

# Enjeux numériques



## Le numérique pour la réindustrialisation

N°28 - DÉCEMBRE 2024



*Publiées avec le soutien  
de l'Institut Mines-Télécom*

UNE SÉRIE DES

# ANNALES DES MINES

FONDÉES EN 1794

## ENJEUX NUMÉRIQUES

ISSN 2781-1263 (en ligne)

ISSN 2607-9984 (imprimé)

Série trimestrielle - N°28 - Décembre 2024

### Rédaction

Conseil général de l'Économie  
Ministère de l'Économie,  
des Finances  
et de la Souveraineté  
industrielle et numérique  
120, rue de Bercy  
Télédoc 797  
75572 Paris Cedex 12  
Tél. : 01 53 18 52 68  
<http://www.annales.org>

#### Grégoire Postel-Vinay

Directeur de la publication  
et Rédacteur en chef

#### Alexia Kappelmann

Secrétaire générale

#### Daniel Boula

Secrétaire général adjoint

#### Magali Gimon

Assistante de rédaction  
et Maquettiste

#### Nuria Gorris

Webmestre et Maquettiste

### Publication

#### Photos de couverture

Saint Georges terrassant  
le dragon, © Ville de Grenoble /  
Musée de Grenoble-J.L. Lacroix -  
Domaine public

#### Iconographie

Daniel Boula

#### Mise en page

Magali Gimon

#### Impression

Duplprint Mayenne

### Membres du Comité de rédaction

#### Pierre Bonis

Co-président

#### Anne-Lise Thouroude

Co-présidente

#### Edmond Baranes

Godefroy Beauvallet

#### Côme Berbain

Hélène Brisset

#### Serge Catoire

Nicolas Chagny

Jean-Pierre Dardayrol

Éric Freyssinet

Frédéric Garcia

Francis Jutand

Arnaud de La Fortelle

Caroline Leboucher

Bertrand Pailhès

Grégoire Postel-Vinay

Maurice Ronai

Laurent Toutain

Benjamin Vignard

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsabilité de leurs auteurs.

# Le numérique pour la réindustrialisation

04 Introduction  
Léo QUENTIN

## L'INDUSTRIE DU NUMÉRIQUE NATIONALE ET EUROPÉENNE

07 Les semi-conducteurs : piliers de l'innovation  
pour un avenir durable  
Frédérique LE GREVÈS

15 Enjeux et opportunités des réseaux 5G  
pour les entreprises industrielles  
Philippe HERBERT

22 Cybersécurité : comment relever les défis  
de la sécurisation d'une industrie  
de plus en plus interconnectée ?  
Pierre-Yves JOLIVET

29 La cybersécurité est un sport collectif -  
Les normes volontaires, une défense solide  
Franck LEBEUGLE

35 La stratégie française en matière de numérique  
et son impact sur l'industrie  
Loïc DUFLOT

## LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE DES ENTREPRISES

40 Intelligence artificielle :  
entre craintes et espoirs, quelle réalité ?  
Gilbert CETTE et Éric CHANEY

48 Géopolitique de la logistique  
et rôle du numérique  
Maxime FOREST

52 Un dialogue culturel  
entre industrie et numérique  
au service de la productivité industrielle  
Arthur GAUDRON

- 57 **Les jumeaux numériques des systèmes**  
Albert BENVENISTE, Yves CASEAU,  
Nicolas DEMASSIEUX, Patrick JOHNSON,  
Catherine LAMBERT, Jean-Luc MOLINER,  
Sophie PROUST et Gérard ROUCAIROL
- 88 **L'industrie du futur : 10 ans de plans français  
et comparaisons internationales**  
Betina JANNETEAU
- 94 **5G Steel : l'expérience d'ArcelorMittal France**  
Damien SOLLER et David GLIJER
- 104 **Construire des espaces de données interopérables  
pour l'industrie du futur**  
Didier NAVEZ et Sébastien GÉRARD
- 111 **Formation continue : exemple du Campus  
du numérique de la DINUM**  
Fadila LETURCQ et Stéphanie SCHAER

## **HORS DOSSIER**

- 117 **La sécurisation des Jeux Olympiques et Paralympiques  
à l'ère du numérique : un pari réussi pour l'ANSSI**  
Bertrand LE GORGEU, Justine HAMON  
et Thomas HAUTESSEERRES  
(article rattaché au n°26, juin 2024,  
« Le numérique et le sport »)

---

122 **Traductions des résumés**

127 **Biographies des auteurs**

*Ce numéro a été coordonné par  
Léo QUENTIN et Anne-Lise THOUROUDE*

# Introduction

Par Léo QUENTIN

Arcep

Le constat est sans appel : dans son rapport sur la compétitivité européenne publié en septembre 2024, Mario Draghi décrit une Europe qui perd pied dans sa croissance, et qui accuse un retard grandissant de productivité avec les États-Unis, en particulier dans le secteur des nouvelles technologies. L'industrie n'échappe pas à ces constats, comme sont venues le rappeler les données d'Eurostat publiées quelques jours après la sortie de ce rapport, qui révèlent un nouveau décrochage des performances de l'industrie européenne de 1,7 % sur un an dans l'Union et de 2,3 % en France. Avec un écart d'investissement dans la R&D, avec 2,27 % du PIB dans l'Union contre 3,59 % aux États-Unis en 2022, cette dynamique semble bien partie pour perdurer.

Les Vingt-Sept semblent avoir entendu ce message, et l'ont affirmé avec force dans leur déclaration de Budapest : l'Europe doit impérativement combler d'urgence les écarts en matière d'innovation et de productivité, tant par rapport à nos concurrents mondiaux qu'au sein de l'UE. Collectivement, ils appellent ainsi à élaborer une politique industrielle européenne destinée à assurer la croissance des technologies clés de demain, afin d'« assurer notre renouveau industriel et notre décarbonation, et permettre à l'UE de rester une puissance industrielle et technologique » et à « renforcer les capacités technologiques de l'UE, accélérer la transformation numérique dans l'ensemble des secteurs, saisir les possibilités offertes par l'économie des données tout en veillant à la protection de la vie privée et à la sécurité, et favoriser le développement de technologies innovantes ».

Au cœur de ces constats et des actions qui en découleront, le numérique tient ainsi un rôle double. D'un côté, en tant que secteur à part entière, catalyseur d'investissements massifs, qui s'incarne au sein de multiples filières, des infrastructures numériques jusqu'aux services proposés aux entreprises et aux citoyens. Mais aussi en tant que vecteur de transformation des autres secteurs, de l'industrie productive à la logistique, grâce à l'appropriation des technologies numériques par les entreprises.

L'intelligence artificielle, notamment générative, permet d'illustrer cette dualité. D'une part, sa diffusion au sein des entreprises devrait représenter une source de gains de productivité conséquents. D'autre part, l'industrie liée à son développement, des ressources cloud nécessaires à l'entraînement de nouveaux modèles à la création de services à haute valeur ajoutée reposant sur leur utilisation, en passant la production de nouveaux modèles, implique une chaîne de valeur aussi riche que la compétition y est féroce.

La convergence des enjeux de réindustrialisation et de développement du numérique, au cœur de ce numéro d'*Enjeux numériques*, apparaît dès lors comme un sujet aussi riche qu'essentiel.

D'abord, le tissu industriel qui soutient le développement du numérique, par exemple dans le domaine de l'électronique et des semi-conducteurs, incarnés en France par des entreprises comme STMicroelectronics, inscrit en grande partie son développement dans une perspective de réindustrialisation française et européenne, dans un contexte de tensions géopolitiques et de concurrence internationale féroce.

Ensuite, cette montée en puissance des industries françaises et européennes du numérique doit contribuer à donner accès aux briques technologiques cruciales pour la croissance et la compétitivité du tissu industriel dans son ensemble. La connectivité constitue l'un de

ces éléments essentiels, et l'utilisation de la 5G dans l'industrie constitue un exemple frappant des apports croisés du numérique à la réindustrialisation. Grâce aux innovations qu'elle apporte, cette technologie ouvre un champ d'innovations et de cas d'usages nouveaux aux industriels comme ArcelorMittal qui s'en saisissent. Mais elle apporte aussi des perspectives de croissance pour le marché des équipements, des logiciels télécoms et de l'opération de ces réseaux. Plus généralement, la question des infrastructures numériques du futur, à laquelle est consacré le numéro de septembre de cette revue, sera un levier du renouveau industriel français et européen.

Au cœur de la transformation des processus industriels ou logistiques grâce au numérique, l'utilisation des données créées le long des chaînes de production et d'approvisionnement constitue un point central. Son importance semble reconnue dans la plupart des secteurs, notamment pour l'optimisation et le pilotage de la production, de la distribution, de la gestion des ressources ou tout autre processus critique des entreprises. Dans cette perspective, le développement et l'utilisation dans l'industrie de jumeaux numériques, outils destinés notamment à simuler et à offrir des possibilités d'expérimentations sur des systèmes complexes, semble constituer un levier de compétitivité important pour chaque filière. Ils devraient en effet permettre de réduire les coûts et d'améliorer la qualité des produits, dans une perspective collaborative au sein de l'entreprise ou d'un groupe d'acteurs.

Mais d'un paradigme d'utilisation des données par son seul producteur, émerge désormais un nouvel enjeu de partage des données entre acteurs, au sein d'une filière ou autour d'un projet commun. Fluidifier les échanges de données entre différents acteurs de l'industrie ou de la logistique, c'est créer de nouvelles opportunités de création de services, d'optimisation, d'innovation, de réduction des coûts, etc. La notion d'espace de données, des écosystèmes d'échanges de données mêlant infrastructure de partage et cadre de gouvernance entre acteurs partageant un objectif commun, se présente comme une solution pour faire émerger une gestion des données plus ouverte et collaborative.

Cette transformation des systèmes industriels grâce au numérique n'est évidemment pas sans risques, au premier rang desquels figure la cybersécurité, notamment celle des industries critiques. Dans un contexte d'explosion des menaces, la cybersécurité des systèmes industriels présente des enjeux spécifiques, qui risquent d'être exacerbés par le recours à l'intelligence artificielle et la perspective du développement de l'informatique quantique. Ceci appelle à une réponse collective et innovante, à laquelle par exemple la normalisation se propose de répondre.

Comment, finalement, ne pas parler d'intelligence artificielle (IA), en particulier générative (IAG) qui occupe le débat public et apparaît comme le nouveau champ de bataille de la compétition dans le numérique ? Si l'apport de l'IA pour l'industrie, par exemple pour la maintenance prédictive, semble largement accepté, le potentiel réel de l'IAG pour la productivité et la compétitivité industrielle reste encore largement inconnu, et dépendra de la façon dont les entreprises se saisissent de cette nouvelle technologie.

La perspective qu'ouvre la diffusion de l'IA dans l'industrie est souvent technologique, mais doit également laisser entrevoir les mutations du travail profondes qu'apportent la diffusion des technologies numériques dans l'industrie, notamment dans les pratiques opérationnelles et dans la prise de décision. L'acculturation au numérique apparaît donc comme cruciale, tout comme la question de la formation au numérique, dont la question se pose également au sein de l'État.

L'État, pour finir, se mobilise évidemment sur ces deux volets du lien entre numérique et réindustrialisation. D'abord, pour accompagner et soutenir le développement et la réindustrialisation de l'industrie du numérique français, en particulier dans les infrastructures comme les datacenters ou pour des filières d'excellence comme l'électronique. Cet effort se réalise au service d'une politique qui vise à démocratiser l'accès au numérique

pour les entreprises comme pour les citoyens et favoriser l'innovation, tout en protégeant les données et la souveraineté industrielle française, sans oublier l'impact environnemental du numérique. Ensuite, pour diffuser les apports de l'industrie du futur, notamment auprès des petites et moyennes entreprises, et leur apporter ainsi des gains de productivité et de compétitivité, mais également répondre aux enjeux sociaux et environnementaux auxquels fait face l'industrie, grâce par exemple à des efforts de financement ou de formation.

Tous ces sujets, abordés dans ce numéro, ne couvrent évidemment pas la multitude des questions que soulève le lien entre numérique et réindustrialisation. Nous espérons néanmoins que les points de vue présentés permettront d'ouvrir quelques pistes de réflexion sur ce sujet passionnant.

Bonne lecture !

# Les semi-conducteurs : piliers de l'innovation pour un avenir durable

Par **Frédérique LE GREVÈS**  
Présidente de STMicroelectronics France

L'industrie des semi-conducteurs joue un rôle clé pour relever les défis sociétaux de la transition énergétique et de la transformation digitale. En rendant les objets plus connectés, plus intelligents et moins énergivores, les puces améliorent tous les objets de notre quotidien. STMicroelectronics, un *leader* mondial des semi-conducteurs, illustre l'importance de l'innovation et de la maîtrise de la chaîne de production.

L'industrie de la microélectronique, confrontée à des défis technologiques, économiques et géopolitiques, nécessite des investissements massifs en R&D et capacités de production. La formation et le recrutement de talents qualifiés et la promotion de la diversité sont également des enjeux majeurs pour assurer la compétitivité et la durabilité de cette industrie stratégique.

## INTRODUCTION

Invisibles et pourtant omniprésents, les semi-conducteurs, ou puces, constituent le cœur battant des dispositifs électroniques modernes. Ils sont essentiels à la performance, la sécurité, la connectivité et la frugalité énergétique pour de nombreux objets de notre quotidien (téléphones, ordinateurs, électroménager...) pour les solutions de mobilité (avions, voitures...) ainsi que pour un ensemble d'infrastructures et services structurants (centres de données, systèmes photovoltaïques, éoliennes, dispositifs médicaux, équipements pour le spatial...).

En 2023, l'industrie mondiale des semi-conducteurs a produit plus de 900 milliards de puces, soit environ 140 par personne sur Terre<sup>1</sup>. Entre 2022 et 2030, la demande mondiale devrait doubler pour atteindre 1 000 milliards de dollars, contre 533 milliards en 2023. Le nombre d'objets connectés, qui était d'environ 1 milliard en 2010, passera quant à lui à 50 milliards en 2025 et à 100 milliards en 2030<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Commission européenne, Parlement européen, Eurostat (2022), <https://www.consilium.europa.eu/fr/infographics/eu-chips-act/>

<sup>2</sup> TACONET M. & BOWERS J. (2021), « Objets connectés : 50 milliards d'émetteurs de CO<sub>2</sub> ? », *Polytechnique Insights*, <https://www.polytechnique-insights.com/dossiers/planete/comment-reduire-lempreinte-carbone-du-numerique/objets-connectes-50-milliards-demetteurs-de-co2/>

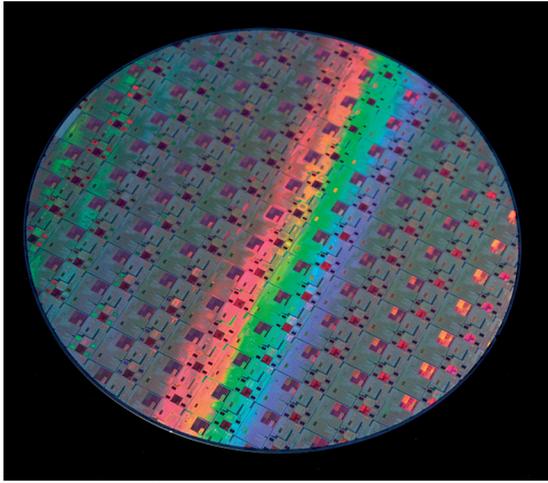


Figure 1 : Plaquette de silicium de 300 mm de diamètre (Source : STMicroelectronics).

## LES SEMI-CONDUCTEURS : CATALYSEURS POUR LA TRANSITION ENVIRONNEMENTALE ET LA TRANSFORMATION DIGITALE

### Transition environnementale : vers une économie durable

Les semi-conducteurs sont des catalyseurs essentiels pour une économie plus durable. Prenons l'exemple des technologies photovoltaïques. Elles reposent sur des cellules solaires à base de semi-conducteurs, qui captent et convertissent l'énergie solaire en électricité avec une efficacité croissante, réduisant ainsi notre dépendance aux combustibles fossiles et diminuant les émissions de gaz à effet de serre. Autre exemple, les semi-conducteurs sont au cœur des dispositifs de stockage d'énergie, tels que les batteries lithium-ion, indispensables pour les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'électricité dans le véhicule électrique, dans la mesure où ils contrôlent la charge et décharge de la batterie *via* le BMS (Battery Management System).

