ces ouvrages dans les années 1995 sous le nom de Modèle accompagnateur de projet ou Modap.

Dans de nombreux cas d'ouvrages moins complexes, le jumeau numérique se limite à l'intégration d'ombres numériques (captation de données depuis l'ouvrage en temps réel et transfert vers un modèle virtuel). Cette intégration d'ombres numériques est déjà assez répandue et se traduit par des interfaces

de supervision intégrant trois types de technologies : bases de données et systèmes d'information ; capteurs, IoT et systèmes de monitoring ; maquettes numériques et SIG. Les données collectées à partir d'équipements de production (grues, tunneliers, lanceurs de poutres) permettent de superviser l'avancement des travaux, d'assurer la traçabilité de la production et d'optimiser les processus.

Les grands ouvrages d'art complexes (ponts, grands bâtiments) intègrent souvent des éléments préfabriqués fournis par des sous-traitants. Cette intégration était, traditionnellement, source de retouches importantes autant que coûteuses parce que tardive. Dans ce secteur, l'intégration virtuelle permise par le recours aux jumeaux numériques a été un élément significatif permettant la réduction des corrections tardives, et donc une réduction significative des coûts.

3.2.4. Les matériaux

Là encore, deux caractéristiques sont importantes. Tout d'abord, la complexité trop grande des process et l'espace trop vaste des innovations possibles imposent le recours au jumeau numérique. Ensuite, le monde de demain avec ses intrants issus du recyclage et des biomatériaux a besoin d'apprentissage et d'IA pour s'accommoder des variations naturelles des caractéristiques physiques et chimiques des intrants : les premières expérimentations démontrent la capacité du *machine learning* (et du *reinforcement learning*) à pouvoir piloter des processus continus tels que l'extrusion ou le mixage avec une plus grande précision et, en même temps, une meilleure adaptabilité.

Chapitre 4

Jumeau numérique : éléments techniques

4.1. En guise de définition

La diversité des motivations pour utiliser des jumeaux numériques ayant été passée en revue, le moment est venu de décortiquer plus en détail de quoi il s'agit, techniquement parlant.

Un jumeau numérique est une représentation d'un objet ou système physique sous forme de données, d'informations et de modèles associés.

Il représente, aussi fidèlement que possible, mais pas plus que nécessaire, l'état et le comportement de l'objet. Il constitue également un outil d'analyse et de prédiction et de suivi du comportement de l'objet. Cet objet peut-être en cours de conception (il n'existe donc pas physiquement), de fabrication, d'utilisation (la phase de son cycle de vie au cours de laquelle le terme « jumeau » est le plus adapté, le jumeau numérique étant effectivement un « double » de l'objet physique), ou en fin de vie. Quatre dimensions principales du jumeau méritent d'être distinguées :

- Le jumeau est un ensemble de modèles et d'interfaces virtuelles permettant de **tester des options de conception, de fabrication, d'usage, ou de fin de vie**. Il permet ainsi d'évaluer *a priori* les conséquences de nombreux choix possibles sans faire des prototypes en nombre ni effectuer de tests physiques longs, coûteux ou risqués. Il permet aussi de prédire les échecs et pannes potentiels de l'objet, bien avant leur occurrence et de tester des moyens de les éviter ou d'en réduire les conséquences. Il peut aussi être utilisé à des fins de formation.

- Le jumeau est un ensemble de données et modèles **reflétant l'état présent et l'histoire de l'objet**. La confrontation du jumeau aux données de test permet de valider le jumeau, et au besoin de le recaler (par assimilation de données ou apprentissage).

- Le jumeau constitue une **référence qui définit un comportement attendu**, que l'on peut comparer au comportement de l'objet réel. Ceci permet de détecter des erreurs ou des problèmes qui affectent le fonctionnement de l'objet réel, ou bien, inversement et selon le contexte d'utilisation, des défauts d'ajustement du jumeau numérique.

- Le jumeau est un **outil d'accès à l'objet**, dont l'administration et le contrôle à distance sont facilités par des APIs (*Application Programming Interfaces*) appropriés.

Le jumeau numérique repose sur la modélisation et la simulation de l'objet ou du système. Dans le cas de systèmes gouvernés par les lois de la mécanique, de l'aérodynamique, de la thermique, de l'électricité, etc., la base centrale est alors la physique et ses lois modélisées par le calcul scientifique. Pour la ville intelligente et son volet « mobilité », des modèles de transport sont au cœur de la conception d'évolutions du réseau de transport et de la régulation des flux en opération. Il en est de même pour les réseaux d'eau, d'énergie, ou de télécommunications. Pour la pharmacie, on trouve des modèles de chimie organique à l'équilibre, ou dynamiques. Les déclinaisons sont donc variées.

Mais avant que d'arriver à ces descriptions fidèles des systèmes, des avant-projets doivent être explorés et un cahier des charges établi, c'est le domaine du génie système (*system engineering*). Le terme plus explicite de *Model Based System Engineering* (MBSE) indique que divers types de modèles sont manipulés. Auxquels, il faut adjoindre des données, souvent en masses bien plus considérables avec la montée en puissance de l'IA.

Dans la courte description qui suit (colorée « systèmes industriels »), on passe en revue ce que tous ces concepts cachent.

4.2. Modèles multiéchelle ; continuité numérique

Pour le cas des systèmes qui correspondent à des produits, il y a plusieurs échelles de modélisation :

Modèle physique détaillé :
Cela consiste en la modélisation physique et multiphysique, en général par EDP (équations aux dérivées partielles). Ces modèles sont utilisés depuis longtemps : mécanique, aérodynamique, thermique, etc., et leur couplage.

Modèle condensé (*surrogate*)
Cela se rapproche du niveau précédent. Il s'agit, si l'on reste en EDP, de réduire le nombre de mailles. Ou bien de condenser le modèle par des méthodes d'analyse numérique (utilisation des valeurs singulières). Ou encore de s'abstraire de détails « du second ordre » en simplifiant (par exemple en linéarisant) les modèles. Plus récemment, on construit des *surrogates* en utilisant des techniques d'intelligence artificielle (réseaux de neurones), soit parce qu'un modèle physique détaillé n'est pas disponible, soit parce que son utilisation est trop complexe ou coûteuse. En conception, on peut ainsi utiliser un modèle « appris », plus simple, mais moins précis que le modèle physique, pour tester de multiples options (par exemple, en quelques secondes), puis utiliser le modèle physique détaillé pour affiner les résultats des options que l'on s'apprête à retenir, tout ceci avant de fabriquer et de tester l'objet physiquement.

Modèle individualisé, résultat d'un recalage sur des données de test
Ce point est central pour le futur du MRO (opération et maintenance conditionnelle) ainsi que le suivi d'intégrité (*health monitoring*) et le CND (contrôle non destructif). Mais aussi pour la fabrication. Un cas remarquable est celui de la fabrication additive, qui utilise les modèles deux fois : pour la conception de la pièce et la satisfaction des objectifs de performance mécanique, thermodynamique, etc., mais aussi pour la fabrication ou la calibration du processus de fabrication (avec une mise au point s'appuyant sur données et modèles).

C'est le domaine des ingénieurs métiers, qui connaissent la physique de leurs objets et savent la représenter mathématiquement et combiner modèles et données, au bon niveau de détail pour l'application considérée.

Modèle physique simplifié

Ce niveau est manipulé par une autre population, les automaticiens, ou bien par les équipes chargées de l'avant-conception et de l'exploration d'architectures (sauf pour les « petits » composants tels que des capteurs ou certains process de la fabrication, où les mêmes ingénieurs font tous les niveaux).

Ce sont des modèles dits « 0-D » (de type équations différentielles, et non pas équation aux dérivées partielles). Ils sont utilisés par les automaticiens pour concevoir leurs contrôles. Ils se doivent de refléter les comportements physiques qualitativement et quantitativement autant que faire se peut.

Ce sont aussi des modèles quasi statiques en dimension finie, pour les phases très amont de dimensionnement des architectures système (équilibres multiphysiques sous forme de lois macroscopiques).

Souvent on adjoint les lois de contrôle au jumeau physique, voire un modèle du logiciel ou même de l'architecture de calcul qui implémente ces lois de contrôle. On peut même développer un modèle représentant la nature distribuée du système.

Le cas des jumeaux numériques du vivant

Bien entendu, les jumeaux numériques du vivant utilisent une représentation à plusieurs échelles, de nature différente des produits manufacturés que nous avons détaillés plus haut. Pour le cas du cœur[9], on retrouve l'usage d'échelles multiples, dont le niveau macroscopique est celui de la pompe en boucle fermée sur la circulation sanguine, tandis que les niveaux fins vont s'intéresser à l'interaction entre fibres musculaires et excitation électrochimique. Le jumeau numérique est aussi central dans la confection

9 Voir par exemple https://www.inria.fr/fr/jumeau-numerique-coeur-dossier-sante-innovaheart

et l'ajustement des prothèses. Dans le domaine des jumeaux numériques pour les cohortes (utilisées dans les essais cliniques), on est confronté à des questions éthiques[10]. Et c'est une problématique que l'on rencontre aussi dans les jumeaux numériques pour les villes[11] (*smart cities*).

Continuité numérique

Il y a une vraie difficulté à naviguer entre les différents niveaux ou les différentes échelles que nous avons listées : le passage de l'un à l'autre n'est ni systématique ni automatisable en général. Assurer ce passage de manière fondée constitue la « continuité numérique » (*digital continuity*). Si des méthodes mathématiquement fondées existent au sein de physiques particulières (mécanique, vibrations, thermique…), la continuité numérique dans un cadre multiphysique reste une question largement ouverte, et donc prise en charge manuellement.

4.3. Combiner modèles, IA et données ; incertitudes

Incertitudes. Tous les modèles que nous avons évoqués ont en général besoin d'être qualifiés du point de vue des incertitudes : les signaux sont en général bruités, et les incertitudes concernant le modèle peuvent être importantes. L'estimation des incertitudes repose sur une utilisation conjointe des données et de la compréhension approfondie du modèle. Tout un corpus de méthodes a été développé depuis une cinquantaine d'années pour les cas où les modèles ont un « petit » nombre de paramètres, dans le domaine de la statistique *paramétrique*. On sait ainsi apprendre de petits modèles boîte-noire (par exemple, linéaires), on sait valider un modèle au regard de données mesurées (pour le qualifier ou le rejeter), on sait enfin évaluer la conformité d'un modèle au comportement en cours, à des fins de surveillance et diagnostic[12]. La statistique *non paramétrique* (portant sur l'estimation

10 Voir par exemple le rapport gouvernemental : Fédérer les acteurs de l'écosystème pour libérer l'utilisation secondaire des données de santé

11 Voir par exemple https://blog.3ds.com/fr/industries/cities-public-services/smart-city-le-jumeau-virtuel-comme-une-reponse-aux-defis-de-societe/

12 L. Ljung : System Identification : *Theory for the User.* Prentice Hall, 1999. ISBN 9780136566953. Voir aussi A. Benveniste, M. Métivier, P. Priouret : Adaptive Algorithms and Stochastic Approximations. Springer Verlag. 1987. ISBN 9783540528944

directe de distributions de probabilité) a vu éclore dans les années 1990 des approches entièrement basées sur les données (le *bootstrap*[13]). Rien de ceci ne s'applique directement aux modèles de type réseau de neurones profond, lorsque le nombre de paramètres du réseau avoisine, voire excède, le nombre de données. Ceci reste un défi pour la recherche.

IA hybride. Il existe plus généralement un lien intime entre modèles, données et IA, dans ce qu'on appelle l'*IA hybride*, qui tire avantage à la fois des données et des connaissances a priori sur la physique sous-jacente.

Pourquoi utilise-t-on l'IA dans les jumeaux numériques ? Les usages sont multiples.

Tout d'abord, l'IA hybride 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 neurones 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.

Ensuite, on souhaite développer des modèles au plus juste (*at scale*). 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 plus riches et plus efficaces.

L'IA générative a aussi sa place. Les modèles de type LLM (cf. ChatGPT) peuvent 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).

La capture de modèles 3D d'îlots de machines ou d'usines complètes à partir d'image de caméras ou de captures Lidars (qui se sont démocratisés) révolutionne l'utilisation des jumeaux numériques dans la fabrication.

13 A.C. Davison, D.V. Hinkley : *Bootstrap Methods and their Application.* Cambridge University Press, 1997. https://doi.org/10.1017/CBO9780511802843

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'entrainer le modèle en boucle continue, faisant du jumeau numérique un outil de pilotage du réel ; on parle alors de jumeau numérique *à chaud*.

4.4. Combiner diverses vues ; synchroniser

Dans cette section, le terme « synchroniser » signifie « mettre en cohérence ».

Synchroniser les différentes vues dans les phases amont de la conception

Le jumeau intègre de multiples vues sur le même objet (le « système »), même s'il est considéré à différents stades de maturité. Il y a donc forcément des synchronisations nécessaires entre elles. Très en amont dans la conception du système, les vues suivantes interagissent, y compris sur le plan sémantique (les modèles mathématiques sous-jacents).

L'architecture système (ou *organique*) consiste en une base de données des sous-systèmes et composants, avec leurs relations d'inclusion, de dépendance, et leur ontologie. C'est ce qui est géré par le PLM (*Product Lifecycle Management tool*). Le PLM est la dorsale du jumeau numérique ; il est le point d'entrée de l'interaction avec l'utilisateur et lui permet de naviguer dans les différentes vues qui constituent le jumeau. Il est complété par une architecture organique de nature descriptive, aussi appelée architecture système. Le standard SysML a été conçu depuis les années 1990 pour pouvoir échanger et faire interopérer des vues différentes d'un système ou des vues de sous-systèmes ou composants différents. Il faut donc pouvoir synchroniser les niveaux SysML (qui décrit l'abstraction architecturale) et les vues plus détaillées du jumeau numérique.