Les semi-conducteurs jouent également un rôle crucial dans les économies d'énergie. Par exemple, les prochaines générations d'appareils électroménagers, tels que les machines à laver, intègrent des semi-conducteurs pour optimiser leur consommation d'énergie. Équipés de capteurs intelligents et de systèmes de contrôle avancés, ils ajustent automatiquement les cycles de lavage en fonction de la charge, réduisant ainsi significativement la consommation d'eau et d'électricité. Cette innovation technologique permet non seulement de diminuer les coûts énergétiques pour les consommateurs, mais contribue également à une réduction substantielle de l'empreinte carbone globale.

Ainsi, grâce à des algorithmes d'apprentissage automatique, un capteur estime le poids des vêtements en mesurant le courant consommé par le moteur, tandis qu'un autre algorithme utilise un autre capteur de mouvements à 6 axes pour éviter le balourd de la machine. Ces algorithmes, exécutés sur un microcontrôleur faible consommation STM32G0, ajustent précisément le courant, l'eau et le détergent nécessaires, permettant ainsi d'économiser de 15 à 40 % d'énergie et d'eau par cycle de lavage.

## **Transformation digitale : l'ère de l'Intelligence Artificielle et de l'Internet des Objets**

La transformation digitale est indissociable des avancées en matière de semi-conducteurs. Les processeurs, microprocesseurs, microcontrôleurs permettent des calculs rapides et complexes, ouvrant la voie à des innovations telles que l'intelligence artificielle (IA) et l'Internet des objets (IoT). Les puces spécialisées, telles que les unités de traitement graphique (GPU) et les unités de traitement neuronal (NPU), permettent des performances accrues pour les usages du quotidien, rendant possible le déploiement de solutions d'IA dans divers domaines comme dans celui de la santé, de la mobilité intelligente, de la logistique ou de la sécurité.

L'IoT, qui connecte des milliards de dispositifs à travers le monde, repose également sur des semi-conducteurs. Ils permettent de miniaturiser les capteurs et les dispositifs de communication, tout en garantissant une consommation énergétique réduite. Ils facilitent la création de réseaux intelligents et interconnectés, transformant notre manière de vivre et de travailler au quotidien.

### **STMicroelectronics : un *leader* mondial**

STMicroelectronics (ST) est *leader* mondial sur le marché de la microélectronique et compte plus de 50 000 collaborateurs dans le monde. En France, ST compte 12 000 collaborateurs (dont 1 200 nouvelles embauches en 2023), répartis sur 13 sites, parmi lesquels 4 sites industriels solidement ancrés au cœur des territoires.

Le Groupe collabore avec plus de 200 000 clients dans le monde et des milliers de partenaires. Les principaux marchés finaux de l'entreprise incluent l'automobile, l'industrie, l'électronique personnelle, les équipements de communication, ainsi que les ordinateurs et périphériques informatiques. Les technologies de ST permettent une mobilité plus intelligente, une gestion plus efficace de l'énergie et de la puissance, ainsi que le déploiement à grande échelle d'objets autonomes connectés au *cloud*. ST est engagé pour atteindre l'objectif de devenir neutre en carbone sur les scopes 1 et 2 et une partie du scope 3 d'ici 2027.

## **L'INDUSTRIE DES SEMI-CONDUCTEURS : ENJEUX DE SOUVERAINETÉ DANS UN SECTEUR STRATÉGIQUE MAJEUR**

### **Une industrie complexe**

#### *Les différents modèles économiques*

L'industrie des semi-conducteurs repose sur plusieurs modèles économiques, chacun ayant ses propres défis et spécificités.

ST est ce que l'industrie du semi-conducteur appelle un « IDM » (*integrated device manufacturer*) : la société conçoit et fabrique la majorité des produits qu'elle commercialise dans ses propres usines, et travaille avec des fabricants sous contrat (*foundries*) pour le solde. Le modèle de ST repose sur l'intégration de l'ensemble de la chaîne de valeur, de la R&D sur les matériaux, les *process* et les produits, au design des produits et à leur fabrication, couvrant les deux étapes essentielles (*front-end* : fabrication ; *back-end* : test & assemblage). Ce modèle permet une maîtrise approfondie de la propriété intellectuelle,

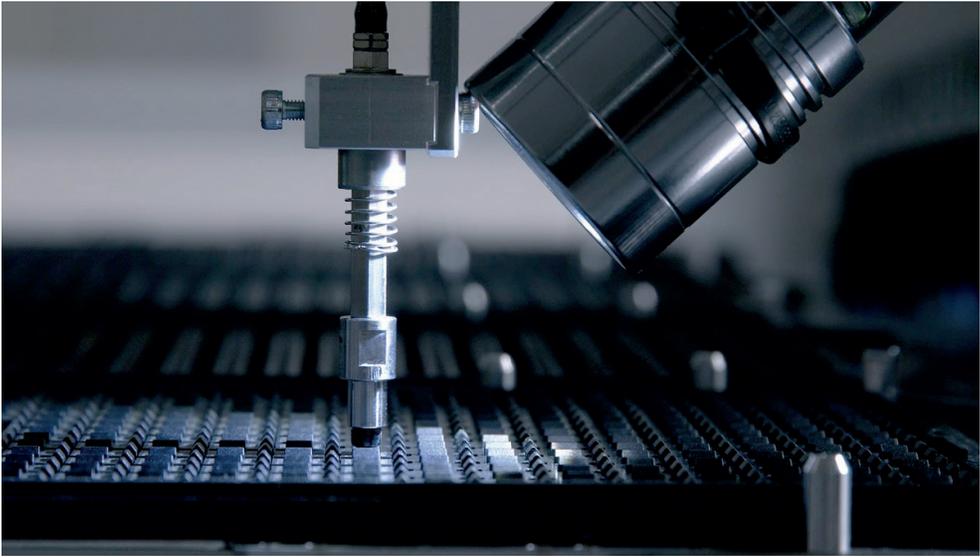


Figure 2 : Processus de production (Source : STMicroelectronics).

des capacités de design et de fabrication de produits complexes ; en contrepartie d'investissements massifs en infrastructures et en technologies de pointe.

Parallèlement, les entreprises dites "fabless" (soit sans *fab*, les usines de production de semi-conducteurs), telles que Qualcomm ou Nvidia, se concentrent sur la conception des puces, leur marketing et leurs ventes, et externalisent la fabrication à des fabricants sous contrat (*foundries*, comme TSMC ou GlobalFoundries) qui disposent de leurs propres usines et travaillent pour un grand nombre de clients.

ST est un IDM mais pas à 100 % : la société fait des arbitrages pour optimiser la charge de ses usines, ses coûts, ses investissements en R&D liés aux *process* de production et aux produits. Si la majorité des produits qu'elle vend est produite en interne, notamment pour les produits très différenciés utilisant ses technologies propriétaires, une partie est produite par les fondeurs pour utiliser au mieux leur capacités et les économies d'échelle qu'ils permettent. Les fondeurs peuvent également participer à la résilience industrielle pour offrir des sources d'approvisionnement complémentaires.

### *La complexité de la R&D*

La recherche et développement (R&D) est un pilier essentiel de l'industrie des semi-conducteurs, complexe à la fois d'un point de vue technologique et économique. Les innovations dans ce secteur nécessitent des avancées continues en physique, chimie, et ingénierie. ST doit constamment innover pour améliorer ses composants en matière de performance, de réduction de la consommation **énergétique** et de miniaturisation, répondant ainsi aux exigences croissantes du marché. Un IDM comme ST a ainsi deux types de R&D très différentes, la R&D qui permet de développer de nouveaux procédés d'industrialisation et de production en très forts volumes pour ses usines, et la R&D produit qui crée, teste et lance des produits nouveaux.

D'un point de vue économique, la R&D dans les semi-conducteurs requiert des investissements importants. En 2023, ST a consacré près de 12 % de son chiffre d'affaires à la R&D, soulignant l'importance de cette activité pour l'entreprise. Ces investissements sont nécessaires pour rester compétitifs et continuer à offrir des produits de haute technologie.

À titre d'exemple, près d'un tiers des salariés de ST en France travaillent en R&D, illustrant l'engagement de l'entreprise envers l'innovation et le développement technologique.



Figure 3 : Opérateur en salle blanche (Source : STMicroelectronics).

### *Un processus de fabrication long et complexe*

Le processus de fabrication des semi-conducteurs est l'un des plus longs et complexes de l'industrie manufacturière. La fabrication d'une plaquette de semi-conducteurs implique plusieurs centaines d'étapes, dont la lithographie, le dopage, la gravure et le dépôt de matériaux. Chaque étape nécessite une précision extrême et des contrôles de qualité rigoureux, garantissant ainsi la fiabilité et la performance des puces produites.

Le processus complet de fabrication, d'assemblage et de test d'une puce peut prendre environ 5 mois. Cette durée inclut des centaines d'étapes de traitement et de multiples contrôles de qualité, reflétant la complexité et la rigueur du processus. Les salles blanches où sont fabriquées les puces doivent être extrêmement propres. L'air y est renouvelé entièrement toutes les sept secondes, et il y a 1 000 fois moins de particules en suspension que dans un bloc opératoire, assurant ainsi un environnement optimal pour la production de composants de haute précision.

### **Une Industrie globalisée**

L'industrie des semi-conducteurs est la plus globalisée aujourd'hui, et l'une sinon la plus complexe en termes de modèles de chaîne d'approvisionnement, qui peuvent différer largement entre ses différents marchés finaux. La pandémie du Covid-19 a également mis en lumière le fonctionnement de cette industrie stratégique, et suscité un certain nombre de mouvements de fond qui ont un impact structurant sur son fonctionnement : volonté de renforcement des capacités de production « locales » à rebours de l'optimisation totale d'une chaîne d'approvisionnement mondialisée, renforcement des moyens accordés à la R&D, auxquels sont venues s'ajouter des frictions commerciales et technologiques.



Figure 4 : Site ST de Crolles - fabrication de puces 300 mm en salle blanche (Source : STMicroelectronics).

### *Initiatives et stratégies*

Prenons l'exemple des capacités de production. Depuis la pandémie, de nombreux pays ont lancé des initiatives pour renforcer les capacités de production basées sur leur territoire :

- Les États-Unis : Le Chips & Science Act adopté en 2021 prévoit des subventions de l'ordre de 52 milliards de dollars pour soutenir la recherche, le développement et la fabrication de semi-conducteurs sur le sol américain. Les entreprises ont promis plus de 395 milliards de dollars d'investissements dans les semi-conducteurs et l'électronique au cours des deux années qui ont suivi l'adoption de la loi, créant ainsi plus de 115 000 emplois.
- L'Union européenne : Le Digital Compass lancé en 2021 vise à doubler la part de l'Europe dans la production mondiale de semi-conducteurs, la portant à 20 % d'ici 2030. Le "European Chips Act" mobilisera plus de 43 milliards d'euros d'investissements publics et privés.
- La Chine : Le plan « Made in China 2025 » est un plan stratégique visant à réduire la dépendance aux technologies étrangères et à promouvoir l'innovation locale, avec pour objectif d'être autosuffisant à 70 % pour les équipements de fabrication intelligente et de 50 % pour les logiciels industriels d'ici 2025<sup>3</sup>.
- La Corée du Sud : Le gouvernement sud-coréen a annoncé un plan de soutien privé-public de 450 milliards de dollars sur 10 ans pour stimuler l'innovation et la

---

<sup>3</sup> DUCHATEL M. (2021), « Semi-conducteurs : la quête de la Chine », Institut Montaigne.

production dans ce secteur. Plus récemment, en mai, la Corée du Sud a lancé un nouveau plan de soutien de 19 milliards de dollars pour son industrie des puces<sup>4</sup>.

- Le Japon : Depuis sa « Stratégie de l'industrie des semi-conducteurs et du numérique » lancée en juin 2021, le Japon a levé 25,3 milliards de dollars pour le secteur des puces. Afin d'améliorer les capacités de recherche et développement et de production de semi-conducteurs, le Japon accorde également des subventions massives, notamment en accueillant des investissements étrangers pour construire des usines et en renforçant la recherche et le développement de procédés de pointe et la production locale<sup>5</sup>.

Entre 2021 et 2023, l'industrie des semi-conducteurs aurait investi plus de 500 milliards de dollars dans plus de 85 installations de fabrications de puces dans le monde<sup>6</sup>.

Dans le cadre du Chips Act européen, ST continue à investir en France et en Europe, avec notamment deux usines à l'état de l'art en cours de construction : à Crolles en Isère (en partenariat avec GlobalFoundries) sur des technologies digitales essentielles à l'industrie, à l'IoT et à l'automobile, et à Catane en Italie avec le « Silicon Carbide Campus<sup>7</sup> » ; le carbure de silicium est une technologie clef pour une meilleure performance énergétique de l'industrie et les véhicules électriques.

### *Coopérations nationales et internationales*

Dans l'industrie des semi-conducteurs, la coopération est essentielle à plusieurs niveaux. À l'échelle nationale, une collaboration étroite entre les différents acteurs – entreprises, *start-up*, instituts de recherche, universités et gouvernements – permet de renforcer les capacités de production, d'innover plus rapidement et de former une main-d'œuvre qualifiée. Cette synergie nationale est cruciale pour créer un écosystème robuste et compétitif.

Cependant, la complexité et la mondialisation de la chaîne d'approvisionnement des semi-conducteurs rendent également indispensable une coopération internationale. Les alliances et partenariats globaux permettent de diversifier les sites de production, de partager les coûts élevés de recherche et développement, et d'harmoniser les normes techniques. En outre, ils renforcent la sécurité des chaînes d'approvisionnement et garantissent l'accès aux technologies critiques, tout en facilitant le commerce mondial.

En somme, la coopération internationale est un levier indispensable pour le progrès, la résilience et la compétitivité de l'industrie des semi-conducteurs.

---

<sup>4</sup> LOUKIL R. (2024), « La Corée du Sud lance un plan de soutien de 19 milliards de dollars pour l'industrie des puces », *Usine Nouvelle*, <https://www.usinenouvelle.com/article/la-coree-du-sud-lance-un-plan-de-soutien-de-19-milliards-de-dollars-pour-l-industrie-des-puces.N2213339>

<sup>5</sup> CHARLES F. (2024), « Le Japon investit 3,6 milliards d'euros supplémentaires dans les semi-conducteurs », RFI, <https://www.rfi.fr/fr/%C3%A9conomie/20240402-le-japon-investit-3-6-milliards-d-euros-suppl%C3%A9mentaires-dans-les-semi-conducteurs>

<sup>6</sup> LOUKIL R. (2022), « 84 nouvelles usines de puces devraient être mises en chantier dans le monde jusqu'en 2023 », *Usine Nouvelle*, <https://www.usinenouvelle.com/article/84-nouvelles-usines-de-puces-devraient-etre-mises-en-chantier-dans-le-monde-jusqu-en-2023.N2077141>

<sup>7</sup> <https://newsroom.st.com/media-center/press-item.html/c3262.html>

## CONCLUSION

L'industrie des semi-conducteurs demeure confrontée à des défis complexes et interdépendants, nécessitant des réponses stratégiques et innovantes pour garantir sa pérennité et sa compétitivité, tout en respectant les impératifs environnementaux.

Sur le plan technologique, la loi de Moore, énoncée en 1965, a longtemps servi de boussole à l'évolution de l'industrie des semi-conducteurs. Cependant, cette tendance atteint aujourd'hui ses limites physiques et économiques. La miniaturisation continue des transistors – un des éléments constitutifs d'une puce – pose des défis majeurs en termes de dissipation thermique, de consommation énergétique et de coûts de fabrication. Pour surmonter ces obstacles, l'industrie explore de nouvelles avenues, notamment l'utilisation de matériaux alternatifs tels que le graphène, le nitrure de gallium ou encore le carbure de silicium.

Les défis économiques et géopolitiques sont également significatifs. La fabrication de semi-conducteurs est une activité hautement capitalistique, nécessitant des investissements massifs (la création d'une nouvelle usine peut coûter plusieurs dizaines de milliards d'euros) et une innovation continue pour maintenir un avantage compétitif.

Par ailleurs, la production de semi-conducteurs étant encore fortement concentrée en Asie de l'Est, expose l'industrie à des risques géopolitiques considérables. Pour atténuer ces risques, la diversification des chaînes d'approvisionnement est essentielle pour répondre aux enjeux de souveraineté liés à cette industrie stratégique.

Les défis humains ne sont pas moins importants. La pénurie de talents qualifiés représente un enjeu majeur pour l'industrie. Attirer et retenir des ingénieurs et des scientifiques hautement spécialisés nécessite non seulement des salaires compétitifs, mais aussi un environnement de travail stimulant et innovant. En France près de 18 000 postes sont à pourvoir sur 3 ans dans le secteur électronique, et en Europe, ce sont près de 350 000 talents qu'il nous faut attirer d'ici 2030 pour répondre aux attentes du secteur<sup>8</sup>. En outre, promouvoir la diversité et l'inclusion au sein de l'industrie est crucial. Assurer l'équité des genres et l'inclusion des minorités ethniques et culturelles peut enrichir l'innovation et la créativité, éléments essentiels à la croissance et à la compétitivité de l'industrie.

En conclusion, c'est en relevant ces défis avec des solutions innovantes et durables que l'industrie européenne des semi-conducteurs peut assurer son avenir et sa compétitivité sur la scène mondiale.

---

<sup>8</sup> CABINET KYU POUR KYU pour OPCO 2i, « Complément d'étude Emploi Formation 2022 », EDEC Électronique et Photonique.

# Enjeux et opportunités des réseaux 5G pour les entreprises industrielles

Par Philippe HERBERT  
Mission 5G

Au-delà des bénéfices pour le grand public, la 5G constitue un levier de compétitivité et de croissance primordial pour l'industrie. Les nouvelles possibilités et les avantages qu'elle apporte, la faible latence, le débit très élevé et sécurisé mais surtout la possibilité de piloter les usages du réseau et de connecter de très nombreux terminaux et objets, permettent de répondre à des enjeux clés pour l'industrie du futur pilotée par la donnée.

La 5G apporte un ensemble d'innovations pour de nombreux secteurs clés de l'économie, notamment pour l'industrie 4.0 (la maintenance préventive, la fabrication de haute précision, le suivi logistique d'un très grand nombre d'articles, la multiplication des capteurs) mais aussi pour le marché des équipements et des logiciels télécoms. Toutes ces opportunités sont en marche, à nous de les saisir.

La 5G s'illustre ainsi comme un outil de souveraineté industrielle et économique qui est en train de se mettre en place sous nos yeux.

## INTRODUCTION

La 5G constitue une rupture technologique majeure pour l'ensemble des activités professionnelles, comme l'a été l'avènement de la communication mobile pour le grand public. En raison de ses performances tout d'abord (latence, débit, connexion massive d'objets, sécurité des données...), mais aussi en termes de nouveaux champs de fonctionnalités : par exemple le "network slicing"<sup>1</sup> ou la mobilité des machines ouvrent la voie vers de nouveaux usages professionnels des réseaux mobiles publics et privés. Les caractéristiques de la 5G permettent d'envisager de nouvelles opportunités pour l'industrie. La mise en œuvre de nombreux cas d'usage, liés au concept de l'Industrie 4.0, repose sur la 5G : lignes de production reconfigurables, maintenance prédictive et réalité augmentée, véhicules industriels autonomes, jumeau numérique, etc. Le standard de la 5G, conçu par des industriels à l'échelle mondiale, a intégré dans son architecture une véritable dimension industrielle.

Par ailleurs la transition de l'industrie vers des processus « profondément numérisés », c'est-à-dire vers l'industrie dite « 4.0 », est un enjeu fondamental de croissance et de compétitivité pour l'industrie française. C'est aussi l'un des principaux moteurs de la

---

<sup>1</sup> Le "slicing" consiste à offrir, d'un point de vue réseau, des ressources quantitatives et qualitatives à la demande pour un utilisateur, un groupe d'utilisateurs ou pour un type de service donné (Source : CSF Infrastructures numériques (2020), « 5G : Stratégie et Enjeux. Livre Blanc », septembre 2020, p. 8).

décarbonation comme le démontre Arcelor Mittal en déclarant que sans la 5G leur engagement de diminuer de 40 % leur empreinte carbone d'ici 2030 ne pourrait pas être tenu.

Cependant, l'adoption de la 5G par l'ensemble des industriels qui pourraient en tirer un bénéfice dans le cadre de leur numérisation reste un défi majeur au regard de l'importance des enjeux et opportunités pour les entreprises industrielles. Elle nécessite une forte mobilisation des filières industrielles, des acteurs des télécoms, des équipementiers industriels et des intégrateurs, sociétés de services et de conseil.

Pour accélérer ce mouvement, le Gouvernement m'a confié la Mission 5G industrielle qui a donné lieu à la publication d'un rapport<sup>2</sup>; la Mission a été étendue à la mise en œuvre du projet : « 5G et infrastructures numériques au service de la réindustrialisation ». L'objectif de la Mission 5G industrielle est d'accélérer le déploiement d'applications industrielles de la 5G pour en faire des leviers de compétitivité, d'attractivité et d'innovation de l'industrie française. Pour cela, il a fallu :

- établir un dialogue soutenu avec les acteurs industriels et télécoms afin de les inciter à se saisir des usages de la 5G en multipliant les collaborations entre filières notamment automobiles, aéronautiques et ferroviaires ;
- animer le réseau des 27 plateformes d'expérimentation 5G en publiant un catalogue<sup>3</sup> des cas d'usage des plateformes et en partageant les informations et les projets réalisés ;
- et mettre en œuvre progressivement de nouveaux usages au service de la réindustrialisation tout cela devant servir le renforcement de solutions françaises souveraines pour l'industrie du futur.

L'adoption de la 5G par les industriels français est un sujet incontournable et stratégique, de court comme de moyen terme. De moyen terme tout d'abord, car ce marché ne sera pas mature avant 2025-2026. Cependant, les bases sur lesquelles reposent la diffusion des usages de la 5G dans l'industrie peuvent et doivent être construites dès maintenant. La 5G industrielle est en cela un sujet de très court terme.

## LES ENJEUX ET LES OPPORTUNITÉS

La 5G s'inscrit dans un contexte pluriel. Tout d'abord, le contexte est celui de la transition numérique de l'industrie, dont la 5G constitue une brique fondatrice essentielle. Elle représente en cela un enjeu de compétitivité, d'impact environnemental et de relocalisation pour l'industrie française. Ensuite, la 5G s'inscrit dans le contexte d'un changement de paradigme dans le monde des télécoms. La virtualisation des réseaux mobiles avec la 5G et l'émergence de marchés professionnels pour ces réseaux sont deux dynamiques sous-tendant le marché de la 5G dans l'industrie. Il s'inscrit donc à la croisée du monde des télécoms, de l'industrie, mais aussi du monde plus large des technologies de l'information et de la communication.

### La 5G, enjeux de compétitivité et de relocalisation

La valeur de la 5G pour l'industrie n'est pas directement située dans les infrastructures de réseaux en elles-mêmes : elle se trouve dans les usages et applications industriels qui vont être développés grâce aux caractéristiques et performances des réseaux 5G. La mise

---

<sup>2</sup> Rapport de la Mission 5G industrielle publié le 4 mars 2022, <https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/etudes-et-statistiques/dossiers/rapport-mission-5g.pdf>

<sup>3</sup> Catalogue des cas d'usage 5G publié en septembre 2024 par le CSF Infrastructures Numériques.

en œuvre de ces usages n'implique par ailleurs pas que la 5G, mais l'ensemble des technologies et applicatifs liés, au premier rang desquels l'Intelligence Artificielle, le *cloud* ou *edge computing*.



Figure 1 : Exemples de cas d'usage industriels de la 5G identifiés par la Mission 5G industrielle (Source : Mission 5G).

La diversité de ces applications est large comme le démontre le catalogue des usages 5G (qui comporte plus de 50 cas), et reste encore largement inexplorée à ce jour. Quelques exemples observés en production durant les travaux de la Mission peuvent être mentionnés :

- Airbus à Toulouse utilise la 5G sur les chaînes de montage des fuselages des avions. Le phénomène de cage de Faraday rendait jusqu'à présent toutes communications difficiles voire impossibles pour les opérateurs. Grâce à la 5G et à ses capacités de géolocalisation précises (< 1 m), il est possible de contrôler non seulement la mise en place et la qualité des rivetages mais aussi les zones d'utilisation des outillages.
- La SNCF, à Rennes, a développé un cas d'usage de réalité augmentée pour les opérations de maintenance. Les performances de la 5G sont indispensables pour avoir une connectivité suffisante et une continuité de service en mobilité sur leurs sites industriels (technicentres), où les réseaux de type *wifi* ont du mal à se propager.
- Alcatel Submarine Networks à Calais a déployé la 5G depuis 2022 avec plus d'une dizaine de cas d'usage opérationnels. La société a utilisé ce déploiement comme levier de transformation digitale et d'augmentation de la capacité de production avec des premiers résultats significatifs en termes de gain. L'opérateur connecté est devenu un opérateur augmenté avec : accès en tous lieux aux applications métiers et aux bases de données, partage collaboratif et fluide des données, interaction à distance avec les machines et les robots. Il en résulte une réduction de la pénibilité et une valorisation de son intervention sans oublier une capacité de connexion indéfectible en cas de danger.
- Air France déploie sur le site de l'aéroport Charles de Gaulle un terminal connecté qui rend les escales plus courtes et plus efficaces grâce à la 5G. En effet au lieu d'éta-

blir des connexions physiques (*wifi* impossible) l'avion, son équipage et son escale peuvent interagir dès l'accès au réseau local 5G d'Air France pour transmettre et contrôler toutes les données nécessaires aussi bien à la maintenance qu'au service commercial.

- Acome a mis en place, sur les machines de son usine de production de câbles, des caméras haute définition couplées à de l'intelligence artificielle qui permettent en temps réel d'analyser la couleur des gaines afin de diminuer les déchets dus à la transition de couleur et d'éviter des couleurs non conformes.

En général, on constate que les usages de la 5G sont très divers selon le type d'industrie et la nature du site. Ceux qui ont été cités le plus souvent sont :

- les véhicules industriels autonomes (AGV) ;
- les opérateurs connectés en mobilité, notamment avec la réalité augmentée ;
- la maintenance prédictive<sup>4</sup> ;
- les lignes de production reconfigurables ;
- la communication "machine-to-machine" (M2M)<sup>5</sup> des capteurs sans-fils ;
- la surveillance et la gestion à distance, notamment de flottes ;
- les communications critiques à très faible latence, par exemple pour stopper le processus de production ;
- les applications nécessitant la réalité virtuelle ou augmentée.

De plus, il ressort des échanges avec des industriels du secteur automobile allemand que les cas d'usage de la maintenance prédictive, des applications à distance et de la communication M2M sans-fils y ont été identifiés comme les plus prometteurs. La mise en place d'un réseau privé 5G dans l'usine Tesla de Berlin est cité en exemple. Cela a permis de supprimer jusqu'à 90 % des problèmes d'arrêt sur les lignes d'assemblage. En effet, Tesla a intégré nativement l'infrastructure du réseau privé 5G dans son processus de production afin de maximiser l'impact de la mobilité/flexibilité induite par la connectivité tous azimuts de la 5G. La notion de chaîne d'assemblage linéaire fixe a disparu au profit d'une multitude de tâches et séquences pilotées et ajustées en fonction de la demande et de la disponibilité des opérateurs / robots / machines.

La 5G dans un contexte industriel peut également permettre l'accès aux services plus classiques de transmission de la voix avec des terminaux "push-to-talk"<sup>6</sup>. Bien que moins innovants, ces usages ne sont pas à négliger : ils permettent aux industriels d'agréger la majorité de leurs besoins en connectivité sur un seul réseau 5G robuste, sécurisé et pérenne.

Ainsi, à travers les nombreux cas d'usage qu'elle permet, la 5G apparaît comme une des composantes essentielles de l'industrie du futur.

Les nombreux cas d'usage permis par la 5G lui donnent un rôle clé dans l'industrie du futur, comparable à celui d'un « système nerveux ». La maîtrise de la 5G par les indus-

---

<sup>4</sup> Voir aussi à ce sujet : VILLETTE M. (2023), « Les problèmes de maintenance dans l'industrie : un symptôme, mais de quoi ? Entretien avec Pierre Messulam », *Annales des Mines - Gérer & Comprendre*, n°152, <https://annales.org/gc/2023/gc152/2023-06-04.pdf>

<sup>5</sup> C'est-à-dire les technologies permettant à deux objets de communiquer.

<sup>6</sup> LD Expertise (2021), « Étude de marché sur les "Réseaux Mobiles Privatifs" (RMP) », septembre 2021, réalisé pour le compte de Nokia.

triels et leurs équipementiers est donc un levier de transformation vers l'industrie du futur. La 5G industrielle n'est donc pas tant un sujet d'infrastructures de réseau, mais plutôt un sujet d'intégration d'une nouvelle technologie de connectivité des données dans des contextes industriels variables et complexes en cours de numérisation.

## La 5G, les opportunités : nouveau marché et nouveaux acteurs

La 5G, par sa conception et son architecture, constitue une rupture pour le marché des télécoms. Au-delà des aspects techniques et d'amélioration des performances, la Mission identifie de nombreuses opportunités sous-jacentes à la manière dont la 5G a été conçue.

Tout d'abord, contrairement à ses prédécesseurs, la 5G a été pensée et conçue pour répondre à des usages professionnels. La 5G dite "Non-Stand Alone" (NSA), telle qu'elle a été lancée dès 2020 en France, puis maintenant la 5G "Stand Alone" permet aux opérateurs de satisfaire aux besoins de connexion croissante. Cependant, la raison d'être à terme de la 5G est bien « la mutation de l'industrie, des services et de la mobilité qu'elle devrait permettre »<sup>7</sup>.

La standardisation de la 5G à travers la publication de *releases* par le 3GPP, organisme en charge de la définition des spécifications techniques des réseaux mobiles, permet d'étoffer progressivement les capacités de la 5G utiles à l'industrie. La *release* 15 a défini dès 2017 les premières spécifications de la 5G. Les fonctionnalités et capacités de la 5G les plus prometteuses pour l'industrie (internet des objets, faible latence, etc.) ont été progressivement délivrées sous forme de mises à jour avec les *releases* 16, 17 et 18<sup>8</sup>.

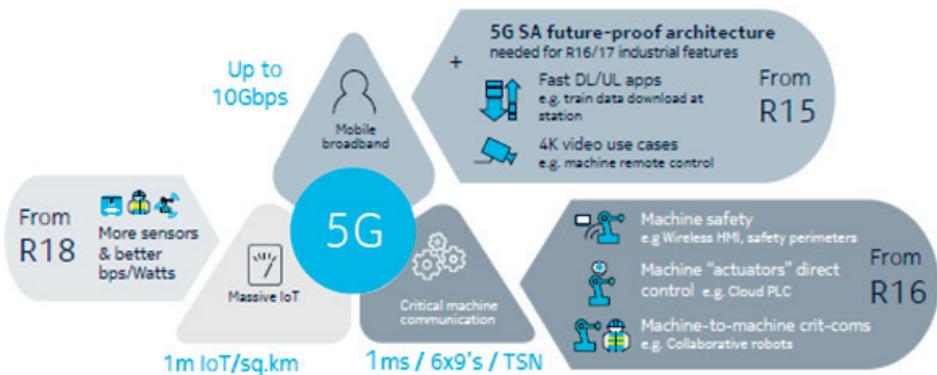


Figure 2 : Apports des différentes *releases* du 3GPP pour les usages industriels de la 5G (Source : Nokia).