L'architecture fonctionnelle est une version abstraite, très simplifiée, de ce que l'on met dans le jumeau numérique. Elle couple en général un modèle simplifié du logiciel embarqué avec un modèle très simplifié de la physique. Pour les systèmes manufacturés, on y met les modes de marche et l'automate

(ou *statechart*) qui décrit leurs enchaînements et on omet tout ce qui est plus détaillé, en temps ou en espace.

Les cas d'usage (*use cases*), décrits par des formalismes de type scénario (*Message Sequence Charts*…), décrivent l'interaction entre le système et son ou ses utilisateur(s).

L'analyse de sûreté (*safety analysis*) est, en gros, l'analogue du jumeau numérique pour la dimension sûreté[14]. Ce modèle décrit de manière abstraite les défaillances et pannes et leur propagation dans le système, selon ses vulnérabilités. Il existe différents types de modèles, plus ou moins simples ou puissants. Les plus connus sont les arbres de défaillance ; c'est le modèle le plus élémentaire et le plus fréquemment utilisé ; mais lorsque les évolutions au cours du temps sont importantes, on leur préfère les modèles à chaines de Markov en interaction. La *cybervulnérabilité* (aussi appelée en français *analyse de sécurité*) est proche, par sa nature, de la vue précédente, mais elle s'intéresse aux vulnérabilités vis-à-vis des attaques de type cyber.

Aux vues ci-dessus s'ajouteront, de plus en plus, les *analyses de performance énergétique et/ou temporelle*. Pour savoir, par exemple, quel composant du système est le goulot d'étranglement. Cet aspect est encore futuriste (surtout en ce qui concerne l'énergie), mais pourrait devenir important dans le futur, jusqu'à couvrir des *tickets-carbone* si une *TVA-carbone* voit le jour.

Toutes ces vues ne sont pas totalement indépendantes : quand le concepteur en modifie une, cela peut en impacter d'autres. Il est alors indispensable, soit d'automatiser la propagation de ces impacts (ce qui est souvent infaisable), soit de les tracer aussi finement que possible (à l'aide d'hyperliens) afin d'identifier au plus juste les interventions manuelles requises sur les autres vues pour rétablir la synchronisation.

14 Voir par exemple : Comparison of modeling formalisms for Safety Analyses: SAML and AltaRica.

Synchroniser modélisation système et jumeau numérique

Prenons le cas des *lignes de produits*. Ce sont des variantes d'assemblages de composants pour fabriquer des déclinaisons d'un système selon les contextes d'utilisation. Dans le cas de l'aéronautique, c'est le cas pour les intérieurs cabine, les câblages, mais peut-être aussi pour les moteurs ou les trains d'atterrissage. Ces lignes de produits sont gérées, à un haut niveau, dans le PLM, donc en privilégiant l'aspect base de données. Mais l'on peut vouloir, par exemple, avoir un modèle recalé de chaque individu à des fins de surveillance d'intégrité (*health monitoring*), ou concevoir le contrôle de chacune des variantes de la ligne de produits. Le jumeau numérique est alors intimement relié à l'aspect ligne de produits.

Synchroniser les différents acteurs de l'entreprise étendue

Les secteurs des systèmes critiques sont constitués de très grands systémiers en petit nombre (aéronautique : Airbus, Boeing), de quelques sous-traitants de premier niveau (aéronautique : Safran), puis d'une large population de sous-traitants plus spécialisés. Aucun de ces acteurs ne maitrise la globalité du système. Mais chacun a son rôle et voit tout ou partie du système, avec le niveau de détail qui lui est approprié. Pour qu'un bon système soit conçu puis suivi dans son cycle de vie, il faut *synchroniser* les vues de chacun. Or, les aspects vus par les différents acteurs diffèrent, et en plus différents acteurs peuvent utiliser différents outils de jumeaux numériques. L'entreprise étendue ainsi constituée doit pouvoir tout à la fois partager des données (en particulier pour que l'IA puisse être utilisée), et partager et synchroniser des jumeaux numériques.

Synchroniser différentes vues est un métier

C'est comme dans un montage électrique ou de plomberie : il faut tout à la fois connecter les bons fils ou les bons tuyaux (la syntaxe), en tenant compte de ce qui y circule (la sémantique). Les niveaux de modélisation plus précis imposent des contraintes à ce qu'on peut faire comme assemblage au niveau d'architecture système. Le concepteur peut les avoir en tête, de façon non formalisée ; il peut aussi être utile d'encadrer cette activité. Par exemple en remontant dans les modèles SysML des informations de typage

des interfaces, dont la mathématique est issue des modèles de jumeau numériques sous-jacents[15].

L'idéal à viser est que, dans une vision système, les vues détaillées du jumeau numérique soient, autant que faire se peut, engendrées automatiquement à partir du niveau SysML (architecture et fonctionnel principalement) et des vues détaillées associées aux composants. C'est le seul moyen d'éviter qu'un assemblage conçu à la main ne recèle des vices plus ou moins cachés, mais réels. De ce point de vue, le standard FMI/FMU pour l'interconnexion de jumeaux numériques à des fins de co-simulation est un élément important, soutenu et suivi par quelques grands éditeurs.

4.5. Combiner virtuel et réel ; le métavers industriel

Le métavers des jeux est en plein essor depuis des années. Son développement entraîne celui du métavers industriel, même si ce dernier est en retard. Le métavers industriel offre une capacité de développer des systèmes hybrides « humain + machine » en accélérant les temps de mise au point (cf. Tesla). Autre exemple, les jumeaux numériques des procédés de fabrication permettent à la fois de tester les performances attendues et de vérifier l'ergonomie et la praticité des opérations de maintenance. Le métavers industriel est une technologie du présent et du futur, qui évolue constamment.

4.6. Rendre les jumeaux numériques accessibles ; *low-code/no-code*

Le domaine des jumeaux numériques est riche d'une multiplicité de formalismes et de techniques, dont beaucoup sont difficiles d'accès pour une maitrise approfondie. 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 maitriser. Pour beaucoup d'entre eux (et en France, on peut en particulier

15 Il y a des cas difficiles. Ainsi, mettre un modèle Simulink dans chaque boîte SysML en général (facilité offerte par certains outils de MBSE) ne donne pas en général un modèle Simulink correct pour le système. En effet, un composant donné peut admettre des modèles Simulink différents selon le contexte où on l'utilise. Il existe d'autres chausse-trappes dans le même esprit…

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, et plus généralement tout utilisateur potentiel n'ayant pas vocation à devenir expert. Il explique en grande partie la faible pénétration des jumeaux numériques en France, largement limitée aux grands comptes disposant en interne d'une maitrise approfondie de ses différents piliers technologiques et scientifiques.

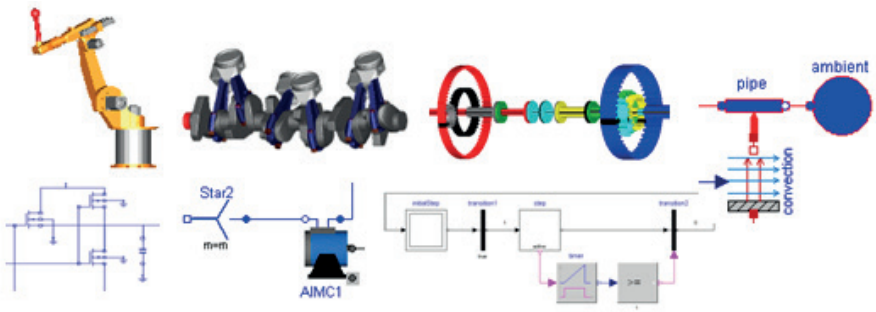
Pour combler ce déficit, pour donner largement accès à l'usage des jumeaux numériques, il faut absolument développer l'offre *low-code/no-code* pour les jumeaux numériques. Qu'offre-t-on de plus lorsqu'on offre le *low-code/no-code* ? 1/ La possibilité de construire des modèles de système à coût réduit (sans maitrise de la technologie de modélisation), ouvrant ainsi la technologie des jumeaux numériques à un panel élargi d'utilisateurs. 2/ L'infrastructure pour bâtir un *marché du jumeau numérique*, dans lequel, au sein des chaines OEM/sous-traitants, les composants et sous-systèmes peuvent être proposés accompagnés de leur jumeau numérique, permettant ainsi à l'intégrateur des conceptions exploratoires de systèmes.

De quoi s'agit-il, techniquement ? Il s'agit de la possibilité de construire des jumeaux numériques par assemblage de composants tirés de bibliothèques de modèles. On dira que c'est là une exigence classique dans le domaine du génie logiciel et du génie système. Mais la modélisation physique présente des difficultés inédites, inconnues jusqu'alors dans le génie logiciel.

Nous expliquons en annexe 8.1 pourquoi offrir le *low-code* soulève des difficultés de fond.

L'exemple du langage Modelica

Pour les modèles possédant un état de dimension finie (les modèles utilisant des équations aux dérivées partielles ne sont donc pas couverts), Modelica apporte une réponse tout à fait élégante pour le *low-code/no-code*, sous la forme d'une programmation graphique où les modèles sont simplement assemblés.



Ainsi, la figure ci-dessus[16] présente différents modèles Modelica offerts en bibliothèque. Ils peuvent avoir la forme d'un diagramme, d'un graphe de pictogrammes représentant des éléments de base, voire même, quand on s'adresse à un contexte physique particulier, une architecture ayant l'apparence d'un système physique complexe ; tous ces modèles partagent le même type de représentation interne textuelle, standardisé. C'est un exemple parfait de *low-code/no-code.* Du point de vue de l'informaticien, on peut donc voir Modelica comme un formalisme offrant la réutilisabilité des modèles, et prenant en charge la génération de code de simulation, ce qui demande des transformations non triviales du programme, depuis le code source jusqu'au code final. La compilation de Modelica combine ainsi intimement des savoir-faire mathématique et informatique ; elle présente effectivement des difficultés de fond, comme indiqué plus haut.

16 https://github.com/modelica/ModelicaStandardLibrary/blob/master/Modelica/Resources/Images/UObjectifsersGuide/ModelicaLibraries.png

Chapitre 5

Plateformes, standards, écosystèmes

5.1. Plateformes

S'agissant des jumeaux numériques, le concept générique de plateforme se décline de multiples façons.

5.1.1. Plateformes hôtes

La première déclinaison prend le point de vue de l'utilisateur, ou plutôt du collectif concourant au développement d'un jumeau numérique pour une gamme de systèmes. Chaque acteur du collectif contribue, sur la base de son savoir-faire technique, au suivi du cycle de vie de tout ou partie du système. Pour cela il manipule données et modèles en rapport avec la vue du système qui lui est nécessaire pour son travail. **Une *plateforme* est alors nécessaire pour héberger et synchroniser les données et modèles en offrant une assistance puissante et une interaction utilisateur optimisée et contrôlée** (pour protéger les IP des différentes entités du collectif). Trois exemples de plateforme en ce sens (il y en a d'autres) sont 3D-EXPERIENCE[17] de 3DS, Xcelerator[18] de Siemens, et Ansys Twin Builder[19]. Par ailleurs, la multiplicité des vues et le besoin de les synchroniser deviennent suffisamment

17 https://www.3ds.com/fr/3dexperience : « Découvrez comment l'utilisation d'une plate-forme unique pour l'ensemble de votre entreprise vous aide à repenser les produits et les expériences, et à redéfinir les processus et les opérations métier.»

18 https://www.sw.siemens.com/en-US/digital-transformation/ : *"Siemens Xcelerator – Software for Industry gives you the tools to accelerate digital transformation. Learn how to create the most comprehensive digital twin with our software portfolio, combining the real and digital worlds like never before."*

19 https://www.ansys.com/products/digital-twin/ansys-twin-builder : *"Hybrid digital twins enable system design and optimization and predictive maintenance, and they optimize industrial asset management."*

importants pour que les évolutions récentes des plateformes de jumeaux numériques intègrent, tout à la fois, le volet jumeau numérique proprement dit (modèles et données) et l'infrastructure de conception système (PLM et aspects architecturaux).

5.1.2. Plateformes cadres de modélisation (*frameworks*)

La seconde déclinaison est vraiment spécifique du domaine des jumeaux numériques. Certains aspects du système requièrent, pour leur modélisation, des *frameworks* élaborés qui deviennent autant de plateformes, au-dessus desquelles des kits de modélisation peuvent être construits, pour une physique spécifique (thermodynamique, mécanique…). Le domaine des jumeaux numériques est riche de cette déclinaison, et nous en analysons quelques exemples.

Le premier est Modelica[20]. Modelica est un standard pour un langage de modélisation de systèmes multiphysiques pouvant, additionnellement, supporter la modélisation du logiciel attaché. Il en existe une implémentation *open source*, OpenModelica, et plusieurs implémentations commerciales (dont une dans 3D-EXPERIENCE). Dans un créneau très proche se situent aussi Simulink/Simscape de Mathworks et Amesim, partie de SimCenter de Siemens. Chacun de ces langages offre le « low code/no code » par le biais d'une interface d'assemblage de sous-modèles (graphique ou textuelle, au choix). Y sont attachés des écosystèmes de boîtes à outils, voir ci-après.

Le second exemple concerne la modélisation de workflows d'entreprise ou interentreprises, éléments clés pour les processus de suivi du cycle de vie d'un système.

20 https://modelica.org/ : «*Modelica is an object oriented language to model cyber-physical systems. It supports acausal connection of reusable components governed by mathematical equations to facilitate modeling from first principles.*» Modelica supporte une modélisation à base de DAE (Équations différentielles, Algébriques, a-causales) et d'automates.

Le standard pour ce type de modélisation est BPMN (*Business Process Model and Notation*[21]), un modèle d'obédience Réseaux de Petri. BPMN est un standard qui est supporté par plusieurs plateformes.

5.1.3. Plateformes d'infrastructure : données, composants IA, *cloud*

Les jumeaux numériques sont concernés par d'autres types de plateformes, plus génériques : infrastructures *cloud*, partage de données, infrastructures, IA… On peut distinguer les catégories suivantes.

- Les packages et outils génériques pour l'IA : PyTorch, TensorFlow, etc.; MLFlow…; Python…; Docker, openAPI…, GitHub et GitLab. Nous ne développons pas, rien de spécifique aux jumeaux numériques à ce stade, il s'agit de l'outillage pour le *machine learning*.

- LLM (*Large Language Models*) et plus généralement l'IA générative trouvent maintenant leur place dans les phases de création des jumeaux numériques. Les LLM ouverts sont préférés (*HuggingFace*), car ils se prêtent mieux à une intégration dans une plateforme plus large. Plus spécifiquement orientées jumeaux numériques sont les SLM (*Specialized Language Models*), qui accompagnent la spécialisation de LLM pour des domaines particuliers, dotés de données d'apprentissage en quantité plus réduite.

Pour autant que l'on sache, **il existe peu de développements de ce type de plateforme qui ciblent de manière spécialisée les jumeaux numériques, en mêlant intimement données et représentations de type modèle** (nous avons connaissance de développements 3DS en ce sens).

21 https://www.bpmn.org/ : *A standard Business Process Model and Notation (BPMN) will provide businesses with the capability of understanding their internal business procedures in a graphical notation and will give organizations the ability to communicate these procedures in a standard manner. Furthermore, the graphical notation will facilitate the understanding of the performance collaborations and business transactions between the organizations. This will ensure that businesses will understand themselves and participants in their business and will enable organizations to adjust to new internal and B2B business circumstances quickly.*

En revanche, tous ces outils et *frameworks* sont aujourd'hui incontournables dans les grandes plateformes dédiées aux jumeaux numériques (3DS, Siemens…).

5.1.4. Caveat sur la plateformisation des jumeaux numériques

Le terme de « plateformisation » recouvre donc des développements vraiment différents de ceux qui viennent à l'esprit quand on pense à la « plateformisation des services » (Uber, Airbnb…). Et ce, même si certaines des grandes plateformes pour utilisateurs sont accessibles en mode XaaS (*as a service*). Si, parmi les types de plateforme, le premier et le troisième relèvent du domaine du génie logiciel (*software engineering*), le second est de nature profondément différente : ses langages présentent des difficultés sémantiques de fond et sont ou ont été l'objet d'activités de recherche importantes.

5.2. Standards

Le concept de standard reflète, par sa diversité, celui des plateformes.

- Il y a des standards pour certains des langages de modélisation évoqués ci-dessus (Modelica, BPMN…).

- Il y a aussi des standards d'interconnexion (ou d'interopérabilité). Le standard FMI/FMU pour l'interconnexion de jumeaux numériques à des fins de co-simulation en est un exemple important, soutenu et suivi par quelques grands éditeurs.

- Les jumeaux numériques sont enfin également concernés par les standards contribuant à l'interopérabilité, nous ne développons pas plus ce point qui ne leur est guère spécifique.

5.3. Écosystèmes

L'écosystème du domaine des jumeaux numériques se compose d'acteurs de divers types (qui peuvent se recouvrir) :

Les grands éditeurs de plateformes hôte

Nous en avons cité quelques-uns : 3DS et Siemens en Europe, Ansys[22] et Mathworks aux USA. Si on est moins exigeant sur le volet modélisation et simulation numériques, alors la palette s'élargit : IBM a une offre de PLM et d'outil SysML.

Les fournisseurs de services d'ingénierie

Par service d'ingénierie, on entend ici la co-construction de jumeaux, conjointement entre le fournisseur de services et l'industriel ou l'administration qui a besoin d'un jumeau numérique. Cette co-construction peut en outre, lorsque les difficultés le demandent, impliquer des chercheurs d'équipes académiques (c'est, par exemple, le cas pour la co-construction des jumeaux numériques du cœur).

Certains grands éditeurs se positionnent dans cette catégorie, soit par la co-construction directe des jumeaux (3DS), soit par une politique de boîtes à outils de partenaires développées au-dessus d'une plateforme de modélisation (Matlab-Simulink chez Mathworks, ou Modelica chez 3DS).

Il existe aussi des acteurs spécifiques, qui élargissent alors leur service pour inclure les aspects architecture et hardware ; Schneider-Electric[23] en est un exemple.

22 Récemment acquis par Sinopsys

23 Voir le bandeau « solutions » dans https://www.se.com/fr/fr/

Les développeurs de bibliothèques de modèles au-dessus des plateformes
Les plateformes de modélisation permettent le développement de bibliothèques de modèles pour des domaines spécifiques. Des écosystèmes de sociétés conduisant ce type d'activité, en général accompagné de services d'assistance à la création de modèles, se sont développés autour des différentes plateformes de modélisation.

Les utilisateurs de jumeaux numériques par le biais de co-développements
Il s'agit du miroir des activités indiquées plus haut. Certains utilisateurs ont les compétences pour s'affranchir des services de conseil.

Les chercheurs
Comme il a été indiqué, ces écosystèmes sont complétés par des acteurs des différents domaines de recherche, en référence au domaine applicatif ciblé ou au domaine technique de modélisation.

Chapitre 6

Questions et observations

Nous passons en revue quelques questions qui nous paraissent importantes et spécifiques du sujet.

6.1. Enjeux

La maîtrise des jumeaux numériques à grande échelle est un atout compétitif majeur pour la réalisation des grands systèmes de demain (*manufacturing*, énergie, urbanisme matériaux, chimie, santé, etc.).

Les jumeaux numériques sont composables et peuvent s'assembler en systèmes de systèmes. Il faut donc penser interfaces (API, protocoles, lois de composition), architectures modulaires (SaaS, jumeaux composables), plateformes, et écosystèmes. L'ingénierie modulaire des jumeaux est nécessaire pour réaliser de grands systèmes. C'est le sujet le plus important pour l'accélération du *Digital Manufacturing*. Dans un contexte de collaboration en entreprise étendue, le jumeau numérique constitue une plateforme de collaboration. Le jumeau numérique et l'observation distribuée de la simulation constituent ensemble un outil remarquable pour comprendre et partager le fonctionnement des systèmes complexes.

La distribution de l'intelligence (le *machine learning* dans les moteurs, les robots élémentaires ou les caméras) implique que la coordination globale est plus complexe. La coordination d'un réseau hiérarchique de systèmes de systèmes intelligents nécessite absolument des jumeaux numériques.

À l'ère de l'économie de plateforme, on comprend que des plateformes qui permettent la génération de jumeaux numériques ainsi que leur opération constituent les socles stratégiques des filières industrielles. Il s'agit donc d'un enjeu majeur de compétitivité pour la France et l'Europe. L'Europe doit développer une vision écosystème, autour d'acteurs majeurs qui jouent

un rôle d'agrégateur, et d'acteurs innovants qui développent de nouveaux composants.

6.2. Confiance et éthique

Contrairement à d'autres types d'infrastructure comme les réseaux sociaux et les cryptomonnaies, les jumeaux numériques ne représentent pas, en tant que tels, des défis éthiques pour nos sociétés.

Mais, dans la mesure où ils constituent une représentation du réel, ils posent d'emblée la question de la **confiance** qu'on peut avoir en eux. On retrouve ainsi toutes les problématiques de la confiance autour de l'IA : qualité technique et éthique des données, qualité de l'apprentissage, évaluation des incertitudes. S'y ajoute la problématique 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 *smart grids*. Dans de tels cas, la confiance ne peut que 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.

Enfin, par leur rebouclage permanent sur le réel, les jumeaux numériques « à chaud » (Section 4.3) posent en outre des questions juridiques de **responsabilité** (tout comme les systèmes autonomes en général).

6.3. Barrières technologiques et « vendor lock-in »

Il faut distinguer les secteurs où l'usage des jumeaux numériques est bien installé, et les extensions plus récentes à de nouveaux domaines ou secteurs (la santé étant un exemple où l'entrée en lice est plutôt récente, une dizaine d'années environ).

Pour les secteurs « senior » sur cette technologie, quarante ans d'investissements et d'expérience[24] constituent une barrière considérable. Les aspects de plateforme tels que nous les avons analysés plus haut en constituent une autre : là comme ailleurs, le gagnant emporte la mise (pas tout, mais une bonne part). Si l'on regarde de plus près les aspects *plateforme*, et particulièrement *framework de modélisation*, et si l'on se penche sur quelques histoires, on voit que les événements clés ont été les suivants :

- Le modeleur géométrique CATIA (années 1970) a constitué une première plateforme de CAD[25]-3D, à partir de laquelle 3DS a construit sa croissance.

- Le langage Matlab de programmation matricielle (fin des années 1970), suivi de la parution de la plateforme Simulink (début des années 1990) ont été les germes du succès de Mathworks, qui a su y associer des innovations en termes d'écosystème grâce à sa politique partenariale de boîtes à outils.

- Modelica, dont le premier standard remonte à la toute fin des années 1990, a ses racines dans les travaux des automaticiens de l'université de Lund en Suède, au tout début des années 1980, voire dans les travaux sur les bond graphs dans les années 1970.

Sur chacun de ces événements, un acteur industriel (ou un tout petit nombre d'entre eux) a construit une stratégie qui a pu s'élargir jusqu'à voir émerger un grand compte des jumeaux numériques. Chacun de ces événements constitue une barrière technologique singulièrement haute, dont la nature est tout autant mathématique que relevant du génie logiciel.

Voilà pour les secteurs du manufacturier et de la défense. Pour les secteurs santé et ville/mobilité, la plupart des technologies de modélisation mises au point pour le secteur manufacturier sont recyclables et réutilisables, mais des événements nouveaux peuvent (et pourraient) se produire, qui joueraient, pour ces secteurs, un rôle analogue à ceux que nous avons cités.

24 Quarante ans si l'on fait remonter la genèse à la création de CATIA, plus encore si l'on suit l'histoire selon la NASA.

25 *Computer assisted design*, CAO conception assistée par ordinateur en français.

S'agissant du rôle éventuellement perturbateur que pourrait jouer l'IA dans les jumeaux numériques, et si l'on pense au coup de pied dans la fourmilière que l'IA générative a constituée dans les domaines de l'image et du langage, il est peu probable qu'un nouvel acteur du domaine de l'IA puisse bousculer tout le capital déjà accumulé. Le recours à l'IA dans la construction et l'utilisation des jumeaux numériques est, pour l'essentiel, combiné au calcul ou dans la création de scripts pour exploiter ou nourrir le jumeau, il ne le remplace pas.

En conclusion :

- La naissance de grands acteurs s'est faite, principalement, à l'occasion de l'émergence d'une nouvelle plateforme de modélisation. Ceci a plus de chances de se reproduire dans les secteurs jeunes sur le sujet des jumeaux numériques (santé, ville).

- Des ruptures sur tel ou tel volet technologique spécifique intervenant dans les jumeaux numériques se produisent et se produiront régulièrement ; c'est dans ce cadre que l'IA prend peu à peu une place croissante. Cet état de fait est bien identifié par les grands acteurs qui pratiquent une politique de veille serrée et d'acquisitions. Mais on ne s'attend pas vraiment à voir surgir du néant de nouveaux acteurs, comme on le voit dans le secteur GAFAM.

Toutefois :

- Pour des raisons de géopolitique industrielle, un état pourrait toutefois considérer que les jumeaux numériques constituent une technologie clé, et vouloir s'assurer une souveraineté sur cette technologie[26]. Ce qui pourrait invalider les points précédents.

- Par leurs développements plus récents, les jumeaux numériques modifient en profondeur, voire bousculent impunément l'organisation et les processus interentreprises. La barrière technologique que représente l'usage et la maitrise des jumeaux numériques n'est pas si considérable (grâce, précisément, au *low-code/no-code*). Aussi l'usage et la maitrise

26 Toutefois nous n'avons pas connaissance d'éléments allant dans ce sens (pas encore ?).

des jumeaux numériques peuvent occasionner l'irruption de nouveaux venus dans des secteurs variés (industrie, santé, ville…), grâce à une rupture sur le modèle d'entreprise que ces jumeaux numériques permettraient.

La situation concernant les « vendor lock-in » reste ouverte. Grâce aux standards dont nous avons parlé, des avatars *open source* de certaines plateformes de modélisation existent (OpenModelica, Scilab,…). En combinant ces technologies *open source* avec les standards d'interopérabilité, on peut (et cela se fait) créer un écosystème et un fonds technologique qui permettent de contourner le *vendor lock-in*. Toutefois, les difficultés technologiques mentionnées plus haut rendent difficile, voire quasi impossible, l'obtention *ex nihilo* d'une plateforme de qualité pour les jumeaux numériques. L'IA renforce encore cette difficulté, car les solutions utilisant l'IA reposent souvent sur des savoir-faire cachés et propriétaires. Toutefois, l'IA générative pourrait bouleverser cet état de fait, mais comment cela se fera n'est pas encore clair.

6.4. La France et l'Europe dans la compétition internationale

6.4.1. De grands acteurs dans l'ingénierie : Siemens, Schneider-Electric…

Certains de ces acteurs, par exemple Schneider Electric, sont à la fois fournisseurs de produits, de services, et de logiciels. Des jumeaux numériques sont utilisés et conçus dans le cadre de ces différentes activités, essentiellement en interne pour la conception et la gestion de produits, en interne et externe (notamment via des partenaires) pour les services. Les logiciels de jumeau numérique peuvent être vendus séparément ou intégrés à des solutions vendues à ses clients. Voici, à titre d'exemple, des informations relatives à Schneider Electric :

– « EcoStruxure™ Machine Expert Twin » est une solution logicielle de jumeau numérique pour gérer l'ensemble du cycle de vie des machines. Ce logiciel permet aux OEM de créer des modèles numériques de machines réelles afin qu'elles puissent être conçues et mises en service virtuellement avant de construire la machine elle-même.

- Dans le domaine de la distribution électrique, le logiciel ETAP est utilisé pour concevoir, opérer et contrôler via un jumeau numérique des réseaux électriques locaux. Le service associé « EcoConsult Electrical Digital Twin » consiste à numériser le schéma « unifilaire » du client et à fournir une assistance continue à la maintenance du modèle. Il contribue à améliorer sécurité et fiabilité, à réduire les temps d'arrêt et à maintenir l'architecture du système électrique à jour. Le « Grid Digital Twin » est une solution de jumeau numérique de réseau, qui aide les services publics à surmonter les défis liés aux données.