Par ailleurs, le marché de la connectivité industrielle est préexistant à la 5G. Il est basé sur un ensemble de réseaux hétérogènes. Les réseaux *wifi* portent les usages liés à la donnée, les réseaux DECT portent les usages liés à la voix, les réseaux LPWAN comme LoRa ou Sigfox portent les usages de l'internet des objets bas débits, les réseaux TETRA

<sup>7</sup> Rapport de l'Académie des Sciences, « Rapport sur la 5G et les réseaux de communications mobiles », 12 juillet 2021, p. 17.

<sup>8</sup> CSF Infrastructures numériques, « 5G : Stratégie et Enjeux. Livre Blanc », septembre 2020, p. 4.

les communications critiques, etc. La modularité des réseaux 5G privés a l'avantage de permettre de combiner plusieurs de ces fonctions et les garanties qu'elles requièrent au sein d'une seule infrastructure.

L'optique professionnelle grandissante des réseaux cellulaires 5G implique donc un changement profond de la manière dont les opérateurs et équipementiers télécoms vont devoir concevoir et commercialiser leurs offres. L'offre de solutions et services autour des réseaux mobiles, historiquement tournée vers le grand public, doit pouvoir maintenant cibler le marché professionnel, aux besoins et modes de fonctionnement très différents.

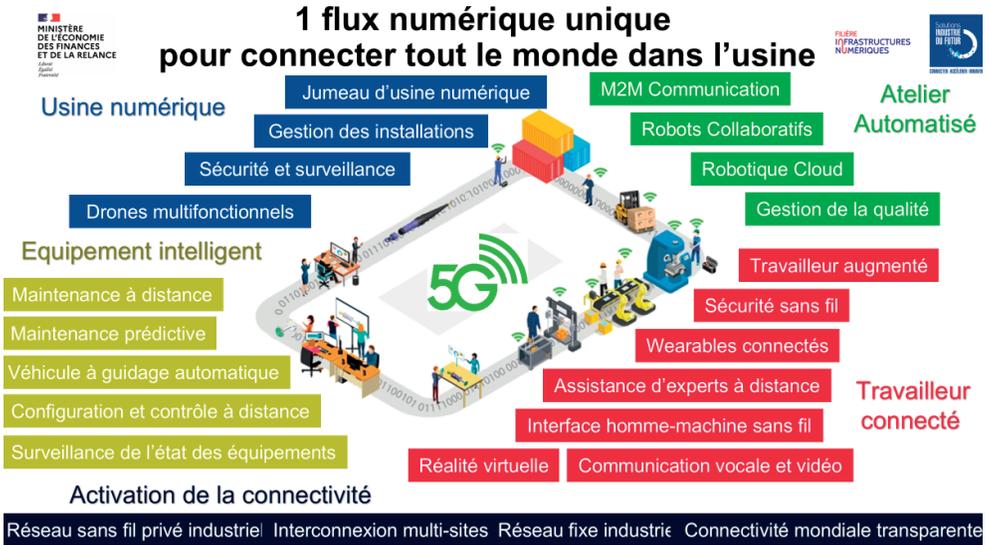


Figure 3 : Architecture globale de l'usine connectée avec la 5G  
(Source : Alcatel Submarine Networks).

Le marché des équipements et des logiciels télécoms connaît avec la 5G un changement de paradigme majeur avec la montée en puissance de la virtualisation des réseaux<sup>9</sup>. Une place décisive est dévolue au logiciel dans l'ensemble de la chaîne de valeur des télécoms. Cette rupture concerne en particulier les technologies d'accès du réseau radio mobile, sans s'y réduire, et devrait amener une reconfiguration du marché à l'avantage des acteurs de l'industrie informatique (IT). Plusieurs technologies à forte valeur ajoutée contribuent également à cette transformation des réseaux comme l'automatisation et l'intégration de l'IA, la « cloudification », l'interopérabilité des réseaux, la gestion de la connectivité hétérogène des objets connectés, la convergence entre les réseaux fixes et mobiles autour de cœurs 5G unifiés, et la cybersécurité de bout en bout.

Cette nouvelle tendance de développement des réseaux du futur ouvre la voie à des infrastructures de réseaux plus ouvertes, virtualisées et « cloudifiées ». Toutefois, elle offre de nouvelles vulnérabilités. La segmentation des niveaux du réseau impose de

<sup>9</sup> Pour plus de détails voir aussi le numéro d'*Enjeux numériques* de septembre 2024 sur le thème « Quelles infrastructures numériques du futur ? », [https://annales.org/enjeux-numeriques/2024/en\\_27\\_09\\_24.html](https://annales.org/enjeux-numeriques/2024/en_27_09_24.html), et notamment GUILLEMIN (2024), *Annales des Mines - Enjeux numériques*, « Les réseaux virtualisés : promesses et enjeux », <https://annales.org/enjeux-numeriques/2024/en-2024-09/EN-2024-09-12-GUILLEMIN.pdf>

nouvelles contraintes de sécurité et une meilleure prise en compte du risque cyber. Par ailleurs, des acteurs américains et asiatiques disposent d'une avance importante sur ce segment de marché du *cloud* et de l'*edge computing*, ce qui présente un risque en termes de maîtrise des infrastructures et d'indépendance technologique. La capacité de ces acteurs à s'insérer sur le marché de la 5G pour les professionnels, y compris l'industrie, est donc réelle et questionne la manière dont les acteurs européens de la 5G, qu'ils soient historiques ou non, s'en saisissent ou vont s'en saisir.

Dans ce contexte de mutation technologique et concurrentielle, la virtualisation des réseaux constitue donc une opportunité pour les acteurs porteurs de nouvelles solutions sur les réseaux du futur. Cela concerne notamment les entreprises innovantes qui seront capables d'accompagner les équipementiers dans l'adaptation à ces nouvelles conditions de marché. La France dispose de compétences techniques de pointe dans le développement logiciel et matériel, notamment sur le développement de cœurs de réseau, d'accès radio et de réseaux de raccordement. Le choix de solutions souveraines ou de dépendances externes est fondamental pour le futur de notre industrie.

## CONCLUSION

Ce tour d'horizon des enjeux et des opportunités liés à la 5G pour l'industrie démontre le caractère stratégique de cette brique technologique. L'industrie française doit profiter de ce nouveau levier de transformation pour accélérer sa marche vers l'industrie 4.0. Même si les déploiements de réseaux privés 5G dans l'industrie française sont moins nombreux que dans d'autres pays, la dynamique expérimentale française existe, elle a besoin d'être largement amplifiée.

# Cybersécurité : comment relever les défis de la sécurisation d'une industrie de plus en plus interconnectée ?

Par Pierre-Yves JOLIVET

Thales

La transformation digitale des processus industriels est une condition nécessaire de la compétitivité de notre système industriel et de la réindustrialisation de la France.

Commencée depuis plus de 10 ans maintenant, elle a fait l'objet quasiment immédiatement d'attaques cyber touchant notamment les industries critiques que ce soit par des attaques d'États voyous ou de groupes mafieux.

La cybersécurité des systèmes informatiques industriels (appelés *Operational Technologies*, OT) présente des défis particuliers par rapport à la protection de systèmes informatiques classiques (IT) notamment :

- hétérogénéité et ancienneté des systèmes ;
- complexité de l'analyse de l'impact sur le système opérationnel final d'une action cyber ;
- incompréhension entre équipes de systèmes d'information et opérationnels ;
- équilibre à trouver entre contraintes de « sûreté » et de cybersécurité ;
- intégration de nouvelles technologies, IA notamment.

Seule une approche partenariale avec des acteurs mondiaux de cybersécurité disposant d'une connaissance spécifique du métier de ces clients permet de garantir la résolution de ces défis.

## LES INFRASTRUCTURES CRITIQUES INDUSTRIELLES, CIBLES DE CHOIX DE LA MENACE CYBER

Énergie, transports, télécommunications, distribution d'eau... mais aussi usines de fabrication de médicaments ou chaînes logistiques d'approvisionnement, les infrastructures critiques industrielles, autrefois en réseau isolé, sont désormais souvent connectées à des réseaux et des systèmes d'information ouverts globaux pour permettre le déploiement de systèmes de *Big Data* ou d'IA. Cette interconnexion les rend donc plus vulnérables aux attaques à distance.

## La multiplication des attaques depuis 10 ans

Les infrastructures critiques sont des cibles privilégiées pour des cybercriminels, des hacktivistes, des acteurs étatiques... Dès 2010, l'attaque Stuxnet contre les installations

nucléaires iraniennes a prouvé que les cyberattaques peuvent causer des dégâts physiques réels aux systèmes industriels. Depuis, les incidents se sont multipliés, illustrant leur vulnérabilité croissante :

- en 2015, l'attaque BlackEnergy, attribuée à des groupes russes, a perturbé les réseaux électriques ukrainiens et plongé une partie du pays dans le noir ;
- en 2019, un *ransomware* a paralysé la production du géant norvégien de l'aluminium Norsk Hydro, provoquant des pertes de plusieurs dizaines de millions de dollars.

Les cybermenaces sont passées de l'espionnage à la provocation de perturbations massives dans le monde réel, avec des conséquences financières et opérationnelles significatives.

## Un contexte géopolitique qui encourage à viser particulièrement les infrastructures critiques

Les cyberattaques sont aussi devenues des outils stratégiques dans les conflits modernes où les adversaires ciblent les infrastructures essentielles de l'ennemi. L'intensification du conflit russo-ukrainien à partir de 2022 a entraîné une vague d'attaques contre les infrastructures énergétiques et de communication par des hacktivistes dans toute l'Europe de l'Ouest – comme analysé dans le rapport de 2023 des équipes d'intelligence de la menace de Thales (Cyber Threat Intelligence – CTI)<sup>1</sup>.

Volt Typhoon, un groupe attribué à la Chine, a massivement infiltré des infrastructures critiques dans le monde, ciblant particulièrement les secteurs de l'énergie et des télécommunications. En 2023, les États-Unis ont révélé que ce groupe avait implanté à grande échelle des portes dérobées dans les réseaux IT d'entreprises américaines. Objectif : préparer le terrain pour des actions futures en cas de conflit ouvert.

## Renforcer la résilience des infrastructures

Plusieurs rapports de l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI) soulignent la vulnérabilité des systèmes de contrôle industriel (ICS) et recommandent<sup>2</sup> l'adoption de mesures de sécurité robustes, adaptées aux spécificités des infrastructures critiques et tenant compte de leur interdépendance avec d'autres réseaux.

L'attaque contre Colonial Pipeline en 2021 illustre l'importance de cette résilience et la complexité d'analyse de l'impact d'une attaque cyber sur un système industriel. L'attaque a affecté environ 45 % de l'approvisionnement en carburant de la côte Est des États-Unis, transportant environ 2,5 millions de barils de carburant par jour. Cette attaque par *ransomware* a été facilitée par un compte VPN abandonné et inactif, associé à de mauvaises pratiques en matière de mots de passe de la part d'un employé. Ce qui est intéressant c'est que l'intention du groupe criminel DarkSide n'était pas de mener une attaque destructrice, mais de déployer un *ransomware* dans le but de voler des données et d'extorquer de l'argent.

---

<sup>1</sup> Cyber Threat Intelligence | Thales Group, <https://myfeed.thalesgroup.com/cyber-conflict-ukraine-extensive-report>

<sup>2</sup> [https://cyber.gouv.fr/sites/default/files/2021/09/anssi-guide-recommandations\\_architectures\\_systemes\\_information\\_sensibles\\_ou\\_diffusion\\_restreinte-v1.2.pdf](https://cyber.gouv.fr/sites/default/files/2021/09/anssi-guide-recommandations_architectures_systemes_information_sensibles_ou_diffusion_restreinte-v1.2.pdf)

## CONVERGENCE IT-OT : UN ATOUT POUR L'INDUSTRIE 4.0 QUI N'EST PAS SANS RISQUES

La cybersécurité IT protège les systèmes informatiques traditionnels comme les serveurs et les réseaux, où la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité des données sont les priorités. Les mises à jour y sont régulières et les protocoles standardisés.

À l'inverse, la cybersécurité OT concerne les environnements industriels où la continuité des opérations physiques est primordiale. Ces systèmes, souvent vieillissants, sont moins fréquemment mis à jour et reposent sur des protocoles propriétaires, ce qui complique leur sécurisation. De plus, la croyance erronée que les systèmes industriels sont isolés a amené à sous-estimer les vulnérabilités croissantes, ces systèmes étant souvent connectés à des réseaux de gestion ou à Internet.

Les défis de la cybersécurité IT incluent des systèmes en constante évolution, nécessitant des solutions de sécurité modernes. Pour les systèmes OT, la principale difficulté réside dans leur rigidité et leur difficulté à intégrer les solutions de sécurité IT traditionnelles.

### Besoin d'une approche spécifique pour la cybersécurité de l'OT

La convergence des systèmes IT et OT est devenue inévitable avec la numérisation croissante des processus industriels et l'émergence de l'Industrie 4.0. L'intégration des données en temps réel grâce à l'IoT permet aux entreprises d'optimiser leurs opérations. Des exemples, comme la collecte de données sur les avions pour la maintenance prédictive, illustrent les gains en productivité et efficacité. Cependant, cette convergence accroît aussi la surface d'attaque, rendant les systèmes plus vulnérables aux cybermenaces – chaque nouvel objet connecté est une nouvelle faille potentielle.

Cela d'autant plus que chaque secteur industriel utilise des systèmes propriétaires (SCADA notamment mais aussi des protocoles de communication) différents les uns des autres mais souvent commun au niveau mondial du fait du nombre restreint de fournisseurs de machines industrielles. Il est donc important de s'appuyer sur des fournisseurs de cybersécurité à la fois spécialiste du secteur et ayant une couverture mondiale pour bénéficier de leur CTI mondiale.

Au-delà de cet aspect technique, la spécificité de la cybersécurité des systèmes industriels s'apprécie aussi dans des actions opérationnelles comme les processus de mise à jour et maintenance. Les mises à jour et la maintenance des systèmes OT sont compliquées en raison des contraintes opérationnelles et des coûts élevés de remplacement. Les périodes d'arrêt nécessaires à ces mises à jour sont souvent impossibles dans des environnements critiques, ce qui complique la correction des vulnérabilités et l'installation de correctifs de sécurité.

Le manque de visibilité et de conformité dans les environnements OT (source de *logs*), ce qui rend difficile la détection et la défense contre les cyberattaques. On ne peut pas protéger ce qu'on ne voit pas.

Les incidents comme l'attaque par *ransomware* sur Colonial Pipeline en 2021 ou la mise à jour défectueuse de CrowdStrike en 2024 démontrent amplement les risques liés à une convergence mal gérée. Pour atténuer ces risques, il faut planifier la cybersécurité dès la conception des systèmes, mettre en place une supervision commune IT/OT et former les équipes à travers des simulations réalistes. Il faut également adopter une approche basée sur les risques et l'utilisation de jumeaux numériques pour tester les systèmes dans des environnements réalistes.

## **Vision globale, collaboration accrue et vigilance renforcée : ne pas oublier l'aspect humain**

Le Responsable de la sécurité des systèmes d'information (RSSI) doit avoir une vue d'ensemble, couvrant à la fois les environnements IT et OT, ainsi que la cybersécurité des produits développés par l'entreprise. Cela demande une approche holistique, une collaboration accrue entre les équipes et une vigilance continue face aux menaces émergentes.

Ce qui peut être difficile en raison de barrières organisationnelles, les différences de priorité, et les disparités culturelles.

La mise en place d'un programme d'entraînement et d'expérimentation dédié à la cybersécurité des systèmes industriels pour apprendre aux équipes SI et opérationnels à se confronter ensemble à une crise cyber. Dans ce but, Thales a investi au Royaume-Uni dans un centre opérationnel dédié à ce sujet rassemblant dans un environnement industriel réaliste avec de vrais équipements mis à disposition par nos partenaires<sup>3</sup>.

La convergence IT-OT est essentielle pour rester compétitif, mais elle doit être soigneusement gérée pour éviter des failles de sécurité aux conséquences potentiellement catastrophiques.

## **S'ADAPTER POUR FAIRE FACE À LA MENACE : L'EXEMPLE DU SECTEUR AÉRIEN**

La cybersécurité est un enjeu crucial pour l'avenir de l'aviation. Ce secteur hautement technologique et interconnecté est devenu une cible privilégiée pour les cyberattaques. De l'aéroport au cockpit en passant par les systèmes de gestion des compagnies aériennes, la gestion du trafic aérien, chaque maillon de la chaîne est exposé à des risques croissants.

Les conséquences d'une cyberattaque peuvent être désastreuses : perturbation des opérations aériennes, vol de données sensibles, atteinte à la réputation et, dans le pire des cas, mise en danger de la sécurité des passagers et des équipages...

En juillet 2024, une simple mise à jour défectueuse d'un logiciel critique a provoqué l'annulation de plus de 10 000 vols en 3 jours et affecté près de 1,4 million de passagers. Des compagnies rapportent un coût de l'ordre de 500 millions de dollars.

Ceci illustre le défi spécifique à l'OT entre la cybersécurité qui demande des mises à jour extrêmement fréquentes et sûreté des systèmes qui suppose normalement une procédure de qualification formelle avant toute mise à jour.

## **Innovation, vigilance et adaptation**

Pour contrer ces menaces, l'industrie aéronautique et les autorités de régulation comme l'Organisation de l'aviation civile internationale (ICAO), l'Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne (EASA) ou la Federal Aviation Administration (FAA) américaine ont mis en place un cadre réglementaire strict et des normes de sécurité rigoureuses.

Des solutions innovantes comme FlytLINK Aviocast et FlytX illustrent cette démarche. FlytLINK Aviocast permet d'échanger des données en toute sécurité entre le cockpit et le sol, tandis que FlytX offre une suite avionique complète et sécurisée. Thales a également établi des unités dédiées pour répondre aux incidents de sécurité de ses clients et propose

---

<sup>3</sup> Thales in Wales | Thales Group, <https://www.thalesgroup.com/en/countries/europe/united-kingdom/about-thales-uk/regional-presence/thales-wales>

des services de surveillance de la cybersanté de leurs systèmes. Ces solutions contribuent à renforcer la sécurité et la résilience des systèmes aériens face aux cyberattaques mais la vigilance et l'adaptation restent de mise pour garantir la sécurité des opérations aériennes dans un environnement numérique en constante évolution.

## **NIS2 : UNE EXTENSION DU CADRE RÉGLEMENTAIRE POUR RENFORCER LA CYBERSÉCURITÉ EUROPÉENNE DES INFRASTRUCTURES CRITIQUES**

La directive NIS2, adoptée en décembre 2022, s'appuie sur les acquis de la directive NIS1 et marque un changement de paradigme à la fois à l'échelon national et européen. Dans un contexte d'intensification des cybermenaces et touchant de plus en plus d'entités, la directive NIS2<sup>4</sup> a pour objectif de renforcer la sécurité des réseaux et des systèmes d'information dans l'Union européenne.

En effet, NIS2 élargit le champ d'application de la directive NIS1 et ne se limite plus aux seuls opérateurs d'infrastructures essentielles. Elle s'étend désormais aux entités publiques ou privées qui fournissent des services numériques et qui exercent leurs activités au sein de l'Union européenne. Cette extension de périmètre est sans précédent en matière de réglementation cyber.

### **Nouvelles obligations et coopération accrue**

La directive prévoit également l'obligation de sécuriser la chaîne d'approvisionnement des entités concernées, y compris les aspects liés à la sécurité concernant les relations entre chaque entité et ses fournisseurs/sous-traitants.

Elle amène également les États membres à renforcer leur coopération en matière de gestion de crise cyber. Les entités concernées doivent mettre en œuvre des mesures de sécurité plus strictes, de la gestion de vulnérabilités, de réponse aux incidents, et une notification des incidents de sécurité généralement dans un délai de 24 heures suivant leur détection.

Par ailleurs, les sanctions en cas de non-respect sont renforcées prévoyant notamment pour les États membres une possibilité d'engager la responsabilité personnelle des dirigeants des entités concernées ainsi qu'une interdiction d'exercice de leurs fonctions.

NIS2 doit encore être transposée par chaque État membre de l'Union européenne, et ce, avant fin octobre 2024. Même si les contours de la transposition de NIS2 en droit français ne sont pas encore connus à ce jour, les experts de Thales Cyber Digital Solutions (CDS) accompagnent d'ores et déjà les entités impactées afin de répondre aux exigences de NIS2 et d'assurer ainsi une sécurité maximale face à des acteurs malveillants, toujours plus performants et outillés.

---

<sup>4</sup> Directive on measures for a high common level of cybersecurity across the Union (NIS2 Directive) | Shaping Europe's digital future (europa.eu), <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/nis2-directive>

## **INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET ORDINATEUR QUANTIQUE : LES FRONTIÈRES DE LA CYBERSÉCURITÉ POUR LES OPÉRATIONS INDUSTRIELLES**

Une part significative des gains opérationnelles dans l'Industrie 4.0 vient du déploiement de technologies d'IA et de Big Data pour optimiser la maintenance, automatiser des tâches administratives répétitives ou améliorer la performance des systèmes d'information existants.

La facilité de déploiement de modèles d'IA induit par ailleurs un renouveau du phénomène de « SI gris » avec le déploiement de modèles non contrôlés par les SI.

Les modèles d'IA emportent de nouveaux risques en termes de cybersécurité et de propriété Industrielle. En novembre 2023, les équipes de recherche de Thales ont par exemple réussi à retrouver les données brutes à partir de la simple observation d'un modèle surentraîné.

### **Sécuriser l'IA : une affaire de spécialistes**

Si l'IA permet d'améliorer la performance des processus de cyberdéfense, son usage croissant pose aussi de nouvelles questions de sécurité :

- dans sa phase d'apprentissage, l'IA est très consommatrice de données qu'il est capital de sécuriser ;
- dans sa phase de déploiement, les modèles ainsi entraînés doivent aussi être protégés afin de ne pas être altérés.

L'IA présente aussi de nouvelles familles de vulnérabilités. Par exemple, il est parfois possible d'extraire de l'information sur les données d'entraînement en n'ayant à disposition que le modèle final. On peut aussi tromper des IA de reconnaissance de formes pour échapper à la détection ou faire inférer des situations fausses.

Il est donc essentiel d'avoir des spécialistes de ces nouveaux types d'attaque afin de protéger correctement les applications sensibles (données personnelles, sécurisation de sites sensibles, conduite de véhicules...). En Europe, cet aspect a d'ailleurs été intégré dans l'AI Act<sup>5</sup> et poussera les organisations à sécuriser leur IA. L'ambition de Thales est de les accompagner dans cette démarche.

### **La révolution de la cryptographie post-quantique**

De son côté, la physique quantique n'a pas seulement révolutionné la physique théorique mais a aussi ouvert la voie à des innovations telles que les lasers ou les semi-conducteurs.

Le développement d'ordinateurs quantiques pourrait transformer notre façon de représenter et traiter l'information. Ces machines, exploitant les principes de superposition d'états et d'intrication, promettent des capacités de calcul largement supérieures aux ordinateurs classiques. Cela pourrait rendre vulnérables tous les algorithmes de chiffrement actuels.

---

<sup>5</sup> EU AI Act: first regulation on artificial intelligence | Topics | European Parliament (europa.eu), <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20230601STO93804/eu-ai-act-first-regulation-on-artificial-intelligence>

La communauté cryptographique a développé de nouvelles briques mathématiques pour échapper à cette menace, ce qui a amené à la standardisation d'algorithmes dits post-quantiques résistant à cette future nouvelle menace.

Les experts de Thales ont été à l'origine d'un des quatre algorithmes sélectionnés par le National Institute of Standards and Technology pour devenir les futurs standards de chiffrement résistants aux ordinateurs quantiques (algorithme FALCON)<sup>6</sup>.

Si la menace quantique peut sembler lointaine, nos clients les plus matures lancent dès à présent des réflexions sur l'architecture de chiffrement et l'intégration progressive des nouveaux produits intégrant de la cryptographie post-quantique.

## **LA CYBERSÉCURITÉ DES SYSTÈMES INDUSTRIELS – UNE COORDINATION DE SPÉCIALISTES DE DIFFÉRENTS MÉTIERES SOUS LA SUPERVISION DU RSSI**

La transformation digitale des systèmes industriels ouvre des éléments de risques cyber qui sont exploités par les acteurs malveillants. Les exemples récents de Colonial Pipeline et CrowdStrike montrent l'importance de la prise en compte de la spécificité de la cyber sécurisation des systèmes industriels.

Mais ces exemples montrent aussi la nécessité d'une approche intégrée entre IT/OT et une extension du rôle des Responsables de la sécurité des systèmes d'informations à l'ensemble des systèmes IT et OT.

Il est enfin nécessaire dans ce domaine de s'appuyer sur des partenaires qui ont à la fois une bonne connaissance des systèmes industriels à protéger, un réseau mondial d'analyse de la menace et la capacité d'investir dans la cyber sécurisation des innovations déployées dans les systèmes industriels comme l'IA.

---

<sup>6</sup> NIST Releases First 3 Finalized Post-Quantum Encryption Standards | NIST, <https://www.nist.gov/news-events/news/2024/08/nist-releases-first-3-finalized-post-quantum-encryption-standards>

# La cybersécurité est un sport collectif - Les normes volontaires, une défense solide

Par Franck LEBEUGLE

Directeur des activités de normalisation (groupe Afnor)

Le numérique est entré dans toutes nos industries et avec lui, son corollaire : la cybersécurité, identifiée par les assureurs mondiaux comme le tout premier risque.

La cybersécurité est « le » sujet collectif par excellence : vous ne pouvez pas être pertinent si vous ne vous tenez pas informé des nouvelles modalités d'attaques, si vous ne travaillez pas en réseau. Si vous ne regardez pas ce qui se passe ailleurs, si vous n'êtes pas au courant de vos obligations de demain ou d'après-demain ; si vous ne vous confrontez pas à vos pairs, dans un partage constant de bonnes pratiques et de défis. À ce titre, les comités de normalisation sont de vrais laboratoires d'expérimentation et d'échange.

Nous avons choisi de consacrer la moitié de ce dossier au risque cyber, avant d'aborder quatre sujets connexes :

- les normes, alliées des industriels au quotidien ;
- les “Smart Standards”, notre « futur proche » ;
- le passeport numérique des produits européens : chantier en cours ;
- industrie 5.0 : les opérateurs augmentés.

En septembre dernier, les explosions de bipeurs et de *talkies-walkies* au Liban ont peut-être ouvert une nouvelle ère. L'épisode pourrait bien donner naissance à un monde dans lequel chaque produit importé – y compris nos précieux *smartphones* – deviendrait potentiellement suspect.

D'un seul coup, la cybersécurité est devenue un sujet beaucoup plus concret. Elle est descendue à l'échelle de l'individu, quand jusqu'alors elle préoccupait surtout les entreprises et les collectivités.

À raison ! Car si le numérique a modifié en profondeur absolument tous les pans de nos industries (des processus internes aux ventes, du recrutement à la maintenance, du *marketing* aux achats...), il a bien sûr sa face « B » : le risque d'attaques cyber.

## UN RISQUE AVÉRÉ

Leur nombre est déconcertant et continue d'augmenter, dans un mouvement qui ne semble pas avoir de raison de s'arrêter. Lorsqu'on demande aux CEO français quelle est leur principale menace, ce sont les risques liés à la cybersécurité qui sont cités en premier, à 40 %, loin devant l'inflation et la volatilité macro-économique (source : Allianz).

France Assureurs, qui réunit 99 % des assureurs français, identifie également le risque cyber comme le premier risque en 2024 – c'était déjà le cas en 2023. Même chose au niveau mondial (baromètres AON et Allianz). À noter par ailleurs que le WEF place les risques de mésinformation et cyber respectivement à la première et à la quatrième place sur 34 dans son rapport annuel 2024<sup>1</sup>.

On pourrait ainsi égrener des chiffres pendant un moment (+ 30 % de rançongiciels en France en 2023 de plus qu'en 2022 selon l'ANSSI, + 18 % aux États-Unis selon le FBI...), mais ce n'est pas utile car tous les industriels le savent déjà : le risque est réel. Une entreprise sur deux a connu une attaque significative l'année dernière (baromètre du CESIN).

Alors, parlons plutôt d'actions et de nos possibilités de défense. J'ai la chance de diriger la normalisation volontaire en France : les textes que nous produisons, ou plutôt que produisent les industriels réunis dans nos murs, permettent de constituer la meilleure équipe du monde. Je ne suis pas le seul à le dire. Selon le CESIN toujours, qui rassemble les directeurs Cybersécurité et RSSI (responsables sécurité des systèmes d'information) des organisations françaises, « une majorité écrasante d'entreprises intègre régulièrement les normes dans leurs pratiques quotidiennes. 88% estiment que les normes sont une composante essentielle du paysage cyber, et recherchent activement des certifications pour l'interne, comme pour leurs partenaires ».

Les normes volontaires permettent aux industriels de bénéficier des meilleures pratiques du marché et de respecter la réglementation. Elles fournissent le « comment », là où le réglementaire prescrit le « quoi ».

## NIS-2 ET CRA : LE RÉGLEMENTAIRE FAIT SA PART DU JOB

En matière de cybersécurité, la réglementation est solide. Cette fin d'année 2024 a été marquée à la fois par la directive européenne NIS-2 entrée en vigueur en octobre. Six ans plus tôt, la directive NIS avait désigné 300 entreprises comme « opérateurs d'importance vitale » dont la protection se devait d'être quasi-irréprochable pour ne pas risquer de déstabiliser le pays. NIS-2 intègre désormais 18 secteurs d'activité et touche 15 000 entreprises (opérateurs de services essentiels), dont des collectivités locales françaises. Son objectif est de responsabiliser les acteurs et de les pousser à moderniser leur défense. Désormais, la responsabilité personnelle des dirigeants pourrait être engagée en cas de non-conformité à cette directive.

Un autre texte majeur est le CRA, adopté récemment : “Cyber Résilience Act”. Comme le “Digital Services Act”, l’“AI Act” ou encore le “Digital Market Act”, ce texte européen vient défendre la souveraineté européenne sur des sujets numériques qui concernent le monde entier et façonnent largement la compétitivité de nos pays.

Le “Cyber Resilience Act” concerne l'ensemble des entreprises, avec des obligations portant sur la sécurité des ordinateurs (*hardware*), sur celle des données, sur la manière de réagir quand on est victime d'une attaque (plan de continuité), sur les composants... Chacun de ces grands textes (*Acts*) s'appuie sur des normes harmonisées, qui visent une plus grande cohérence des initiatives portées au niveau européen. Nous avons par exemple répondu à un appel à standardisation (*standardisation request*) européen pour développer les normes autour de la RED : Radio Equipment Directive. En 2021, après avoir été nous-mêmes, chez Afnor, victimes d'une cyberattaque, nous avons pris les devants en publiant une Afnor Spec (un « pas à pas » rédigé par un nombre plus réduit d'acteurs) expliquant

---

<sup>1</sup> [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_The\\_Global\\_Risks\\_Report\\_2024.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2024.pdf), p. 11.

comment reconstruire un système d'information et assurer la continuité d'activité en cas de cyber-attaque paralysante.

## **AVEC LES NORMES HARMONISÉES, VOUS ÊTES PRÉSUMÉ CONFORME**

Mais au fait, c'est quoi une norme harmonisée ? Ces normes ont un statut particulier, à mi-chemin entre normes volontaires et normes réglementaires. Dans l'Union européenne, la conformité d'un produit aux normes harmonisées constitue une présomption de conformité à la loi (celle-ci prenant la forme de directives et règlements) et devient alors un vrai avantage concurrentiel de marché. C'est dire leur pouvoir !