- Dans le domaine de la conception et de la conduite optimisée de processus industriels, AVEVA fournit des solutions de création et d'intégration de jumeaux numériques.

- Enfin, parmi les travaux en cours, citons l'évaluation du cycle de vie des produits et la décarbonation : environ 95 % de l'impact environnemental des produits est déterminé dès la première étape de leur conception. Mesurer l'impact environnemental d'un produit tout au long de son cycle de vie nécessite des données complexes sur les matériaux, la masse, le volume, les apports énergétiques, les émissions et les déchets générés par un produit. Dès la conception, le jumeau numérique pourra servir comme une source unique de vérité, fournissant tous les attributs requis nécessaires.

6.4.2. De grands acteurs dans l'édition, avec une bonne place pour l'Europe et la France

En Europe, on a comme acteurs majeurs 3DS et Siemens. Ce sont tous deux des majors internationaux dans le domaine des jumeaux numériques, avec une présence mondiale prédominante, y compris aux États-Unis et en Chine.

Dassault-Systemes (3DS) fut créé par Dassault-Aviation sur le pari que la virtualisation serait fructueuse pour nombre de chaînes de valeur, et que les concepts de maquette numérique (*digital mockup*) et jumeau numérique seraient de puissants catalyseurs de transformations industrielles. Aujourd'hui, 3DS est une compagnie mondiale, avec 25 000 employés, 350 000 clients, 25 millions d'utilisateurs sur l'ensemble des continents.

3DS est leader mondial sur les jumeaux numériques pour les produits, la nature et le vivant[27]. 3DS est donc aujourd'hui un champion du domaine, un atout assez rare pour être souligné.

Suivant un positionnement analogue, Siemens propose la plateforme Xcelerator[28], également sous forme de SaaS, et plus spécifiquement pour l'activité de modélisation et simulation, l'outil Simcenter. La plateforme Xcelerator fédère une large palette d'outils pour le PLM, *Product Lifecycle Management* (Teamcenter).

Les USA disposent de deux majors avec Ansys (Sinopsys) et 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, tandis que Matlab est issu de la communauté des automaticiens. À ce tandem on peut rajouter 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.

27 Parmi les positions de 3DS, on note sa présence dans les activités suivantes : conception et fabrication de 9 avions sur 10 ; conception et fabrication de plus de 70 % des véhicules thermiques et de 85 % des véhicules électriques ; 3DS est impliqué dans plus de 80 % des projets de centrale nucléaire dans le monde ; il est impliqué dans la découverte, développement, et tests cliniques pour plus de 70 % des nouveaux médicaments, ainsi que dans la conception et fabrication de plus de 50 % des équipements médicaux.

28 Le site annonce : *Siemens Xcelerator – Software for industry gives you the tools to accelerate digital transformation. Learn how to create the most comprehensive digital twin with our software portfolio, combining the real and digital worlds like never before. Plus loin, The Comprehensive Digital Twin is more than just a bridge between the digital and real worlds. It's a way for progressive companies to stay ahead in a world where costs can skyrocket beyond scope and new product introduction windows are decreasing. It's a way to build the factory virtually first and ensure its safety and efficiency before pouring the foundation or turn your current facility into a more sustainable manufacturing plant.*

6.4.3. Une situation plus mitigée concernant l'usage des jumeaux numériques

Le domaine des jumeaux numériques est riche d'une multiplicité de formalismes et de techniques, dont beaucoup sont difficiles d'accès pour une maitrise approfondie. Les utilisateurs avertis que sont les grands industriels des secteurs critiques ont perçu l'importance de la technologie, et ont, en conséquence, développé les expertises et mis sur pied les équipes pour la maitriser. 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 maitrise approfondie de ses différents piliers technologiques et scientifiques. La situation est plus favorable dans l'Europe du Nord (en incluant le Benelux).

Chapitre 7

Conclusions et recommandations

Les jumeaux numériques représentent un outil critique pour nos industries d'aujourd'hui et de demain. Depuis une décennie environ, ils sont apparus comme un pilier central des industries du vivant.

Comme toutes les infrastructures importantes émanant du numérique, ils induisent des risques éthiques, par le seul usage qu'ils font de la modélisation et de l'IA. Mais, contrairement à d'autres infrastructures telles que les réseaux sociaux et les cryptomonnaies, ils ne sont pas, en tant que tels, porteurs de risques spécifiques.

Une fois n'est pas coutume, l'Europe et la France sont en pointe dans la compétition internationale. Elles sont donc en position de conduire le progrès scientifique et technique, et pas seulement la réglementation.

7.1. L'Europe et la France disposent de champions : il faut en faire un atout

Nous avons vu que Siemens et tout particulièrement 3DS sont des champions du secteur des jumeaux numériques. **L'Europe et la France doivent, tant au niveau étatique qu'au travers des associations industrielles pour les diverses filières, promouvoir une politique où les deux plateformes dominantes joueraient le rôle d'infrastructure de partage de données, modèles, et connaissances, pour les filières.**

7.2. Un *cloud* souverain européen est nécessaire

La disponibilité d'une infrastructure souveraine de *cloud* au niveau de l'Europe est essentielle (un « Airbus du *cloud* »). En l'absence d'une telle infrastructure, dès qu'un industriel met en jeu des données critiques, il est condamné au *Taylor made* ce qui coûte cher.

Le présent rapport ne peut que se joindre aux nombreux caveat qui alertent les autorités européennes et nationales sur ce sujet. Les politiques existantes doivent être renforcées en ce sens.

7.3. Accompagner le développement de cette technologie et sa pénétration

7.3.1. Élargir la population d'utilisateurs des jumeaux numériques (PME…)

Nous avons vu qu'il existe un fort déficit d'usage des jumeaux numériques. Bien entendu, les politiques tarifaires des grands éditeurs ont ici leur rôle à jouer[29]. Mais il y a aussi la question de la maitrise de la technologie et de la barrière d'entrée que cela représente. Nous avons vu en section 4.6 que l'approche *low-code/no-code* est un moyen central pour élargir drastiquement la population des concepteurs et utilisateurs de jumeaux numériques : nous en ferons donc un axe clé dans les recherches à favoriser.

Les éditeurs ainsi que les communautés *open source* doivent continuer à développer l'offre *low-code/no-code*, et à la renforcer.

7.3.2. Favoriser le développement d'un marché du jumeau numérique

Il faut bâtir un marché du jumeau numérique, dans lequel, au sein des chaines OEM/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.

29 Une note de 3DS précise à ce sujet : *Les PME représentent un marché qui a été spécifiquement adressé par 3DS depuis une dizaine d'années. En reprenant l'idée de Solidworks vs. CATIA (PME, ETI versus grands comptes), 3DS a adapté toute sa suite logicielle ainsi que sa plateforme avec une offre « 3DexperienceWorks » elle-même soutenue par un tissu d'entreprises capables de diffuser, accompagner et catalyser la transformation de ces sociétés. Tous les avantages apportés par les jumeaux numériques sont ainsi accessibles aux PME grâce au SaaS.*

Les difficultés fondamentales sont en fait les mêmes que pour l'objectif précédent : il s'agit de permettre une construction de jumeaux numériques par composants-modèle. Cet objectif peut, du point de vue technique, être étroitement jumelé avec le précédent. Sur le plan stratégique, il rejoint l'objectif 7.1.

7.3.3. Lancer un projet expérimental fédérateur

Les jumeaux numériques joueront un rôle essentiel dans le développement et la gestion de villes « intelligentes », contribuant à la planification, au suivi et à l'optimisation des infrastructures urbaines, et conduisant à des villes plus durables et plus efficaces. Pour tenir compte des interactions entre de multiples dimensions (par exemple, dans le domaine de l'énergie, avec des moyens de production distribués et des consommations diverses liées à l'habitat, aux activités industrielles et commerciales, aux transports…), il est alors nécessaire de coordonner différents jumeaux. Par ailleurs, les jumeaux numériques pourront jouer un rôle crucial dans la réalisation des objectifs de développement durable. En optimisant la consommation d'énergie et en réduisant les émissions, ils aideront les villes et les industries à progresser vers zéro émission nette de carbone. On soutient donc l'idée d'un projet fédérateur pluriannuel de ce type qui permettrait d'articuler autour d'une direction de R&D solide l'ensemble des points durs évoqués qu'ils soient méthodologiques, technologiques ou sociétaux.

7.4. Définition d'un cursus

Il faut, pour le secteur des jumeaux numériques, des personnes ayant une compréhension fine des enjeux et une ouverture en termes de formation, qui soit libérée des silos. **Ceci appelle le développement de cursus dédiés aux jumeaux numériques**. Il faut pour cela s'appuyer sur le monde académique. 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 [30].

30 Cesame est un exemple, mais seulement pour la formation des architectes système. Il faudrait quelque chose de similaire pour les jumeaux numériques.

7.5. IA et jumeaux numériques, IA pour les jumeaux numériques

Les évolutions toutes récentes montrent que l'IA générative, les (M)LLM, et les agents, peuvent jouer, dans les jumeaux numériques comme ailleurs, un rôle d'assistant ou de guide utilisateur intelligent[31]. **Toutefois, c'est dans une imbrication intime entre IA et jumeaux numériques que l'IA trouve sa place, celle de l'IA 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 ».**

7.6. Quelles recherches ? Pour une science de la représentation

Les jumeaux numériques ont deux ambitions : représenter de manière intégrative les produits, services et objets de la société ; et permettre leur opération, la gestion de leur cycle de vie, leur évolution et leur conduite. Leur nature intégrative fait que, par essence, ils s'appuient sur des domaines de recherches variés, divers, voire hétérogènes. En voici un aperçu :

- Mathématiques : analyse numérique et calcul scientifique (simulations, *surrogate models*, continuité numérique, HPC), formalisation et représentations géométriques, topologiques et multidimensionnels.

- Modèles multidisciplines et multiéchelle : pour les produits, pour les matériaux, pour le vivant. C'est sur cette science que repose la construction de modèles représentant les objets ou systèmes à des échelles ou résolutions différentes. La difficulté est alors de comprendre comment ces échelles sont reliées.

- *Machine learning* sous diverses formes (*deep learning*, mais aussi recalage de modèle, assimilation de données) ; pour l'apprentissage boîte noire (dont le *deep learning*) on a la question prégnante de l'explicabilité, que, justement, les modèles listés ci-dessus aident à traiter. Le rôle de l'IA générative reste pour partie une interrogation, mais ce rôle est déjà

31 Selon https://www.linkedin.com/pulse/microsofts-ceo-says-ai-agents-transform-saas-businesses-how-4mdgf les agents IA pourraient rendre inutile le SaaS, ou tout au moins le compléter utilement.

essentiel pour la découverte de nouvelles molécules et de nouveaux médicaments. Dans tous les cas, la question des incertitudes et de leur estimation est récurrente.

- Génie systèmes complexes et génie logiciel : plateformes hôtes, combinaisons de formalismes, standards, données ; aide à la navigation au sein de tout cela.

- Frontière entre génie logiciel et mathématiques. L'étude des formalismes de modélisation requiert un recours non trivial aux deux disciplines. Il en va de même pour la modélisation des systèmes dits « cyber-physiques » qui combinent un système physique et son informatique associée embarquée sur une architecture de calcul.

Tout progrès réalisé dans l'un de ces sujets bénéficie aux jumeaux numériques. On peut donc penser que toute recommandation de recherche se fragmenterait en des recommandations sur chacune des thématiques ci-dessus listées (et peut-être d'autres).

Mais l'existence même du paradigme et son succès font que le concept porte plus de valeur que la somme des valeurs des parties constituantes. Ce constat plaide donc en faveur d'une *Science* et d'une *Ingénierie de la Représentation* (*depiction science, representation science, representation engineering*… le terme est encore ouvert). Cette science a pour thématique tout ce qui concerne l'hétérogénéité des formalismes, la nature modulaire et distribuée de la construction des jumeaux numériques et de leur opération. Nous développons ces points maintenant comme autant de recommandations.

7.6.1. La quête du *low-code/no-code*

Nous avons vu, à la section 4.6, le rôle du *low-code/no-code* dans la satisfaction des objectifs énoncés dans les sections 7.3.1 et 7.3.2, ainsi que les verrous scientifiques qui y sont associés.

Un exemple intéressant à imiter et élargir est celui du standard Modelica et de son écosystème de fournisseur de boîtes à outils de modèles spécialisés : Modelon, Modeliconseil, Claytex, en sont quelques exemples (il y en a d'autres), voir aussi la page libraries de Modelica.org. On y trouve des bibliothèques de modèles prédéfinis pour des composants d'une physique donnée (thermique…), ainsi que de quoi construire des modèles multiphysiques[32]. Dans ce secteur du service au-dessus de Modelica et des écosystèmes correspondants, les forces principales au sein de l'EU se trouvent dans les pays du nord, la France étant quelque peu sous-dotée.

Il faut donc : 1/ Élargir la base technique couverte par le *low-code/no-code* ; 2/ Approfondir et améliorer ces approches lorsqu'elles existent ; 3/ Favoriser le développement d'écosystèmes de sociétés offrant bibliothèques et services.

Un objectif important pour la recherche est donc d'élargir la base de ces approches *low-code/no-code.* Par exemple pour couvrir des modèles aux éléments finis (hors du champ de Modelica), ou d'autres aspects du système.

En revanche, l'extension de ces approches de jumeaux numériques par composants à l'apprentissage sur des données est un autre sujet, difficile, et surtout de nature profondément différente (apprentissage distribué et décentralisé).

32 Un aspect fort de ce standard est justement la possibilité qu'il offre de construire des modèles de systèmes par assemblage *no-code* de modèles de composants : c'est une propriété remarquable, la situation standard étant qu'un modèle de composant nécessite, pour son déploiement, la connaissance de son contexte d'utilisation, ce qui va à l'encontre de la notion même de bibliothèque de composants réutilisables.