Nous préparons ainsi, pour avril 2025, les normes harmonisées qui permettront à l'“AI Act” de devenir opérationnel. Parmi elles, “l'AI trustworthiness framework”. Ce document fournira un cadre pour la fiabilité des systèmes d'IA : une terminologie, des concepts, des exigences horizontales de haut niveau, des conseils et une méthode pour contextualiser ces exigences en fonction des parties prenantes, des domaines ou des applications spécifiques.

Ou encore “l'AI risk management”, qui fournira des exigences claires et réalisables sur la manière dont les risques peuvent être traités et atténués tout au long du cycle de vie du système d'IA.

La norme baptisée “Quality management system for EU AI Act regulatory purposes” spécifiera les exigences et fournira des orientations pour un système de gestion de la qualité pour les organisations qui fournissent des systèmes d'intelligence artificielle. Et le “Conformity assessment framework” (cadre pour l'évaluation de la conformité) s'attache aux procédures et aux processus pour les activités d'évaluation de la conformité liées aux systèmes d'IA.

## **NORMALISER, C'EST JOUER EN ÉQUIPE**

Je tiens à rappeler combien la normalisation intègre le principe de pertinence : vous ne pouvez pas être pertinent si vous ne regardez pas ce qui se passe ailleurs, si vous n'êtes pas au courant de vos obligations de demain ou d'après-demain et si vous ne vous confrontez pas à vos pairs, dans un partage constant de bonnes pratiques et de défis.

Notre vice-président de comité technique à l'ETSI (le TC Cyber de l'European Telecommunications Standards Institute), Jean-Pierre Quémard, rappelle régulièrement combien il est important d'échanger entre pairs, en particulier dans ce domaine très spécifique de la cybersécurité, où il est vital de se tenir informé des nouvelles modalités d'attaques et où par nature on travaille en réseau. Les comités de normalisation sont de vrais laboratoires d'expérimentation et d'échanges de bonnes pratiques.

« L'existence de normes (standards, en anglais) garantit l'interopérabilité : elle est indispensable par exemple dans les télécoms ! ; souligne Jean-Pierre Quémard. À l'heure du tout-numérique, les enjeux Cyber sont partout, comme le sel dans la mer. Il n'est plus possible de travailler seul dans son coin. Nous avons besoin de construire ensemble des outils fiables et des standards certifiables. La certification, qui est indispensable, crée la confiance. »

Parmi les normes Cyber les plus utilisées, il faut citer les ISO 27000 (Management de la sécurité de l'information) et 27001 (Sécurité des systèmes d'information), mais aussi les ISO 18045 et 15408 qui définissent les critères communs de certification des produits solutions et services.

« Le Cyber Resilience Act développera les schémas de certification de produits : pour les *Cloud providers*, pour la 5G, pour tout ce qui est Internet des Objets (IoT)... reprend Jean-Pierre Quémard. Il définira 44 standards en ce domaine, c'est donc un travail colossal qui débute pour produire ces 44 futures normes harmonisées. ».

Ce travail nous évitera – notamment – de voir arriver des propositions russes ou chinoises d'algorithmes de chiffrement avec des particularités peu recommandables, comme c'est déjà arrivé plusieurs fois. « Évitions de nous retrouver avec des produits qui ont des *backdoors* (portes dérobées) », résume Jean-Pierre Quémard.

Dernier point, enfin, sur un marché qui évolue à toute vitesse comme celui de la Cyber, il est important de rappeler que les normes volontaires sont révisées au minimum tous les cinq ans, pour coller aux pratiques du marché et aux évolutions technologiques. Il est donc toujours temps d'embarquer à nos côtés !

### **Encadré 1 : Les normes, alliées des industriels au quotidien**

Des chaînes de production aux fonctions support, les normes volontaires soutiennent au quotidien le travail des opérateurs industriels français.

Qu'est-ce qui distingue la norme de la réglementation ? À peu près tout, même si on les confond souvent. Les normes volontaires sont le fruit d'un travail collectif des acteurs du marché et ne sont pas obligatoires (seules 1 % le sont), contrairement à la réglementation, élaborée par les pouvoirs publics. Elles peuvent en revanche soutenir la loi, en donnant aux entreprises les moyens d'atteindre un objectif. On les reconnaît à leur petit signe : ISO, NF EN ISO lorsque la norme est adoptée en France et en Europe.

Dans l'industrie, les normes sont un allié de premier plan, avec des textes sans cesse remis au goût du jour. Par exemple, en réponse à la loi française fixant l'obligation de calculer les émissions de gaz à effet de serre dans toutes les chaînes de transport, la norme NF EN ISO 14083 fournit une méthodologie pour un calcul harmonisé entre tous les acteurs.

Le chiffre : 21 000 professionnels français sont engagés en normalisation, avec plus de 500 nouveaux projets chaque année. On compte 20 % de taux de croissance supplémentaire du chiffre d'affaires pour les entreprises qui élaborent et utilisent les normes volontaires (source : étude Afnor-BIPE).

### **Encadré 2 : Les “Smart Standards”, notre « futur proche »**

Les “Smart Standards”, ce sont les normes dans leur version digitale.

De quoi s'agit-il ? Les normes volontaires (*standards* en anglais) sont rédigées par et pour le marché. Jusqu'à présent, elles étaient disponibles au format papier, PDF ou XML et adressées à des experts... humains. Elles s'appêtent à passer au format “Machine to Machine” : elles pourront être connectées aux SI des Industriels et lues par des machines.

Qui est concerné ? Tous les utilisateurs des normes - toutes tailles et tous secteurs d'activité confondus. Mais nous invitons particulièrement les PME et ETI à s'y pencher dès maintenant pour ne pas prendre de retard.

Pourquoi c'est important ? Les bénéfices sont nombreux : pas d'erreurs de saisie, plus besoin de veille, des échanges plus fluides entre industriels... Les "Smart Standards" permettront en effet aux entreprises de mieux communiquer entre elles. C'est un impératif pour accéder à l'industrie de demain et pour développer ses marchés.

Tous les pays industrialisés y travaillent déjà. États-Unis, Chine, Allemagne, Japon, Arabie Saoudite... la France, bien sûr, sans oublier les Pays-Bas ou encore la Norvège, grâce à sa puissante industrie pétrolière.

Dans ces conditions, comment envisager de rester sur le bas-côté ? Les "Smart Standards" sont une clé d'entrée pour l'industrie du futur : ne pas les intégrer, c'est marginaliser très vite ses activités industrielles. Il s'agit enfin d'un outil puissant pour réduire l'inflation législative et réglementaire et pour faciliter le travail au quotidien de tous les utilisateurs des normes volontaires.

### **Encadré 3 : Le passeport numérique des produits européens : chantier en cours**

Avec le (futur) passeport numérique des produits, l'objectif est de pouvoir tracer la vie d'un produit de A à Z, grâce à des centres de données fédérant toutes les informations utiles, de la conception, la fabrication du produit jusqu'à son recyclage ou son réemploi.

C'est un enjeu majeur pour la Commission européenne, qui a formulé à l'été 2024 une demande de normes harmonisées, à produire très vite : avant décembre 2025 !

L'American National Standards Institute (ANSI) suit de près ces travaux. « Par la mise en place des DPP (*Digital Product Passport*), la Commission européenne cherche à accroître la transparence et à favoriser la circularité, rappelle l'ANSI. Le DPP peut prendre la forme d'un code QR, d'une étiquette RFID ou d'une autre technologie pouvant être scannée. »

Dans le numéro de juin 2024 de la revue *Enjeux*, éditée par Afnor, on pouvait lire que la Commission européenne a proposé que le DPP soit étudié par le Conseil du commerce et des technologies (CCT) Europe-États-Unis, pour ce qui concerne les aspects relatifs aux normes et à l'évaluation de la conformité et les aspects liés à l'accès au marché. Le débat a permis d'identifier des domaines d'intérêt et de potentielles inquiétudes associées au DPP. La normalisation européenne à visée internationale semble poser problème : « Une définition trop étroite pourrait exclure les normes développées par les organisations de normalisation non basées dans l'Union, indique l'ANSI. Afin d'accélérer le processus et d'atteindre le niveau de qualité le plus élevé en écoconception, il conviendrait d'envisager une vision plus large et plus flexible des normes internationales dans le cadre de l'établissement des réglementations techniques. ». La potentielle nécessité de divulguer des informations confidentielles dans le cadre du DPP est aussi source de débats : propagation de données sensibles, potentielles exigences pour les tiers détenteurs de données. « Qui détiendrait ces données et comment celles-ci seraient-elles compartimentées ? L'exactitude des données sera-t-elle vérifiée et si oui, par qui ? », se demande l'ANSI. »

**Encadré 4 : Industrie 5.0 : les opérateurs augmentés**

L'industrie du futur se construit à coups de terminaisons chiffrées : après l'industrie 4.0, c'est la version 5.0 qui commence à faire parler d'elle. Le terme 4.0 imaginé par les Allemands faisait référence à la quatrième révolution industrielle : après la machine à vapeur (1.0), le travail à la chaîne (2.0), la robotique et les automatismes industriels (3.0).

L'industrie 4.0, c'est la connexion des machines entre elles. La cinquième vague sera manifestement celle des salariés : l'industrie 5.0 s'efforce de mieux combiner le travail des machines et celui des humains.

Casques de formation en réalité virtuelle, capteurs de chute, cohabitation avec les robots... Bienvenue dans l'industrie 5.0 ! Qui aura elle aussi besoin de construire ses standards.

# La stratégie française en matière de numérique et son impact sur l'industrie

Par Loïc DUFLOT

Direction générale des Entreprises (DGE)

La France promeut une vision du numérique respectueuse de ses valeurs, axée sur l'accessibilité à tous. Considérant que le numérique est à la fois un secteur en forte croissance et un vecteur de compétitivité pour l'économie, la direction générale des Entreprises (DGE) concentre son action selon trois axes : démocratiser l'accès au numérique, innover avec des technologies comme l'IA, et protéger les données sensibles. Il s'agit ainsi de soutenir le développement d'infrastructures numériques tout en réduisant leur empreinte environnementale et en œuvrant à la souveraineté numérique.

La France se singularise par une vision du numérique respectueuse de ses valeurs et axée sur les usages et l'accessibilité au plus grand nombre, entreprises comme citoyens.

Le numérique tient une place singulière dans notre économie, il en constitue d'une part un secteur – en forte croissance – en tant que tel et d'autre part un vecteur essentiel à la compétitivité des autres secteurs et à leur transformation environnementale. Le succès de la diffusion des usages les plus pertinents de l'IA générative vers l'ensemble des secteurs économiques est un facteur clé de la compétitivité de l'économie française dans les années à venir, de même que la mise en place de réseaux numériques performants ou encore le développement d'infrastructures de traitement et de stockage de données souveraines permettant la protection des données les plus sensibles.

L'action de la direction générale des Entreprises (DGE), et plus généralement de l'État, en matière de développement du numérique s'articule donc selon trois axes principaux.

## TROIS AXES PRINCIPAUX

### Démocratiser

« La difficulté de réussir ne fait qu'ajouter à la nécessité d'entreprendre » constatait déjà Beaumarchais qui pourtant ne s'était pas essayé à mettre en œuvre le plan France Très Haut Débit. L'accès du plus grand nombre au numérique est fondamental pour la vie économique, sociale et citoyenne du pays. L'État a donc mis en place une politique ambitieuse de soutien à l'accès au numérique *via* le déploiement des réseaux de communication électroniques fixes et mobiles (soutenus notamment à travers le Plan France Très Haut Débit ou encore le *New Deal Mobile*) mais aussi par des actions spécifiques pour sensibiliser et former les citoyens (inclusion numérique) et les entreprises (par exemple l'initiative France Num) au numérique. La tâche est d'ampleur car le dernier kilomètre des politiques publiques est bien souvent le plus complexe à mettre en œuvre. C'est particulièrement vrai en matière d'aménagement numérique du territoire, du fait des spécificités du territoire national (zones de montagne, enclavées, etc.). Mais la politique conduite dans le domaine porte progressivement ses fruits : 87 % des locaux sont désor-

mais couverts en fibre optique et le nombre d'abonnements fibre dépasse désormais le nombre d'abonnements cuivre, dont la fermeture du réseau sera effective à horizon 2030. Grâce, notamment, au dispositif de couverture ciblée issu du *New Deal Mobile*, la part du territoire en zone blanche est passé en 5 années de 11 à 1,7 %.

Toutefois, si la numérisation des entreprises progresse, elle reste encore insuffisante. Cela justifie la poursuite des efforts de sensibilisation notamment avec l'initiative France Num, qui s'adresse principalement aux dirigeants de TPE éloignées du numérique pour les sensibiliser à ce que peut leur apporter la numérisation et, une fois qu'elles en sont convaincues, les accompagner dans leur transformation. Outre la finalisation du plan France Très Haut Débit et la généralisation de la fibre sur l'ensemble du territoire, l'un des grands défis de ces prochaines années sera de faire en sorte que les migrations technologiques rendues nécessaires par l'obsolescence de technologies (fermeture du cuivre annoncée par Orange, fermeture de la 2G/3G pour les réseaux mobiles, etc.) se fasse dans les meilleures conditions pour l'ensemble des utilisateurs, y compris ceux d'entre eux qui seraient les plus éloignés du numérique.

## Innover

« Où se dirige-t-on ? Avec un peu de chance, vers l'avant. ». Cette citation empruntée au film d'animation *Ratatouille*, nous rappelle que l'innovation est loin d'être une science exacte. Nous sommes dans une compétition mondiale et des innovations numériques voient le jour en permanence. L'intelligence artificielle, en particulier, porte des promesses d'innovation de rupture, avec des gains de productivité significatifs, et il est primordial pour la France d'accompagner l'émergence des technologies et des usages de l'intelligence artificielle dans l'ensemble des secteurs. Toutefois, la mise en œuvre de certaines innovations pourrait s'avérer moins pertinente qu'attendue, en raison de l'importance de leurs coûts financiers, technologiques et environnementaux rapportés aux bénéfices escomptés. Aussi, certaines innovations seront particulièrement adaptées à certains cas d'usage mais beaucoup moins à d'autres. C'est typiquement le cas de l'intelligence artificielle générative particulièrement adaptée à la recherche d'une aiguille dans une botte de foin mais moins performante, à l'heure actuelle, sur des travaux d'expertise fine et spécifique. Certaines de ces innovations, enfin, posent des questions éthiques et doivent de fait être encadrées pour en maîtriser les risques. À ce titre, le règlement intelligence artificielle adopté début 2024 par l'Union européenne prévoit par exemple l'interdiction de l'usage de l'IA à des fins de *scoring social*.

En définitive, le soutien à l'innovation doit reposer sur une connaissance fine des marchés et des usages, de la compétition internationale dans le cadre d'une politique industrielle claire et résolue, ce qui constitue l'ADN de la DGE. Elle met en œuvre cette politique au travers des différents outils interministériels et notamment du plan d'investissement France 2030 doté de 54 Mds€, et dont la gestion est confiée au Secrétariat général pour l'Investissement (SGPI), qui constitue l'instrument principal du soutien au développement des technologies et des usages du numérique au côté des dispositifs génériques tels que le Crédit Impôt Recherche (CIR) ou encore l'initiative French Tech dédiée aux *start-ups*. Ce plan d'investissement diffère des programmes d'investissements d'avenir précédents en assumant une posture dirigée visant à soutenir, dans une logique de politique industrielle accrue, les secteurs les plus prometteurs pour le développement de l'emploi et de la valeur en France et les plus à même de faire émerger les champions de demain. Dans le domaine du numérique, le plan France 2030 comprend donc des stratégies d'accélération sur des technologies d'avenir (réseaux de communication du futur, intelligence artificielle, calcul quantique, *cloud computing*, micro-électronique, cybersécurité, univers immersifs, numérique écoresponsable, etc.) mais aussi, et le plus souvent, sur les usages associés dans l'objectif de permettre une diffusion rapide des innovations dans les filières. Ce soutien s'entend tant au travers de subventions dans le cadre de projets de R&D, que de soutien à

la commande publique innovante ou encore d'investissements au travers de fonds publics ou publics/privés. Sur chacun de ces volets, le soutien se focalise sur les failles du marché, en cas de carence avérée de l'initiative privée.