7.6.2. Les verrous liés au caractère intégratif des jumeaux numériques

Le caractère intégratif que nous avons souligné appelle, en outre, des efforts sur des sujets spécifiques, non mentionnés dans notre liste :

Dans la mesure où il est construit et exploité par différents acteurs (de sociétés éventuellement distinctes), la question d'une construction et d'une exploitation décentralisées du jumeau se pose. Comment assurer la décentralisation tout en maintenant la cohérence de l'ensemble ? Quelques paradigmes émergent qui traitent cette question : la construction par contrats (ou comment construire un objet global par des acteurs qui coopèrent en ne connaissant que leur monde local, plus quelques informations de contexte) ; les décisions et les exécutions distribuées.

Un jumeau numérique est souvent constitué d'aspects différents (ou de vues différentes), nous avons détaillé cela lorsque nous avons passé en revue le secteur des systèmes critiques, mais la question se pose également hors des objets manufacturés. Ces différents aspects sont souvent décrits par des formalismes mathématiques différents, la question de la coopération entre ces formalismes se pose alors. Les dimensions collaboratives des plateformes centrées jumeaux numériques apportent des pratiques et standards de coopérations tirant parti des représentations et de leurs modes de développement.

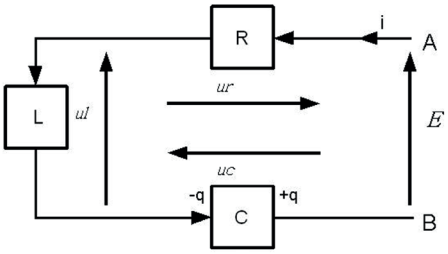
Le métavers industriel : en exploitant les progrès de la réalité virtuelle et augmentée, les jumeaux numériques pourront offrir des expériences immersives pour la formation des usagers et des opérateurs, la vente, et l'engagement d'un client.

Plus généralement, nous pensons que la technologie des jumeaux numériques appelle *tout particulièrement* un effacement des silos entre grandes communautés de recherche (mathématiques, informatique, électronique, physique).

Annexes

Annexe 1 — Difficultés du *low-code/no-code*

Faisons une petite digression dans le monde des circuits électriques pour expliquer la difficulté.



$$0 = u_C + u_L + u_R - E$$
$$0 = u_L - Li'$$
$$0 = Cu'_C - i$$
$$0 = u_r - Ri$$

La figure ci-dessus représente un circuit RLC (R : résistance, L : inductance, C : capacité), et on montre à droite l'équation reliant les diverses quantités et leurs dérivées premières. On voudrait, idéalement, modéliser ce circuit en le dessinant. Première question : quelles sont les interfaces du programme de simulation ? En fait on ne sait pas dire qui est une variable d'entrée et qui est une sortie. Ceci dépendra du contexte d'utilisation de ce circuit (dans quel circuit plus large il sera inséré pour réaliser une fonction désirée). C'est d'ailleurs la même chose pour chacune des équations qui constituent le modèle mathématique ; en particulier, la première équation est la *loi des mailles*. En fait, toutes ces équations sont des contraintes, et non pas des programmes prêts à être simulés. Deux approches sont alors possibles pour produire du code de simulation :

- Si l'on connait le futur contexte de ce circuit (par exemple E est l'entrée et u_C est la sortie, on peut produire le code de simulation pour tout ce circuit et l'insérer dans son contexte. Mais on s'interdit de réutiliser ce code dans des contextes différents. Donc on se prive de la possibilité d'avoir des bibliothèques de modèles réutilisables.

- Si on veut offrir ce modèle, voire même le modèle de chaque composant élémentaire, sous forme de bibliothèque, il est alors nécessaire de conserver le modèle sous forme source. Mais alors il faut savoir, automatiquement, engendrer le code exécutable pour la simulation une fois qu'on veut la produire, pour obtenir le jumeau numérique d'un système particulier.

L'exemple ci-dessus est simple et petit. Même au niveau des circuits électriques, des cas plus compliqués se présentent. Cette problématique a été identifiée depuis longtemps : 1/ dans les années 1970 avec le logiciel Spice pour les circuits électriques, 2/ pour les systèmes multiphysiques dans les années 1980 par les automaticiens, avec d'abord la proposition des *bond graphs*[33], puis de la modélisation à base de DAE (*Differential Algebraic Equations*[34]) au lieu des équations différentielles ordinaires habituelles. Ceci a donné naissance à Modelica (standardisé en 1996 pour sa V1), un standard de langage permettant la spécification de modèles multiphysiques avec la réutilisation de modèles, et prenant en charge la génération de code de simulation.

33 Thoma, J. : Bond graphs : introduction and applications, Elsevier Science, 1975 (ISBN 0-08-018882-6)

34 Une DAE est une équation de la forme $f(x,x')=0$. C'est donc une contrainte reliant x à sa dérivée x', contrairement à l'ODE $x'=f(x)$ qui définit x' comme fonction de x. Les DAE permettent d'écrire directement les modèles à partir de principes de la physique, qui sont souvent des lois et donc des relations entre grandeurs.

Annexe 2 — Regard sur le rapport des académies scientifiques américaines

Il s'agit du rapport *Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins* (2024)[35], conjointement préparé par les National Academies of Science, Engineering, and Medicine.

C'est un travail considérable conduit par un groupe de travail de quinze universitaires et un chercheur du Los Alamos National Laboratory, à quoi se rajoutent cinq *Boards* sur des thématiques spécifiques, regroupant chacun une vingtaine de membres (universitaires, à quelques exceptions près). Un grand nombre d'experts ont été consultés. Nous invitons chacune et chacun à prendre connaissance de ce document riche. Nous nous contentons ici de noter quelques points saillants.

Quelques points ont été particulièrement approfondis

- La question des incertitudes, des approximations, et de leur quantification : *Verification, Validation, and Uncertainty Quantification*. Cette section passe en revue en quoi une représentation est ou non fidèle à la réalité. Cela concerne des aspects de méthodes formelles en informatique, mais aussi de qualification d'un modèle au regard des données expérimentales sur banc ou en opération. La problématique de l'IA (et de l'IA générative) est rappelée dans ce contexte. Il s'agit d'une thématique qui préexistait au thème des jumeaux numériques.

- La nature multiéchelle ou multirésolution (*multiscale*) des représentations (données et modèles). Ces points sont illustrés dans les contextes de l'environnement et du médical. On peut dire qu'ils préexistaient au développement de la thématique des jumeaux numériques, même si celui-ci en a exacerbé l'importance.

35 http://nap.nationalacademies.org/26894

- *IA hybride Hybrid Modelling combining mechanistic models and Machine Learning.* L'analyse explore une problématique que notre académie a aussi étudiée [36].

- *Integrating component and subsystems digital twins*. Il s'agit de la question de l'intégration de jumeaux numériques à des fins de co-modélisation et co-simulation, sujets que nous avons mentionnés. Ce sont des sujets spécifiques apportés par les jumeaux numériques, et qui constituent une problématique nouvelle vis-à-vis du calcul scientifique.

- *Surrogate Modelling for High-Dimensional, Complex Multidisciplinary Systems*. Nous avons également indiqué cette problématique. Le rapport des académies américaines est particulièrement développé et intéressant sur ce sujet. Il insiste sur la nouveauté et la difficulté de ces sujets dans un contexte d'hétérogénéité, indiquant l'absence de travaux en même temps que le besoin de ceux-ci.

Quelques absences notables

De manière surprenante, des aspects que nous avons jugés importants sont à peu près absents du rapport :

- la question de la plateforme hôte n'apparait pas ;

- la question des *frameworks* et du *low-code/no-code* est ignorée.

Peut-être ces manques s'expliquent-ils par la très faible représentation, voire l'absence de contributeurs industriels (aucun éditeur, très peu d'acteurs de l'ingénierie et, du point de vue académique, très peu de spécialistes du génie logiciel).

36 Contribution France 2030 – n°5, Faire de la confiance dans l'IA un différenciateur. Marier la confiance avec la combinaison données/connaissances métiers.

Annexe 3 — Entretien avec Vera Silva (GE Vernova)

1. Rapport d'expérience

GE Vernova [37] est la branche « énergie du futur » du groupe General Electric. Effectifs : 75 000 dans le monde [38].

Le *Green Digital Twin* : un jumeau numérique du réseau électrique

Un effort important depuis plusieurs années consiste en la création d'un jumeau numérique du réseau électrique, codéveloppé dans le cadre d'un grand projet du Royaume-Uni réunissant, autour de GE Vernova, des opérateurs du réseau, des fournisseurs d'énergie et des partenaires académiques.

Cet outil fournit les outils de gestion et de conduite du réseau. Historiquement on avait un réseau intégré avec un gestionnaire unique. L'ouverture à la concurrence a changé cela : un acteur est chargé d'opérer le réseau de puissance, tandis que d'autres acteurs opèrent les divers réseaux de distribution ou la production d'énergie. L'utilisation du jumeau numérique est *off-line* et non-temps réel. Le jumeau numérique sert essentiellement de support aux tâches d'optimisation des réseaux. Il comporte donc des vues agrégées de haut niveau, qui n'entrent pas dans les détails.

Il est donc difficile d'avoir une vision de l'ensemble et c'est pourtant nécessaire pour une opération et une maintenance optimisées. C'est ce que l'on attend du jumeau numérique. Le jumeau numérique rend visibles pour tout acteur l'ensemble des sous-systèmes du réseau global. Cette vision globale permet une opération et une gestion décentralisées, mais globalement optimisées, du réseau électrique ; et ce, jusque dans l'aspect temps réel. Au Royaume-Uni, toute cette gestion est faite par un acteur uniquement dédié à ce rôle. Il faut donc partager, entre les divers acteurs, à la fois les données et certains

37 https://www.gevernova.com

38 Selon https://www.gevernova.com/software/innovation/digital-twin-technology : *Apply advanced analytics and machine learning to reduce operational costs, risks and emissions and accelerate your Digital Transformation and Energy Transition with Digital Twin Technology.*

niveaux de modèles. La décentralisation, que l'on souhaite très flexible, exige un jumeau numérique réunissant l'ensemble des réseaux couvrant le transport et la distribution. Le jumeau numérique est donc devenu essentiel dans le système anglais.

La situation devrait évoluer dans le même sens ailleurs. En France, par exemple, RTE a accès à toutes ces informations et échange avec EDF, Engie, Total, et les autres acteurs similaires.

Digital Ghost

Un nouvel outil à GE Vernova est le Digital Ghost, en cours de développement par le centre R&D corporate du groupe. C'est une variété de jumeau numérique chargé des tâches suivantes : 1/ détecter les intrusions cyber dans tout équipement (cela couvre jusqu'aux réseaux de télécommunication qui pilotent les réseaux électriques) ; 2/ suivre les évolutions conjointes du réel et du jumeau numérique pour opérer et maintenir le système, à l'aide de méthodes prédictives de type IA (estimation d'état de type filtre de Kalman étendu, ou modèles spécifiques issus de la physique ou s'inspirant d'elle). Là encore, l'utilisation du jumeau numérique est *off-line* et non-temps réel. Il propose des actions dont la mise en œuvre reste sous la responsabilité de l'opérateur humain.

Retombées espérées

Quel retour d'investissement peut-on attendre du développement de ce jumeau numérique ? Aujourd'hui, on planifie, on gère et on exploite le réseau avec des marges de sûreté significatives (30 % de la capacité est utilisée) ; on attend des jumeaux numériques une forte réduction de ces marges. On doit aussi offrir la transparence pour mieux guider les décisions des acteurs. La transparence est une part importante du projet UK.

On attend également du jumeau numérique une **meilleure intégration des différents métiers de l'entreprise,** en ayant conception/service/maintenance/achats intégrés dans un même plateau (comme il est annoncé par Nvidia). Si, dans notre cas, les trois premiers métiers sont en cours d'intégration autour du jumeau numérique en développement, l'intégration avec les autres métiers n'est pas encore en vue.

En ce qui concerne l'intégration conception/maintenance, ceux qui font la conception ne sont pas, aujourd'hui, intéressés à rajouter un capteur de plus pour faciliter la maintenance. à la conception c'est le coût et le délai qui comptent. En exploitation c'est le *meantime to failure* et le *meantime to repair* qui comptent. L'évolution en cours vise à combiner les deux activités. Ainsi, on fournit un équipement avec son jumeau numérique et le capital des données associées. Les clients demandent des outils de gestion de performance, avec un indicateur de type *serviceability*.

Quelques aspects techniques des jumeaux numériques chez GE Vernova

Comme il a été dit, le jumeau numérique est utilisé pour : partager entre les différents acteurs l'état du système, jouer des simulations *off-line* mais pas *on-line*, à des fins d'optimisation ou de surveillance (pour la maintenance prédictive). Les éléments centraux du jumeau numérique sont donc : le modèle unique de données, les codes de calcul de flux de puissance (pour le cas du jumeau numérique du réseau électrique), et les calculs d'optimisation. Le modèle de données est mis à jour et maintenu en temps réel. Il est de type CIM (Common Information Model), avec beaucoup d'attributs ; il suit le standard public européen IEC 61850 ; il inclut un modèle de toutes les infrastructures latérales (télécoms, etc.). Pour la gestion fine des réseaux, le modèle du réseau de transport reste de taille raisonnable, mais le nombre des réseaux de distribution peut s'élever jusqu'à 10 000 ; pour ce niveau fin de modélisation, le tissu de données uniforme est encore loin. L'objectif final est de pouvoir modéliser les interdépendances entre le réseau électrique et le réseau de télécommunications qui sert à le piloter ; le jumeau numérique doit donc permettre la co-simulation, et la co-modélisation pour identifier les vulnérabilités. À côté des composantes réseau, il existe aussi des équipements individuels très critiques, avec un gros impact potentiel sur le fonctionnement du système : transformateurs et disjoncteurs haute tension. Ce sont des équipements complexes, avec des aspects multiphysiques (électricité, magnétisme, hydraulique). Dans les composants, les modèles doivent être détaillés pour guider le diagnostic. Pour ces composants, il faudrait disposer d'analyses des défaillances (*root cause analyses*) plus rapides. Cela permettrait de s'éloigner de la maintenance périodique pour se rapprocher de la maintenance conditionnelle, et d'éviter ainsi les gaspillages. Pour cela, on fait beaucoup de réductions de modèle.

S'agissant des aspects de génie logiciel des jumeaux numériques, GE Vernova construit la plateforme hôte, mais ce développement est financé par le projet Digital Twin la Grande-Bretagne. Pour ce qui concerne l'infrastructure partagée, les participants au projet veulent avoir des outils *open source* avec des contributions académiques. Un point important est : comment fait-on vivre ces éléments *open source* ? Comment les maintient-on ? Par des collaborations entre les différents acteurs. D'autres acteurs, extérieurs au projet, interviennent. Dans la mesure où il y a des éléments communs à toutes les infrastructures critiques, GE Vernova a récupéré des éléments provenant d'autres branches du groupe (aéronautique, santé…). Par contre, les modèles de données sont ceux de notre secteur.

Dans la construction des jumeaux numériques, il y a des activités de *software engineering*, lesquelles sont encore fortement dans un modèle internalisé en ce qui concerne la partie réseau. Pour les éléments très génériques (*data fabric*, plateforme), un partenariat avec un spécialiste serait preferable (IBM). Pour les modèles spécifiques, par contre, c'est clairement *expertise based*.

2. Réponses à quelques questions

Quelle est votre vision concernant les évolutions dans les jumeaux numériques ? Y a-t-il eu rupture ? Si oui, quand et pourquoi ?

La réponse dépend de l'entreprise et du secteur. Chez nous c'est plutôt une évolution continue qu'une rupture. Il faut savoir que la durée de vie des éléments de réseau est de 60-70 ans. La conception des centrales à gaz nécessite un rapprochement entre conception et maintenance (c.-à-d., le client et nous). Mais nous n'avons pas encore d'intégration avec les processus d'entreprise (le flot d'entreprises reste géré par les outils SAP). Nous n'avons pas de jumeau numérique de nos processus. L'exemple de Nvidia est important à suivre. Toutefois, nos produits sortent aujourd'hui avec leur jumeau numérique.

Développez-vous du jumeau multiéchelle ? Si oui : comment ?

Un équipement spécifique nécessite des modèles multiphysiques et multiéchelles fins, par exemple les disjoncteurs HT. Si on veut remplacer

le type de gaz, on a besoin du multiéchelle et d'études de fond. On veut aussi diviser par trois le temps de développement d'une nouvelle chambre. Aujourd'hui cela prend 10 ans et on vise à terme 18 mois. La situation est analogue pour les turbines à gaz ou les transformateurs de puissance. De façon générale, on peut dire que notre industrie évoluait lentement. Les choses s'accélèrent, avec beaucoup d'innovation, on doit donc faire plus vite. La simulation multiéchelle multiphysique est essentielle. La cohérence entre les échelles est importante. Pour l'aspect « coopétition », il existe 3-4 concurrents dans le monde, donc on se bat, mais nos équipes peuvent travailler avec des chercheurs du même type de technologie dans d'autres filières (aéronautique, nucléaire…).

Incertitudes : validation, vérification, monitoring/diagnostic/maintenance : comment procédez-vous ?

On a fait cela dans le *digital ghost*, pour détecter des configurations suspectes ou des interventions malveillantes. On utilise des estimations d'état, qui incluent les incertitudes, y compris les incertitudes naturelles (externes météo, consommation) : le système est donc stochastique.

Avez-vous besoin d'inclure la description de processus ?

Oui, pour indiquer les étapes pour parvenir aux choix entre les options. Le plan de décision doit être bien modélisé. Certains de ces processus impliquent l'homme, mais ça n'est pas pris en compte en boucle fermée. Prendre en compte une telle boucle fermée nous rendra plus proche de systèmes autonomes, avec moins d'intervention humaine.

Utilisez-vous des jumeaux numériques à chaud ? Faites-vous du HiL ?

Oui, on a des plateformes miroir. On en livre en particulier sur Dogger Bank pour les plateformes en mer du Nord. On a du HiL[39] qui permet aux équipes de travailler pour identifier les pannes avec les données qui sont surveillées. Mais il n'y a pas de rebouclage *on-line*. On reste *off-line* pour étudier le

39 *Hardware in the Loop*

problème avant d'intervenir. On a une plateforme miroir dédiée pour chaque grand projet. Mais beaucoup d'éléments sont mutualisés.

On voit bien la place que pourraient avoir les jumeaux numériques dans les process internes ; pensez-vous qu'on peut synchroniser avec d'autres process (finances, achats, RH) ?

Pour les achats : oui (pour anticiper les retards). Pour les RH et les finances, c'est moins évident. En revanche, les *quanta de sustainability* pourraient être bien mieux suivis avec les jumeaux numériques. Le jumeau numérique permet de mieux évaluer le coût environnemental, par exemple en l'intégrant comme *addendum* au prix.

IA, IA hybride, GenIA : utilisé pour le diagnostic ? Pour le cahier des charges ? Pour la découverte d'architectures ? De matériaux ?

Nous voyons tout cela comme une énorme opportunité. On a toujours utilisé de l'IA classique dans nos modèles de prévision (*clustering*, séries temporelles). Dans les cœurs de calcul, on accélère les optimisations grâce à l'IA, pour rechercher la meilleure solution, ou pour identifier les minima locaux. Pour le dispatching de production ou les réseaux, on utilise des algorithmes génétiques, que l'on combine avec l'optimisation. On a fait ça depuis toujours et on a progressé. Le nouveau avec l'IA générative, c'est que ça touche tous les métiers de l'entreprise. Détection d'erreurs dans les finances : pour les petits contrats qui sont nombreux, il faut beaucoup de gens pour évaluer les risques ; on gère ça maintenant par de l'IA générative. On va ainsi automatiser le travail répétitif et on n'interviendra manuellement que dans la décision finale. Autre exemple, la réponse aux clients pour les offres prend du temps : on teste l'IA générative pour automatiser ce type d'échange avec les clients. On doit suivre l'environnement concurrentiel, ça demandait beaucoup de monde : on teste en ce moment GenAI pour faire une première analyse et des alertes. Tout cela implique de la sécurité pour les données et de la protection : il nous faut donc notre solution d'IA générative (problèmes de protection de nos données). On a donc une maitrise des algorithmes d'IA générative. Enfin, sur l'ingénierie et ses schémas, on veut utiliser l'IA générative, et aussi pour l'équipe services et leur formation permanente.

Annexe 4 — Entretien avec Gilles Le Borgne (PSA puis Renault) et Armel Djeukou, Pierre Panfili (Airbus)

1. Rapport d'expérience Gilles Le Borgne (32 ans à PSA, 4 ans à Renault)

On vient d'un monde des années 90 avec des envois de fichier CAO point à point. Puis on est passé à la maquette numérique au début des années 2000 avec de la CAO gérée en configuration. Puis à une augmentation progressive des données gérées avec des mondes étanches : PLM (CAO/CAE), *system engineering*, et enfin industrie et fabrication. Les discontinuités numériques fortes qui en résultaient se sont résolues à partir de 2010 progressivement, chez Renault et PSA. Un fait nouveau se produit dans la décennie 2010-2020 : une extension du périmètre du PLM au triptyque (système, produit, process).

Deux ruptures autour de 2020

– Arrivée du full SaaS. Avant, chaque compagnie avait sa propre vision du jumeau numérique avec son infrastructure propre. Le full SaaS[40] permet de standardiser le jumeau numérique, ce qui en facilite la maintenance. Le full SaaS avec 3DS permet de faire tous les deux/trois mois des changements de fonctionnalité et des mises à jour du jumeau numérique avec un temps de réponse rapide et une excellente sécurité. Renault est en full SaaS *cloud* chez 3DS pour la partie produit ; le *shop floor* est chez Google ; la partie sales force est aussi chez Google. On cherche l'accélération, grâce à une traçabilité des données (fraîches et sous contrôle d'accès). On impose que l'expression d'une donnée soit unique, quelle que soit la fonction correspondante. Le SaaS simplifie la gestion de configuration des voitures ; c'est par exemple important pour les campagnes de rappel (*updates over the air*), ce qui est fait récemment seulement.

40 *Software as a Service* : mise à disposition d'un outil complexe sous la forme d'un service Web ; on évite les installations et les mises à jour complexes, et aussi la coexistence de versions différentes.

– **Exalead/3D Experience (3DS) pour la collecte des informations** relatives à toutes les activités (*buying, sourcing, costing, purchasing, manufacturing*). On peut récupérer les éléments associés à un composant donné et on peut tout exporter dans le PLM. On peut ainsi avoir accès à toutes les données (rendues visibles dans l'interface utilisateur de 3D-Experience) relatives à une fonction quelconque. Cela vient étendre le jumeau numérique en lui ouvrant accès à toutes les données de l'entreprise étendue.

Quand toutes les données sont rassemblées, on parvient aussi à faire la migration d'outils historiques. On dispose donc de données certaines et référencées, ce qui ouvre l'accès à l'IA (LLM, IA hybride).

Couverture du jumeau numérique et services rendus

Tous les modèles MBSE, CAO et multiphysique sont déjà intégrés. On peut reconstituer les vues système, validation, réglementation[41] dans l'outil PART-360. On peut remonter à la partie *safety,* à la partie réglementaire, etc. L'arrivée de l'électrique ne change rien à tout ça.

On crée d'abord le modèle nous-mêmes. On fait du MBSE avec du *surrogate* pour avoir de la donnée synthétique pour le design. Pour les modifications et les variantes, il nous faut en plus de la donnée réelle pour améliorer la qualité du jumeau numérique. L'outil pourrait faire de la recommandation pour des évolutions du produit. On voudrait disposer de cette évolution dans les cinq ans à venir. Mais il faut pouvoir collecter les données de toute la chaine (OEM et sous-traitants).

Il faut voir le jumeau numérique comme la porte d'entrée de l'IA : avec des données validées et sûres, on pourra mettre en place toute une infrastructure d'apprentissage. Par exemple, pour la maintenance prédictive et le diagnostic, il faudra identifier les patterns révélateurs de dysfonctionnements, à partir du jumeau numérique à jour. J'ai 1 250 voitures dans le *cloud* 3DS : cette base de données devrait permettre à terme de générer automatiquement des conceptions (essai en cours sur des portes). Aujourd'hui on passe 80 % du

41 1 voiture = 54 règlements d'homologation.

temps à générer les données et 20 % à les vérifier ; on voudrait inverser les proportions.

Chez Renault il y a sept jumeaux numériques (produit, usine, client, finance…) ; on les gère par des binômes (ingénieur métier, ingénieur système d'information). À chaque jumeau numérique est associé un sponsor au Comex. C'est géré au niveau Comex deux fois par mois. Ainsi, travailler sur le jumeau numérique devient un métier très attractif, ce qui est important et bénéfique pour le développement des jumeaux numériques et leur usage.

Entreprise étendue

Il existe des vues fournisseur, avec contrôle d'accès sur ce que voit tel ou tel fournisseur. Ainsi, dans le cas d'un radar, le fournisseur aura les vues 3D pour son implantation, les spécifications logicielles, l'intégration, pour le fonctionnel et le dysfonctionnel.

Le MIL/SiL/HiL

Il est utilisé depuis longtemps, mais reste en progrès. On commence à l'utiliser dans un contexte inter-systèmes. Je suis intervenu sur un tel cas d'étude à un 3D Experience forum [42] pour décrire la démarche du groupe Renault (projet RVT : Renault Virtual Twin).

Reconnaitre un champion mondial et s'en servir

Si nous étions des politiques chinois et disposant de 3DS, le ministère exigerait de nous aligner sur 3DS parce que c'est français. Mais notre pays ne procède pas ainsi. La force de 3DS devrait devenir un avantage concurrentiel. Ça n'est malheureusement pas le cas.

42 Enregistrement YouTube

2. Rapport d'expérience Armel Djeukou et Pierre Panfili (Airbus)

En France plus de 1500 entreprises contribuent à Airbus, notre chaine de sous-traitance est très fragmentée.

Historique

Le PLM s'est bâti sur la contrainte d'une durée de vie longue des avions, avec une traçabilité des données sur 40 ans ou plus, pour lesquelles on a un devoir de mémoire. Ceci, joint au fait qu'Airbus est le fruit d'une fusion multipays, a engendré le recours à une variété de PLM différents. On a toutes sortes de technologies et d'éditeurs de logiciel, et c'est encore le cas : Siemens, 3DS, PTC et d'autres.

Le premier effort a consisté à sécuriser l'avion autour d'un ensemble de solutions de chez 3DS et PTC…[43] Il en a résulté une déconnexion entre l'environnement de design et les configurations. On a fait fonctionner cette hétérogénéité tant bien que mal au début dans les années 1990. Ça a évolué en fonction des technologies numériques données/modélisation/simulation. Les évolutions ont été rythmées par les grands programmes de nouveaux avions :

- 1980 : la CAO graphique pour l'A320.
- 1990 : le PLM (les outils furent différents selon le pays).
- 2000 : la fusion donnant naissance à Airbus a fini par se traduire par une mise en commun des process et outils PLM. Pour l'A380 on a eu des problèmes sur les systèmes adjacents[44]. La continuité numérique a été amenée par architecture centralisée en phase de design sous contrôle de la gestion de configuration « configured DMU », d'abord sur le A400M (mais seulement pour les équipes internes Airbus), puis l'A350 (entreprise

43 *Parametric Technology Corporation* (PTC) est une entreprise américaine de logiciels autour de l'Internet des objets et de la réalité augmentée.

44 On se rappelle le problème du câblage incorrect, en raison de l'utilisation de versions différentes d'un logiciel de CAO entre la France et l'Allemagne.

étendue comprise). On a réglé les problèmes posés par la personnalisation en découplant davantage la version de base et ses customisations (structuration en lignes de produits). On a ainsi créé un équilibre entre la centralisation et la modularité, et assuré une continuité entre performance et modélisation physique de l'avion. On a centralisé chez nous toutes les données, pour les modèles de simulation et les modèles de calcul. L'entreprise étendue doit alors s'appliquer à tous les sous-traitants.