## Protéger

« Un grand pouvoir [de marché] implique de grandes responsabilités ». Que cet adage soit librement emprunté à Winston Churchill ou à Peter Parker, il n'en reste pas moins vrai dans le domaine du numérique. Les grands acteurs du numérique, par leurs actions, façonnent le numérique de demain et ont un impact direct sur de nombreux facteurs clés : maîtrise de l'empreinte environnementale, lutte contre les contenus illégaux ou toxiques, développement de la concurrence, etc. Hélas, il n'est pas rare que ces derniers n'aient pas le réflexe de se responsabiliser tout seul ou en tout état de cause, que cette responsabilisation spontanée ne soit pas à la hauteur des enjeux : d'un acteur hégémonique, on n'attend rien de moins que l'excellence. Lorsque cette responsabilisation spontanée est susceptible d'être trop limitée, le législateur (européen le plus souvent dans le domaine du numérique) est légitime pour intervenir et venir contraindre, dans une logique asymétrique, les grands acteurs. C'est l'objectif notamment des règlements DSA et DMA<sup>1</sup> adoptés en 2022, particulièrement révolutionnaires, et qui visent à mettre en place des règles responsabilisant les grands acteurs sur la gestion de leurs contenus pour le DSA et à prévenir *ex ante* des pratiques anticoncurrentielles pour le DMA en plaçant la Commission européenne en situation de régulateur de ces grands acteurs.

La protection dans l'environnement numérique, c'est également assurer la cybersécurité des citoyens, des entreprises et des administrations, mission dont le pilotage interministériel est porté par l'ANSSI. Pour les mois à venir, l'une des grandes priorités en matière de sécurisation des entreprises sera la mise en œuvre de la directive NIS2 qui vient renforcer les exigences en matière de cybersécurité de nombreuses entreprises, y compris de certaines PME.

## TROIS THÉMATIQUES TRANSVERSES

À ces trois grands axes s'ajoutent trois thématiques transverses qui viennent directement irriguer l'ensemble des actions conduites dans le domaine du numérique et qui, là encore, sont en grande cohérence avec les orientations européennes.

### Les compétences

Le développement et le maintien des compétences en matière de numérique est un facteur clé de succès. Il faut garantir la disponibilité de la bonne personne avec les bonnes compétences au bon endroit et au bon moment. Cela est vrai pour les experts du numérique (*data scientists*, experts de l'IA, etc.) dont ont besoin nos pépites technologiques mais aussi et peut-être surtout pour les entreprises non spécialisées de tout secteur qui doivent pouvoir faire évoluer leurs processus, leurs services et produits, et leurs modèles économiques au rythme des innovations numériques. Cette problématique est intrinsèquement complexe compte-tenu de son caractère protéiforme (nombreux métiers, nombreuses entreprises, importance des questions territoriales, répartition des compétences et des responsabilités complexes au sein des acteurs de la sphère publique). La DGE soutient une approche par secteur au plus proche des besoins des entreprises. La filière des infrastructures numériques s'est ainsi saisie de la question en mettant en place à l'échelle de la filière un EDEC pour les métiers liés à la fibre optique.

---

<sup>1</sup> "Digital Service Act" et "Digital Market Act".

## L'impact environnemental

Si selon les dernières analyses de l'ADEME et de l'Arcep, l'empreinte environnementale du numérique reste aujourd'hui contenue, elle sera amenée à croître dans les années à venir du fait du développement des usages liés au numérique qui soutiennent l'ensemble des transitions majeures de toutes les filières de l'économie. Il est donc particulièrement important que les entreprises du numérique, quels que soient leur taille et leur secteur d'activité aient une approche responsable pour rechercher la réduction de leur empreinte. Parmi ces entreprises et comme évoqué plus haut, les plus grandes d'entre elles sont évidemment celles qui doivent être particulièrement exemplaires.

## La souveraineté

Il ne saurait y avoir de développement du numérique sans une politique résolue en matière de souveraineté numérique. La souveraineté numérique, c'est en définitive comprendre ses dépendances et travailler à réduire celles qui sont inacceptables. Si pour certains usages, il est possible de s'accommoder de solutions peu ou pas suffisamment maîtrisées, ce n'est évidemment pas le cas des systèmes traitant des données particulièrement sensibles. La Commission européenne a ces dernières années eu l'occasion de tenir des messages forts en la matière par exemple pour l'approvisionnement en composants électroniques ou encore les communications électroniques. La France a quant à elle mis en place un schéma de certification des offres de *cloud* (SecNumCloud) destiné à labelliser des offres sécurisées offrant par ailleurs une protection contre toutes les formes d'accès non souhaités aux données, y compris au travers de lois à portée extraterritoriales. Il s'agit d'un enjeu majeur pour protéger le patrimoine informationnel de nos entreprises.

## QUID DE L'INDUSTRIALISATION ?

Le développement du numérique peut, au premier abord, paraître distant des problématiques d'industrialisation de par la nature intangible de nombreux services et applications numériques et au caractère nécessairement localisé des infrastructures (câbles, équipements actifs, antennes radio, etc.) permettant l'accès aux réseaux de communications électroniques.

Néanmoins, en pratique, et bien que ce ne soit pas visible de l'utilisateur final, l'accélération du numérique participe à la réindustrialisation de la France et à la création de tissus régionaux :

- Dans le domaine de l'électronique en premier lieu. L'Europe a donné le la en se dotant d'une stratégie avec la Chips Act, le doublement de la part de marché de l'Europe dans le domaine de l'électronique ; et la France ambitionne de dépasser les objectifs fixés à l'échelle européenne : elle accueille sur son territoire des projets capacitifs d'envergure tels que le projet de Méga-usine à Crolles co-porté par STMicroelectronics et GlobalFoundries, et porte une stratégie de différenciation forte basée sur une logique "More Than Moore" reposant sur une différenciation des technologies plutôt qu'une course effrénée vers la miniaturisation des composants.
- En matière de *datacenters* ensuite : le développement des services numériques quelle que soit leur nature, repose sur des équipements numériques le plus souvent regroupés dans des centres de données, soit directement propriété des entreprises qui les utilisent, soit mutualisés pour les besoins de plusieurs clients. Ces mutualisations peuvent consister en de la mutualisation de locaux, de machines, de serveurs, voire de solutions applicatives. L'adhérence de ces centres de données mutualisés à une région géographique en particulier va dépendre d'un ensemble de facteurs dont la nature des applications qui y seront hébergées. Des applications nécessitant de très faibles latences devront nécessairement être hébergées à proximité directe des

utilisateurs. La France est aujourd’hui un territoire particulièrement attractif pour l’implantation de *datacenters* en raison en particulier de son mix énergétique, en témoigne l’engouement des acteurs des centres de données et du *cloud* pour l’implantation en France de leurs futurs centres. La France a mis en place une politique de soutien à l’attractivité de ses centres de données, dès lors qu’ils génèrent un impact écosystémique important et sont à l’état de l’art en matière d’empreinte environnementale.

Cette politique d’attractivité porte d’ores et déjà ses fruits avec de nombreux projets d’infrastructures numériques annoncés cette année lors du sommet Choose France. Quel meilleur endroit, en définitive, que la France pour développer votre prochain projet d’infrastructure numérique ?

# Intelligence artificielle : entre craintes et espoirs, quelle réalité ?

**Par Gilbert CETTE**

Professeur à NEOMA Business School

**Et Éric CHANEY**

Économiste, expert associé à l'Institut Montaigne

L'intelligence artificielle (IA) connaît un développement continu sur les dernières décennies et nourrit des craintes de nature diverse, en particulier celle de la destruction de très nombreux emplois. Face au ralentissement tendanciel de la productivité du travail, l'IA fait aussi naître l'espoir d'un retour à une croissance qui permettrait de financer les multiples défis auxquels nos sociétés font face. Les développements futurs concernant l'IA dépendront de la façon dont les acteurs économiques s'en saisiront.

Si l'IA peut avoir des effets marqués sur la productivité de firmes produisant ou utilisant l'IA de façon performante, son impact macroéconomique demeure incertain. Mais l'IA pourrait transformer la nature des emplois et par exemple ralentir ou inverser la tendance à la polarisation des emplois. Pour de multiples raisons, dont une flexibilité plus forte et un moindre coût de la prise de risque, les États-Unis ont une forte avance concernant la production et l'utilisation des IA. L'Europe et la France sont ainsi exposées au risque d'un déclin économique. Il revient donc à l'action publique d'accompagner les entreprises dans l'utilisation mais aussi la production de l'IA, afin de réduire ce risque.

L'intelligence artificielle (IA) connaît un développement continu sur les dernières décennies, associé à la digitalisation croissante de nos économies. Mais l'émergence de l'IA générative (IAG) sur les toutes dernières années a suscité un rebond d'intérêt et nourri des craintes de nature diverse, en particulier celle de la destruction accélérée de très nombreux emplois. Symétriquement, face au ralentissement, voire même la baisse comme c'est le cas en France, de la productivité du travail, l'IA a fait naître l'espoir d'un retour à une croissance qui permettrait de financer les multiples défis auxquels nos sociétés font face, de la transition énergétique à l'investissement dans l'éducation, la recherche et la défense, le désendettement public... L'IA suscite à la fois des craintes et des espoirs. La réalité est plus multidimensionnelle et les développements futurs sont incertains, ne serait-ce que parce qu'ils dépendront de la façon dont les acteurs économiques dans leur ensemble se saisiront de l'IA.

## LE PROGRÈS TECHNIQUE N'EST PAS UN FACTEUR DE CHÔMAGE

L'angoisse de la destruction d'emplois et de l'augmentation du chômage et, en conséquence, de la pauvreté, n'est pas nouvelle et spécifique à l'IA. Mokyr, Vickers et Ziebarth

(2015) ont montré que cette crainte a été récurrente depuis les premières révolutions industrielles. On en trouve par exemple l'expression dès la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle au Royaume-Uni sous la plume de Mortimer (1772). Cette crainte a pu d'ailleurs prendre dans le passé des formes assez violentes. La lutte contre les machines qui détruiraient des emplois est parfois nommée le « luddisme » ou « néoluddisme ». Cette appellation a été proposée par l'historien britannique Edward P. Thompson au sujet du conflit des années 1811-1812 ayant violemment opposé au Royaume-Uni, dans le secteur du textile, des artisans à des employeurs qui recourraient de plus en plus à des machines économisant des travailleurs. Mais ces craintes d'une évaporation de l'emploi ont à chaque révolution technologique été démenties par les évolutions économiques constatées. Les gains de productivité se sont accompagnés d'une large extension de la sphère de consommation des ménages, les nouveaux biens produits entraînant des créations d'emplois qui se sont substitués aux emplois détruits par les gains de productivité induits par les transformations technologiques. L'évaporation de l'emploi agricole, dont la part dans l'emploi total est passée d'environ 40 % à moins de 5 % au cours du XX<sup>e</sup> siècle dans des pays avancés comme la France ou les États-Unis, s'est accompagnée d'une formidable progression de l'emploi dans les services. Sauvy (1980) nommait ce mécanisme le déversement. Il donnait l'exemple des porteurs d'eau, très nombreux à Paris au tout début du XX<sup>e</sup> siècle (il évoque le chiffre de 20 000), dont les emplois ont été détruits par l'installation de réservoirs et canalisations. Il en va de même pour de nombreux autres métiers, comme celui, anecdotique, du poinçonneur des Lilas évoqué par Serge Gainsbourg dans une célèbre chanson. Personne ne regrette la disparition des métiers de porteur d'eau ou de poinçonneur de tickets de métro : ces professions sont peu gratifiantes et leur disparition participe à l'amélioration des conditions de travail. Et sur une longue période, on n'observe pas de corrélation significative au niveau agrégé entre le volume de l'emploi global ou le taux de chômage et les gains de productivité.

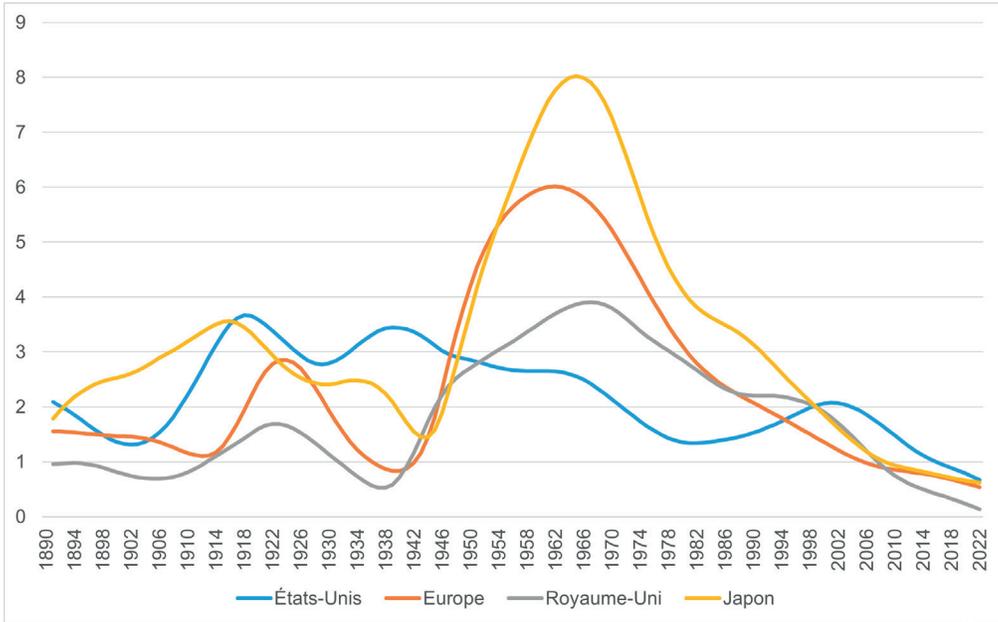
Bien sûr, de nombreux métiers sont menacés par les transformations technologiques en cours, et de nos jours par l'émergence de l'IAG et la diffusion de l'économie numérique. La question importante est ici celle de la transition, autrement dit de la capacité d'opérer le reversement (pour reprendre l'expression de Sauvy) des emplois menacés vers d'autres emplois en expansion. La réussite de cette transition appelle la mobilisation de systèmes de formation professionnelle performants et dynamiques et la diminution des nombreux freins à la mobilité professionnelle. Notons d'ailleurs que l'émergence de l'IAG se produit à une période où les gains de productivité sont les plus faibles observés, hors période de guerre, depuis un siècle et demi dans les économies avancées (voir les graphiques situés page suivante).

Bien sûr également, l'IAG va profondément transformer les modes de travail dans de nombreuses activités. Mais il n'y a ici non plus rien de spécifique à l'IAG : l'émergence et la diffusion des technologies de l'information et de la communication (TIC) depuis la fin du XX<sup>e</sup> siècle ont également profondément transformé les modes de travail dans de nombreuses activités, sans conséquences négatives pour l'emploi global.