– 2018 : On a décidé de choisir 3DS comme pivot du PLM. On peut tout brancher dessus. Cette politique est difficile à mettre en œuvre dans une entreprise d'architecture européenne. On a choisi au niveau entreprise de rationaliser en trois sous-process : produit, outil industriel de fabrication, données et maintenance. La partie qui va jusqu'au monde des services remet à plat les anciens process en les rattachant au PLM. Ces jumeaux numériques sont pilotés par le programme de transformation DDMS (*Digital Design Manufacturing & Services*). Le système innervant se fait par les données (les modèles sont simplement des données particulières).

Une rupture : le SaaS

Le SaaS a été une rupture majeure. On vise un fonctionnement multi-SaaS pour avoir plusieurs fournisseurs faisant du SaaS (dont 3DS et SAP), sans forcer leur intégration totale. On a développé une approche de *data mesh*[45], offrant le multi-SaaS. On expose la donnée indépendamment de là où elle est produite. Les données sont stockées chez Airbus en tant que référence et tous les systèmes y accèdent via des API[46]. On recrée donc chez nous le master données. On visualise avec des outils qui viennent de divers éditeurs. Tout ceci nous a changé de paradigme dans l'entreprise étendue. Ça permet de travailler avec une autre entreprise qui utilise une autre plateforme que nous.

45 https://www.ibm.com/fr-fr/topics/data-mesh
46 API *Application programming interface*

Usage du *cloud*

Nous avons notre propre *cloud* Airbus avec toutes les données. Puis, on a plusieurs *clouds* pour la souveraineté. Un *cloud* Amazon est utilisé pour le générique, sachant qu'il est entièrement géré par nous y compris la résidence des données. Pour les programmes militaires, on a des *clouds* séparés souverains. Nous avons fait un choix plus flexible que Renault pour ne pas tout uniformiser concernant les plateformes.

Commentaire partagé Airbus/Renault. Il y a des inconnues : les US et leur programme Stargate. Peut-on avoir la souveraineté et la performance ? Nous pensons qu'il faut lancer un Airbus du *cloud*. Nous sommes trop éparpillés sur plein de *clouds* en Europe. Si on avait un *cloud* européen puissant et sécurisé, on pourrait développer un business efficace. C'est aussi valable pour Airbus. Les industriels seraient prêts à pousser cela, mais à condition de ne pas avoir de régression de performance.

Skywise est notre *cloud* de collecte de données en vue de l'exploitation des données pour l'opération et la maintenance. On fait ainsi du service. Mais le problème est que la fréquence d'actualisation des données dans Skywise est faible. Il faut connecter Skywise aux services AWS/Palantir pour les *hot data* (*real time*), mais on ne change pas de *cloud provider*.

Évolutions des jumeaux numériques

On cherche à se rapprocher des notions de *autonomous digital twin*. Il s'agit de passer d'un modèle prédictif pour aller vers un modèle qui fait des suggestions de modification de système, voire de design. Il est très coûteux de faire cela manuellement. Il faut disposer de toute la chaine des données, pour atteindre l'optimisation globale, et pas seulement des optimisations locales. Une question est : comment démocratiser ces éléments de façon à pouvoir embarquer tous les acteurs de notre écosystème (nous finançons beaucoup, mais ça ne suffit pas) ?

On voudrait mettre en service un nouveau produit avec la même fiabilité que l'A320 pour qui on a une maturité de 40 ans. Donc il faut réutiliser l'expérience de l'ancien avion pour faire les futurs avec une maturité forte. C'est en cours en ce moment. Quand on lancera le prochain programme, on aura 15 ans

sans programme nouveau ; il faudra donc une récupération d'expérience que nous sommes en train de construire.

L'A350 cargo a-t-il été développé sur le jumeau numérique de l'A350, ou sur un nouveau ? C'est un mélange. On a fait des simulations multiphysiques avec 3DS, mais le MBSE de base est largement réutilisé. On a fait des *model based specifications*. La perte de compétence est une difficulté : comment juger de quel niveau de détail on a besoin est difficile si on n'a pas d'expérience du passé.

Où cela a-t-il du sens de créer du jumeau numérique et avec quelle granularité ? Il faut avoir un jumeau numérique global avec une précision variable, pas la même partout. Si le système est simple et si son impact sur l'opération est faible, alors un jumeau numérique grossier suffit. Sinon il faut raffiner et détailler. Cette variabilité de la granularité est un point important pour le déploiement. C'est une question d'efficacité économique.

Pour l'A350 cargo, avec tous les nouveaux sous-traitants qui contribuent au système de chargement, on a fait des *model based specification*s, mais le prochain avion sera *full model based*. Cela pose la question de comment construire une notion d'interface adéquate pour les intégrations d'éléments provenant de fournisseurs.

Les académiques seraient bienvenus sur ces sujets. C'est un écosystème qui doit se former. On a financé des chaires dans les universités dont GeorgiaTech sur le MBSE. Ils ont formé pas mal de PhD qu'on a embauchés. On a développé des *curricula* dans ces universités où on envoie nos ingénieurs pour leur formation en MBSE, mais c'est coûteux et ça prend du temps.

3. Discussion sur les recommandations

Définition d'un cursus

Un frein à la définition d'un cursus est la nature très parcellisée du domaine, avec l'existence de forts silos. Il nous faut des gens qui ont une compréhension fine des enjeux. Il faut s'appuyer sur le monde académique pour la formation. Avoir des consortiums ou des associations aidera : Cesames est un exemple, mais seulement pour la formation des architectes système. Il faudrait quelque chose de similaire pour les jumeaux numériques.

Cloud souverain européen

Le *cloud* souverain européen est essentiel (sinon dès qu'on a des données critiques on est condamné au *Taylor made* ce qui coûte cher).

Un champion mondial : en faire un atout

Il faut reconnaitre qu'on a un champion mondial (3DS). Il faut en faire un atout, comme n'hésiteraient pas à le faire les Chinois ou les Américains.

Données et standards des filières

Les standards d'interopérabilité devraient être fixés au niveau Europe. Pour avoir du jumeau numérique, il faut de la donnée réelle. Il faut donc des standards pour les données à échanger (à la manière de Catena-X en Allemagne). C'est important pour augmenter l'utilisation des jumeaux numériques dans les écosystèmes des filières.

Annexe 5 — Entretien avec Thibault Lockhart (EDF nucléaire EPR2)

Un enjeu de sécurité essentiel des centrales nucléaires — et actuellement de l'EPR2 — est la bonne réalisation et le bon comportement de l'enceinte de confinement qui assure la protection de l'environnement en cas d'accident interne et dans l'hypothèse de l'impact d'un aéronef.

Le principe du jumeau numérique apprenant a été exploité par EDF pour la maquette VeRCoRs[47] à l'échelle ⅓ d'une double enceinte sans peau d'une centrale 1300 MW. Ce projet a démarré au début des années 2010. L'objectif du jumeau numérique apprenant est de tenter d'anticiper les effets du vieillissement sur le béton de l'enceinte. Il associe le jumeau numérique lui-même et un ensemble de mesures cohérent en vue d'analyser le séchage progressif du béton qui est le principal moteur du vieillissement et de l'accélérer artificiellement. La mise en précontrainte d'une nouvelle enceinte comme celle de l'EPR2 sera suivie par des mesures qui permettront d'adapter le modèle numérique lors de la mise en tension des câbles de précontraintes, en lien avec la maquette VeRCoRs pour adapter la loi de comportement du béton. Ces méthodes font partie de ce qui est appelé « la méthode observationnelle » qui est une approche de conception dynamique particulièrement adaptée aux ouvrages qui ont une composante géotechnique complexe et déterminante.

La plus récente génération de centrales nucléaires françaises, nommée EPR2, est conçue à partir d'une maquette numérique fédérée, regroupant tous les corps d'état (génie civil, équipements électromécaniques, hydrauliques, etc.) pour obtenir une vue complète de l'ouvrage à construire. Cette opération de fédération est essentielle pour résoudre les interférences (opération de « déclashage ») entre les différents éléments qui partagent un même espace, et figer la configuration des structures porteuses (les éléments en béton).

Ces modèles évoluent en fonction de l'avancement des études (études globales, puis études locales et prise en main par l'entreprise). Ils prennent en compte les caractéristiques de sol, les caractéristiques climatiques et les sollicitations (cas de charges de service ou d'agression, comme les événements sismiques).

47 https://www.edf.fr/groupe-edf/inventer-lavenir-de-lenergie/rd-un-savoir-faire-mondial/rd-experience/univers-nucleaire/duree-de-fonctionnement

Le modèle des structures de génie civil est ensuite utilisé pour la production, toujours en 3D, du ferraillage, les armatures du béton armé, avec les inserts (fourreaux, platines d'ancrage, etc.) noyés dans le béton. En phase de construction, ces données, disponibles sur des terminaux portatifs (smartphones, tablettes, etc.) permettent le contrôle, sur le chantier, de la qualité des travaux au fur et à mesure de leur avancement. La maquette ou jumeau numérique joue ainsi un rôle essentiel dans la chaîne de contrôle Qualité. Dans le cas particulier de l'enceinte du bâtiment réacteur, l'ingénierie génie civil donne les éléments pour définir les détails de géométrie de l'enceinte liés à la précontrainte (facettes d'ancrage des câbles, cachetage des ancrages de précontrainte, renfort de béton autour du tampon matériel…). Ces éléments issus du jumeau numérique constitués par une chaine de logiciel d'éléments finis permettent de bâtir une enceinte et des bâtiments strictement conformes à l'intention du concepteur.

En phase de service, en fonction des données des mesures réalisées de manière continue dans les ouvrages, le jumeau numérique permet d'analyser le comportement du béton lors de la mise en précontrainte de l'enceinte puis lors des essais de mise en pression au cours d'un séisme éventuel. Il fournit la loi de rhéologie du béton la plus pertinente et permet de faire des hypothèses robustes sur le vieillissement du béton et la durée de vie des ouvrages. Ce système global fournit à l'entreprise exploitante un modèle des dernières particularités de l'ouvrage, en lien avec le dossier des ouvrages exécutés.

Pour les ouvrages de génie civil moins exceptionnels que l'enceinte de confinement d'une centrale nucléaire, la notion de jumeau numérique en est essentiellement au stade de l'intégration « d'ombres numériques » (captation de données depuis l'ouvrage en temps réel et transfert vers un modèle virtuel). Il ne s'agit pas encore à proprement parler d'un jumeau numérique, l'interface étant mono directionnelle du lieu physique vers le modèle virtuel. Cette intégration d'ombres numériques est déjà assez répandue et se traduit par des interfaces de supervision intégrant trois types de technologies : bases de données et systèmes d'information, capteurs, IoT et systèmes de monitoring, maquettes numériques et SIG.

Les données collectées à partir d'équipements de production (grues, tunneliers, lanceurs de poutres) permettent de superviser l'avancement des travaux, d'assurer la traçabilité de la production et d'optimiser les processus.

Annexe 6 — Entretien avec Marie-Luce Godinot, Bouygues

1. Les ouvrages de génie civil

Sur les grands ouvrages de génie civil, la notion de jumeau numérique en est essentiellement au stade de l'intégration d'ombres numériques (captation de données depuis l'ouvrage en temps réel et transfert vers un modèle virtuel). Il ne s'agit pas encore à proprement parler d'un jumeau numérique, l'interface étant mono directionnelle du lieu physique vers le modèle virtuel. Cette intégration d'ombres numériques est déjà assez répandue et se traduit par des interfaces de supervision intégrant trois types de technologies :

- **IT**[48] (technologies de l'information) : bases de données et systèmes d'information.
- **OT** (technologies de l'exploitation) : capteurs, IoT et systèmes de monitoring.
- **ET** (technologies de l'ingénierie) : maquettes numériques et SIG.

Les données collectées à partir d'équipements de production (grues, tunneliers, lanceurs de poutres) permettent de superviser l'avancement des travaux, d'assurer la traçabilité de la production et d'optimiser les processus.

Plusieurs exemples chez Bouygues Construction en attestent comme sur le chantier du parc éolien en mer de Fécamp (France) où les grues ont, par exemple, été équipées d'enregistreurs de données permettant d'analyser les positions de la flèche et du crochet ainsi que les charges manipulées. L'exploitation de ces données a permis d'identifier des facteurs pénalisant la production et de mettre en place des actions correctives. Autre exemple sur le projet MTR[49] à Hong Kong où un système de gestion numérique des chantiers de construction (DCSMS) intègre des données en temps réel pour améliorer la gestion de projet ainsi que la sécurité sur le chantier, notamment via la photogrammétrie aérienne, le suivi des camions-bennes et le monitoring

48 **IT** Information technology, **OY** operating technology, **ET** engineering technology

49 Mass transit Railway (港鐵) l'organisation qui gère le réseau ferré métropolitain de Hong Kong.

environnemental (bruit, rejets d'eau) ou enfin le projet HS2[50] (Royaume-Uni) où le groupement « Align » a mis en place une « control room » exploitant 13 tableaux de bord alimentés en continu avec des données terrain sur le pilotage et l'avancement du tunnelier, la production du lanceur de poutres et l'avancement des équipements du viaduc.

2. Les bâtiments et ouvrages architecturaux

Dans le secteur du bâtiment, les capteurs sont moins présents que dans les grands ouvrages de génie civil. Cette différence repose sur une culture de projet distincte, où la place de la donnée dans le pilotage des projets est encore en évolution.

La donnée est principalement collectée à travers des applications métier (suivi qualité, planning, formulaires) sur des dispositifs mobiles (smartphones, tablettes). Ces informations sont stockées dans une *data warehouse*, alimentant ainsi une représentation numérique de l'ouvrage et permettant une prise de décision optimisée pendant la construction.

Les usages les plus répandus sont le suivi de l'avancement des travaux, la supervision du contrôle qualité ou la gestion des levées de réserves.

La mise en place de jumeaux numériques en phase d'exploitation et de maintenance repose sur un travail préalable de collecte, validation et consolidation des données pendant la construction. Ce processus implique une coordination entre la maîtrise d'ouvrage, les équipes chargées de la maintenance et les entreprises sous-traitantes. Toutefois, l'absence de normes et le manque d'interopérabilité freinent encore le développement des jumeaux numériques, rendant leur déploiement complexe.

50 High Speed 2 (HS2), projet de ligne à grande vitesse entre Londres et les Midlands.

Voici deux exemples mis en place sur des chantiers de Bouygues Bâtiment France :

- **Cité Marianne** (Lille) : dès l'appel d'offres, la maitrise d'ouvrage a initié la mise en place d'un jumeau numérique du bâtiment, ayant pour objectif principal le suivi des objectifs dans le contrat global de performance. La production de la maquette numérique *as-built* a été assurée tout au long du chantier.

- **Intencity** (Grenoble) : intégré dès la phase de conception grâce à une modélisation énergétique fine (500 000 variables), le jumeau numérique a permis d'anticiper le comportement du bâtiment en conditions réelles, de valider la conformité de la conception et de l'exécution, et d'optimiser durablement son suivi et sa performance énergétique.

3. Les centrales nucléaires

Dans le secteur nucléaire, le projet **Hinkley Point C** constitue une référence en matière de numérisation des processus de construction.

Un écueil majeur du projet fut la supervision des travaux de ferraillage. La complexité du ferraillage a conduit à abandonner les plans papier au profit de modèles 3D. L'application *Trimble Connect* permet la remontée d'informations du terrain en associant les données saisies par la maîtrise et les ferrailleurs aux modèles numériques. Ce processus offre une vue consolidée sur l'avancement des travaux (non démarré, en cours, finalisé) et leur conformité (validé, refusé, à suivre).

D'autres usages innovants ont été développés en liant le modèle numérique à des systèmes de gestion des achats et de la chaîne d'approvisionnement, afin d'offrir une meilleure contextualisation des données et d'améliorer la prise de décision.

Toutefois, la mise en place de jumeaux numériques dans le secteur nucléaire soulève des enjeux critiques liés à la **protection des données sensibles**, qu'elles concernent les infrastructures ou les personnels. Ces enjeux impliquent des réflexions approfondies sur la cybersécurité, la gouvernance

des données et le respect des réglementations en vigueur. L'adoption de normes strictes et de mesures de sécurité robustes est essentielle pour prévenir les risques liés à l'accès non autorisé ou à l'utilisation abusive des données sensibles.

Si l'on se réfère à la définition du Digital Twin Consortium, un jumeau numérique exploite des données en temps réel et historiques pour représenter le passé et le présent, tout en simulant des scénarios futurs. Ces prévisions s'appuient sur des modèles de *machine learning* entraînés sur de vastes ensembles de données. Cependant, la collecte de ces données représente un défi majeur : des parties prenantes aux capacités numériques limitées, ainsi que des données incomplètes ou peu fiables, peuvent affecter l'efficacité et la fiabilité du jumeau numérique, compromettant ainsi l'atteinte des objectifs fixés. De plus, la synchronisation des données avec l'entité réelle, notamment les équipements de production, constitue un enjeu clé. L'automatisation de cette synchronisation peut également introduire des risques en matière de sécurité sur les chantiers, nécessitant une validation humaine.

Annexe 7 — Un peu de futurisme, les jumeaux numériques vus par des jeunes

Nous ne résistons pas, pour élargir la réflexion, à l'envie de proposer ce texte d'anticipation, résultant d'une session de l'Académie des technologies avec les jeunes. Un des groupes de travail devait creuser la question des systèmes industriels et technologiques. Une chose intéressante est qu'ils ont spontanément choisi pour l'un de leurs thèmes de travail l'exemple… des jumeaux numériques. Ils ont produit une « design fiction » pour imaginer ce que c'était de vivre dans une ville entièrement doublée par son jumeau numérique. Leur utopie/dystopie est allée assez loin ; nous avons trouvé cela intéressant. Attention au fait qu'il ne s'agit pas de leur « futur désirable », mais d'une manière de faire émerger les enjeux sociétaux et environnementaux autour du déploiement massif de jumeaux numériques. Voici ce texte.

Design Fiction proposée par un groupe de travail de l'Académie des technologies avec les jeunes

Pour ce qui est des jumeaux numériques, nous avons d'abord travaillé à partir de l'imaginaire en rédigeant une « design fiction », un récit explorant un futur où ces technologies sont pleinement intégrées dans la société, notamment à l'échelle des villes. En partant de cette fiction, nous avons ensuite réfléchi à l'état actuel des jumeaux numériques, ainsi qu'aux actions nécessaires pour aligner leur développement avec l'intérêt commun. Trois aspects se sont dégagés : la finalité des jumeaux numériques (d'intérêt public), la confiance à accorder à la provenance des données et l'opérationnalité des jumeaux numériques, notamment en termes de standardisation, de régulation et d'évolutivité.

Les compteurs des connexions en ligne, installés aux deux coins de la scène, indiquent qu'environ quarante-deux mille personnes vont suivre l'événement. À ce public nombreux s'ajoute celui venu jusqu'à l'auditorium du campus.

Ce bâtiment est remarquable en ce qu'il est un des seuls bâtiments de la ville antérieur à l'entrée du jumeau numérique de Munich dans sa phase d'autonomie entière, il y a maintenant quatorze ans. C'est ce que le journaliste vient de dire à l'instant, en ouverture de la cérémonie. D. le sait déjà, lui qui les a toutes vues depuis la première. Il sait aussi que dans cinq minutes, il sera appelé sur scène pour recevoir son prix du contributeur de l'année, avec en prime le record historique de points. Le programme est très précis, il a été proposé par le jumeau numérique de Munich lui-même. Le déroulé de la journée est en fait optimisé afin de garder les réseaux de transport publics de la ville parfaitement fluides.

C'est au tour du maire de Munich numérique de prendre la parole et de rappeler quelques statistiques. Les supercalculateurs qui hébergent le jumeau de la ville nécessitent 20 MW d'énergie électrique, soit 5 % de moins que l'année précédente, grâce au remplacement d'un tiers des GPU du supercalculateur par une nouvelle génération. Les indicateurs sont tous aux verts, et la qualité de vie ne cesse d'augmenter selon les derniers sondages des habitants. Au rang des derniers succès se compte l'optimisation de l'emplacement des nouveaux îlots de fraîcheur du centre-ville, qui ont permis à la population de passer l'été caniculaire de cette année dans d'excellentes conditions, et une seconde année de suite où la pollution atmosphérique est à zéro (le jumeau numérique a permis de réimplanter les quelques industries encore émettrices de polluants atmosphériques de sorte à minimiser l'impact sur la population de la ville et de ses alentours, sur la base de l'activité de chaque industrie et des régimes de vents). Mais la principale réussite de l'année est l'implantation du nouvel hôpital du centre-ville. Pour ce chantier, quelques algorithmes ont dû être retravaillés afin de produire le premier résultat d'optimisation avec plus de 1000 milliards de contraintes, ce qui est à la fois un nombre symbolique et un record mondial. Il n'en fallait pas moins pour trouver l'emplacement idéal, ainsi que les plans complets, d'un hôpital flambant neuf de quinze mille mètres carrés dans le cœur de la ville, pour permettre le meilleur accès possible par les transports publics et privés, la proximité aux poches de populations les plus nécessiteuses, l'accès aérien le plus approprié avec les voies existantes, l'impact le moins significatif possible sur la circulation piétonne et la position adéquate pour minimiser

les coûts de création des différents réseaux (eau, électricité, etc.). Les 1000 milliards de contraintes ne seront pas plus détaillés. Quelques itérations ont été nécessaires, mais cela fait maintenant l'équivalent de 10 ans que Munich (numérique) possède son nouvel hôpital central dans une instance parallèle accélérée du jumeau. Toutes les études de sensibilité montrent une grande robustesse et une espérance de vie en bonne santé en hausse de 0,8 an sur l'ensemble de la ville. Le conseil municipal de la ville (physique) a ainsi voté le début du chantier il y a quelques mois.

Le maire de la ville, comme tout politicien, finit son discours par une allusion aux prochaines élections municipales. Tous les habitants de Munich n'ont pas le droit de vote automatique, mais dans les faits, presque tous l'ont acquis. Pour l'obtenir, il faut contribuer positivement au jumeau numérique, en premier lieu en lui apportant les informations sans lesquelles rien ne serait possible. Elles sont de tout ordre : présence d'un nid de poule sur une chaussée, un luminaire défectueux, etc. Pour obtenir le record, D. a multiplié les informations de ce genre, mais il a aussi misé sur la communication de ses informations privées. Il a déclaré l'horaire exact de son départ au travail et de son retour au domicile, son trajet, l'endroit, l'heure et le contenu de ses courses hebdomadaires, ainsi que ses dates de départ en vacances. L'autre clé de son succès, c'est d'avoir exploité lui-même une instance publique du jumeau numérique afin d'y lancer des études de sensibilité de son cru, ceci dans le but d'identifier les zones géographiques et les domaines dans lesquels le jumeau est le plus sensible à une perturbation, et d'y concentrer ses efforts. Par chance, il ne vit pas loin d'une telle zone. Cette approche lui a permis, par sa seule contribution, d'augmenter la précision du jumeau de 0,1 ‰, ce qui d'après les spécialistes équivaudrait à quelques centaines de milliers d'euros d'économies sur l'année.

Cette approche n'est pas nouvelle, certains experts ont même proposé de l'exploiter à l'aide de milliers de drones miniatures pilotés par la ville elle-même. Les experts sont encore en plein débat. Le principal risque avancé par les sceptiques est de perdre ce que certains pensent être le principal intérêt des jumeaux numériques, à savoir l'augmentation massive, et pour ainsi dire inédite, de l'intérêt des citoyens pour le fonctionnement de leur ville et les prises de décisions qui y sont liées, depuis que le jumeau numérique est rentré en service, permettant ainsi une évaluation chiffrée de l'impact des actions, petites ou grandes, de chaque acteur de la ville sur leur concitoyen. Daniel, qui monte maintenant sur scène, serait-il le dernier à recevoir ce prix ?

Annexe 8 — Acronymes

PLM : *Product Lifecycle Management tool*, base de données équipée en général d'une ontologie

SoS : *Systems of Systems*, ville intelligente, système de drones…

HiL : *Hardware in the Loop*, essai combinant une partie du système avec un jumeau de son environnement

MBSE : *Model Based System Engineering*

EDP (PDE) : Équation aux dérivées partielles

MRO : Opération et maintenance.

SaaS, XaaS : *Software as a Services*, X (ce que vous voulez) *as a Service*, mise à disposition de X à distance sous forme de service Web.

Annexe 9 — Contributeurs, interviews, conflits d'intérêt

Groupe de l'Académie des technologies ayant contribué à la rédaction du texte

- Albert BENVENISTE (Inria, directeur de recherche émérite, VP du pôle numérique)
- Yves CASEAU (Michelin, Group Chief Digital & Information Officer, en activité)
- Nicolas DEMASSIEUX (Orange Labs, retraité)
- Patrick JOHNSON (Dassault Systèmes, Executive Vice President, Corporate Research & Sciences, en activité)
- Jean-Luc MOLINER (Orange Group CSO, retraité, VP du pôle numérique)
- Sophie PROUST (directrice exécutive de l'Agence de programmes d'Inria, en activité, présidente du pôle numérique)
- Gérard ROUCAIROL (président honoraire de l'Académie des technologies)

Ce rapport a bénéficié d'interviews et de contributions des personnes suivantes

- Narendra AKHADKAR (Schneider Electric, en activité)
- Alexis MERMET-GRANDFILLE (Atos, en activité)
- Gilles LE BORGNE (PSA puis Renault, retraité, Académie des technologies)

- Armel DJEUKOU, Pierre PANFILI (Airbus, en activité)
- Vera SILVA (GE Vernova, en activitié, Académie des technologies)
- Dominique VIGNON (Académie des technologies)
- Bernard TARDIEU (président d'honneur de Coyne et Bellier, Académie des technologies)
- Marie-Luce GODINOT (directrice générale adjointe Innovation, Développement durable, et Systèmes d'Information chez Groupe Bouygues)
- Thibault LOCKHART (EDF)

Ce rapport a été relu par

- Jean-Claude ANDRÉ (Académie des technologies)
- Didier ÉVRARD (Académie des technologies)
- Gilles LE BORGNE (Académie des technologies)

Ce rapport a été visé par le Comité d'éthique, et notamment par

- Alain CADIX (Académie des technologies)
- Nicolas CURIEN (Académie des technologies)

Les jumeaux numériques sont déjà, aujourd'hui, les miroirs de pans entiers de nos sociétés. La ville intelligente et ses mobilités, l'énergie de demain, l'avion du futur, les nouvelles molécules qui seront nos médicaments demain, tous ont leur genèse sous la forme, virtuelle, de leur jumeau numérique. Demain, les jumeaux numériques seront le premier atelier où se rencontreront tous les acteurs d'une filière industrielle, pour créer, optimiser, exploiter et faire fonctionner toutes les infrastructures et tous les systèmes qui accompagneront notre société dans le contexte du changement climatique.

Dans ce rapport, l'Académie des technologies revient sur la véritable nature des jumeaux numériques. Ce rapport explique comment, loin d'être une révolution venue de nulle part, les jumeaux numériques sont l'ultime évolution d'un long progrès, construit sur la rencontre de nombreuses technologies très différentes. Il explique en quoi le positionnement de l'Europe et singulièrement de la France, est de tout premier plan mondial. Il formule des recommandations concernant une meilleure dissémination de cette technologie, la maitrise de son éthique, et les défis scientifiques qui restent devant nous.

Académie des technologies
Le Ponant – Bâtiment A
19, rue Leblanc
75015 PARIS
+33(0)1 53 85 44 44
secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr

ISBN : 979-10-97579-61-6

9 791097 579616

Couverture : Gorodenkoff - Adobe stock