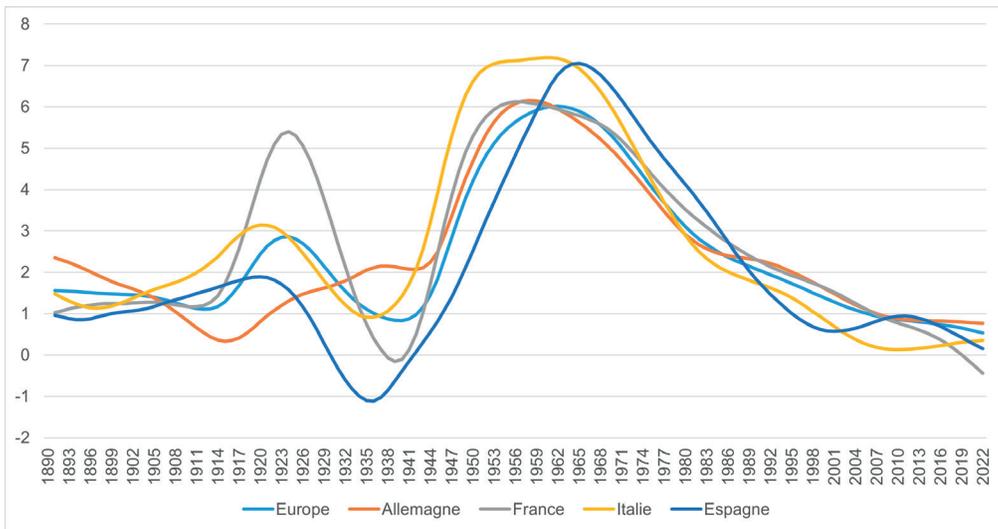
## DE GRANDES INCERTITUDES SUR LES EFFETS PRODUCTIVITÉ DE L'IA

Le rapport Aghion et Bouverot (2024) sur l'IA<sup>1</sup>, réalisé à la demande du Gouvernement, aborde toutes les dimensions de l'IA et des challenges et risques qu'elle peut présenter pour les pays avancés et en particulier pour la France. L'un de ses principaux messages est que

<sup>1</sup> <https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/0001/09/4d3cc456dd2f5b9d79ee75feea63b47f10d75158.pdf>



A - Dans les principales zones avancées ;



B - Dans les 4 principaux pays de la zone euro.

Figure 1 : Taux de croissance annuel moyen de la productivité horaire du travail entre 1891 et 2022, en % - Indicateur lissé (Filtre HP,  $\lambda = 500$ ), Ensemble de l'économie (Source : Bergeaud, Cette et Lecat (2016), [www.longtermproductivity.com](http://www.longtermproductivity.com)).

les pays avancés qui n'intégreront pas pleinement l'IA et l'IAG, dans les deux dimensions de la production et de l'utilisation des technologies correspondantes, prendraient le risque de connaître un déclassement en termes de croissance, de productivité et en conséquence d'emplois. Or, dans les deux dimensions de la production et l'utilisation des technologies

associées à l'IA, l'Europe et la France apparaissent très en retard comparées aux États-Unis. Il faut ici viser un rattrapage et une disparition de ce retard. Une mobilisation forte et urgente des pouvoirs publics est donc indispensable pour créer l'environnement institutionnel et économique le plus favorable à la production des technologies de l'IA et en particulier de l'IAG, mais aussi pour adapter et renforcer la formation favorisant et stimulant l'utilisation de l'IA.

Les effets de l'IA et de l'IAG sur la productivité au niveau global, et donc sur les perspectives de croissance, donnent lieu à une littérature abondante. Force est de constater que cette littérature n'est pas consensuelle, comme cela est fortement souligné par Bergeaud (2024). Si de nombreux intervenants dans ce débat avancent que l'IA et l'IAG devraient être la source de gains de productivité très significatifs (voir par exemple Goldman Sachs, 2023 ; McKinsey, 2024), comme ceux associés à la seconde révolution industrielle qui a traversé le XX<sup>e</sup> siècle, d'autres sont beaucoup plus prudents. Ainsi, dans une étude récente, Daron Acemoglu (2024) avance que les gains de productivité à attendre de l'IA pourraient, en cumul sur les 10 prochaines années, être de l'ordre de 0,5 point de pourcentage, soit 0,05 point de pourcentage par an. Acemoglu et Lensman (2024) soulignent que beaucoup d'incertitudes demeurent sur les gains associés à l'IA<sup>2</sup>. Aghion et Bouverot (2024) calibrent, dans le rapport précité, les gains de productivité à attendre de l'IA par la moyenne de ceux associés dans le passé à la seconde révolution industrielle et à l'émergence des TIC, c'est-à-dire d'environ 10 % sur les 10 prochaines années... Face à ces incertitudes, la plus grande prudence est recommandée. Si les gains de productivité associés à la seconde révolution industrielle, et par exemple à l'utilisation de l'énergie électrique, sont importants, ceux induits par l'émergence et la diffusion universelle des TIC apparaissent faibles, sinon négligeables dans la très grande majorité des pays avancés pourtant grands utilisateurs de telles technologies. Peut-être ne s'agit-il ici que de délais parfois longs entre l'émergence d'une nouvelle technologie et les gains de productivité significatifs qu'elle induit au niveau national. Paul David (1990) remarquait ainsi que plusieurs décennies s'étaient écoulées entre la diffusion de l'énergie électrique et les gains de productivité associés. Ce schéma peut se reproduire concernant l'IA, mais à ce stade on ne peut écarter le pessimisme bien connu d'économistes comme Robert Gordon qui avancent que la période à venir sera, et pour longtemps, celle de faibles gains de productivité, et qu'en ce domaine c'est la période couverte par la seconde révolution industrielle qui a traversé le XX<sup>e</sup> siècle qui est très particulière dans une histoire économique se caractérisant principalement par de faibles gains de productivité. Face à cette absence de consensus, le mieux qu'on puisse dire aujourd'hui est que l'impact de l'IA sur la productivité sera probablement positif, mais que son ampleur et sa durabilité sont hautement incertaines. Rien n'est décidé d'avance.

L'impact économique et social de l'IA sera en grande partie déterminé par le comportement des entreprises et donc la concurrence, qu'il s'agisse de la production de l'IA et des composants nécessaires à l'entraînement des modèles sous-jacents et de l'utilisation des applications directement mobilisables par les entreprises et les particuliers. Depuis le lancement de GPT fin 2022, l'IAG et ses modèles avec qui tout un chacun peut converser (LLM pour *Large Language Model*) ont fait sauter la barrière entre spécialistes, disons les *geeks*, et les employés sans qualification informatique particulière. Pour les entreprises, adopter l'IA est un moyen de réduire drastiquement le temps nécessaire à l'exécution de nombreuses tâches et même d'améliorer la qualité de leurs résultats. À l'échelle microéconomique, il faut donc s'attendre à une accélération de la productivité pour les entreprises

---

<sup>2</sup> “Finally, we showed that the optimal path of adoption depends on a few parameters, but there is currently a huge amount of uncertainty about their values. Careful empirical assessment of the costs and benefits of new, transformative technologies like generative AI is an obvious area for future research”, Acemoglu et Lensman (2024), p. 375.

les plus innovantes dans l'usage de l'IA, ce qui leur permettra de prendre des parts de marché aux moins agiles. Mais il subsiste une incertitude majeure concernant l'ampleur de l'impact sur la productivité de l'ensemble de l'économie, comme on vient de le voir.

L'économie américaine étant plus réactive et plus flexible, ce possible regain de la productivité devrait s'y produire plus tôt que dans les autres pays. Et il y a une raison fondamentale qui pourrait aboutir à un rebond plus important aux États-Unis qu'ailleurs, en Europe et en France notamment : la localisation de la production de l'IA et de l'IAG. Cette production est aujourd'hui essentiellement localisée aux États-Unis, comme les Gafam, du fait d'une flexibilité plus grande de cette économie et d'un coût moins élevé de la prise de risque technologique. Or, la production de l'IA peut elle-même être source de gains de productivité ainsi d'ailleurs que les possibles interactions favorables entre production et utilisation de l'IA. Il y a là un risque de décrochage des pays européens qui appelle, pour en limiter l'ampleur, l'engagement des réformes structurelles utiles pour renforcer la flexibilité et la réactivité des économies, et l'accompagnement des entreprises dans la production et l'utilisation de l'IA, comme le préconise d'ailleurs le rapport Aghion et Bouverot (2024).

Remarquons que les LLM doivent « apprendre » leur compétence en absorbant des milliards de données sous forme d'écrits, et sont donc très dépendants des langues utilisées. Les plus performants sont ceux qui utilisent l'anglais bien entendu, puis le chinois, et ensuite le français, ce qui pourrait donner un avantage aux entreprises françaises.

## LES EFFETS QUALITATIFS DE L'IA SUR LES EMPLOIS

Deux scénarios extrêmes peuvent être envisagés. Dans le plus inquiétant, les entreprises remplacent autant que faire se peut leurs employés par des logiciels d'IA, ce qui ferait bondir la productivité en faisant chuter le dénominateur – le nombre d'employés et donc les heures travaillées. Une forme extrême de ce scénario a été décrite par Brynjolfsson (2022). Extrapolant les avancées actuelles jusqu'à une hypothétique « intelligence similaire à celle de l'être humain » (nous en sommes encore très loin !), il l'a qualifié de « piège de *Turing* » : en substituant massivement des robots intelligents à leurs employés, la part des profits dans la valeur ajoutée augmenterait et avec elle les inégalités de revenu et de patrimoine. Les grandes entreprises technologiques productrices de tels robots, le *Big Tech*, accaparaient un pouvoir économique et sociétal exorbitant. L'histoire nous a abondamment appris que de telles situations conduisent au désespoir des perdants (minutieusement documenté dans le cas des perdants de la mondialisation par Case et Deaton, 2020), et que c'est un des ferments principaux du basculement vers le populisme.

À l'opposé, les entreprises peuvent faire le choix d'augmenter la productivité de chaque employé en lui fournissant l'aide d'applications nourries d'IA. Le regain de productivité viendrait alors du numérateur, la valeur ajoutée. L'augmentation de cette dernière ne viendrait pas nécessairement de la quantité de biens ou services produits, mais plutôt de leur adéquation aux besoins des clients, donc de la qualité, notion qui peut paraître évasive mais qui est mesurée par les statisticiens depuis des décennies. Brynjolfsson (2022) décrit également ce scénario, qu'il nomme enrichissement (« augmentation ») et qu'il considère comme plus probable que le piège de *Turing*. Il note qu'au cours des deux derniers siècles, l'adaptation des entreprises aux bouleversements technologiques a toujours plutôt pris la forme de l'enrichissement que du remplacement. En sera-t-il de même avec l'IA ? Après avoir interrogé plus de 5 000 employés du service après-vente d'une grande entreprise de logiciels, à qui l'on a mis simultanément à disposition une

version récente d'un outil d'IAG produit par OpenAI, Brynjolfsson, Li et Raymond (2023)<sup>3</sup> arrivent à des conclusions intéressantes en comparant l'avant et l'après : l'usage de l'outil qui, sur demande, se contente de faire des suggestions au demandeur, aide à diffuser les meilleures pratiques parmi les employés, facilite l'apprentissage des nouveaux employés, augmente la satisfaction des clients et réduit les départs de l'entreprise. Sur la base de résultats d'enquêtes, Pissarides (2024) va dans le même sens, soulignant que les craintes de destructions massives d'emplois sont exagérées concernant l'IA qui pourrait même enrichir le contenu de nombreux postes de travail. Mais on ne peut extrapoler ces résultats, qui montrent d'ailleurs une forte hétérogénéité.

Le changement qualitatif opéré par les applications d'IA fonctionnant en langage de tous les jours peut faire pencher la balance du bon côté, si l'on se place sur un axe remplacement-enrichissement des emplois. Autor (2024), prenant le contre-pied d'une semi boutade du Premier ministre britannique Rishi Sunak disant « à un certain point, on n'aura plus besoin de travail », va plus loin. Il considère qu'un bon usage de l'IA de type IAG pourrait inverser la tendance à la polarisation de l'emploi qu'il avait détaillée dans de précédentes publications, entre employés dont l'expertise augmente fortement avec l'usage des outils informatiques et ceux dont l'expertise est au contraire dévalorisée, contribuant ainsi à la disparition de la classe moyenne et à l'augmentation des inégalités. Ensuite, Autor (2024) note que les outils d'IAG permettent d'augmenter l'expertise, au sens de la prise de décision informée, de tous les employés et, toutes proportions gardées, de façon plus marquée pour les moyennement qualifiés. En somme, un bon usage de l'IA pourrait faire revivre la classe moyenne, dont l'érosion fut source structurelle d'inégalités souvent considérées comme propices aux populismes.

Les perspectives offertes par l'IA ne se limitent pas aux entreprises. Les administrations publiques sont également concernées. De même que l'adoption d'outils informatiques et la numérisation a probablement entraîné une amélioration des services publics, même si la mesure en est difficile, celle de l'IA, par l'intermédiaire d'outils adaptés et évolutifs, devrait permettre d'augmenter à la fois la qualité et la quantité des services rendus. Après deux mois d'expérimentation d'une IA générative par des agents d'administrations françaises en contact avec le public, les premiers résultats sont encourageants : le temps de réponse aux demandes en ligne est passé de 7 à 3 jours, et 74 % des usagers se sont dits satisfaits (MTFP, 2023). Le développement d'un outil plus ambitieux, Albert, qui a vocation à être mis à la disposition de tous les agents publics, devrait permettre d'aller plus loin. En résultera-t-il une augmentation de la productivité dans les administrations publiques ? Comme cela dépend cruciallement de la gestion des effectifs des administrations publiques et que celle-ci est aux mains des décideurs politiques, il est difficile de répondre à la question. Mais il est légitime de penser que l'amélioration de la qualité des services publics pourrait contribuer à celle de la productivité de l'ensemble de l'économie.

## POUR CONCLURE

Si l'IA pourrait avoir des effets marqués sur la productivité de firmes la produisant ou l'utilisant de façon performante, l'impact macroéconomique demeure très incertain. Le précédent des TIC dont la forte diffusion ne s'est pas traduite par des gains de productivité macroéconomique importants ne peut être oublié. Mais l'IA pourrait transformer la nature des emplois et par exemple ralentir ou inverser la tendance précédemment observée de la polarisation des emplois.

Pour de multiples raisons, dont une flexibilité plus forte et un moindre coût de la prise de risque, les États-Unis ont une forte avance comparée à l'Europe et la France concernant

<sup>3</sup> <https://danielle-li.github.io/assets/docs/GenerativeAIatWork.pdf>

la production et l'utilisation des IA. Si elle se confirmait, et plus encore si elle s'approfondissait, cette avance se traduirait par un déclassement économique des pays en retard. Il revient donc à l'action publique dans des domaines aussi divers que la taxation, y compris les incitations fiscales, la formation continue, l'adoption rapide du modèle d'enrichissement dans les services publics, d'accompagner les entreprises dans l'utilisation mais aussi la production de l'IA, afin de réduire ce risque de déclassement.

## RÉFÉRENCES

ACEMOGLU Daron (2024), "The Simple Macroeconomics of AI", mimeo, April 5, <https://economics.mit.edu/sites/default/files/2024-04/The%20Simple%20Macroeconomics%20of%20AI.pdf>

ACEMOGLU Daron & LENS MAN Todd (2024), "Regulating Transformative Technologies", *American Economic Review*, Vol. 6, n°3, September, pp. 359-376.

AGHION Philippe & BOUVEROT Anne eds. (2024), « IA : Notre ambition pour la France », Rapport remis au Gouvernement, Commission de l'Intelligence Artificielle, mars, <https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/0001/09/4d3cc456dd2f5b9d79ee75f6ea63b47f10d75158.pdf>

AUTOR David (2024), "Applying AI to rebuild middle class jobs", NBER, Working Papers, n°32140, February.

BERGEAUD Antonin (2024), "The past, present and future of European productivity", ECB Forum on Central Banking, 1-3 July, [https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/sintra/ecb\\_forumcentbankpub2024\\_Bergeaud\\_paper.en.pdf](https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/sintra/ecb_forumcentbankpub2024_Bergeaud_paper.en.pdf)

BRYNJOLFSSON Erik (2022), "The Turing Trap: The Promise & Peril of Human-Like Artificial Intelligence", *Daedalus*, Vol. 151, Issue 2, pp. 272-287, <https://direct.mit.edu/daed/article/151/2/272/110622/The-Turing-Trap-The-Promise-and-Peril-of-Human>

BRYNJOLFSSON Eric, LI Danielle & RAYMOND Lindsey (2023), "Generative AI at Work", mimeo, 9 October, <https://danielle-li.github.io/assets/docs/GenerativeAIatWork.pdf>

CASE Anne & DEATON Angus (2020), *Deaths and Despair and the Future of Capitalism*, New Jersey, Princeton University, 312 pages.

DAVID Paul (1990), "The Dynamo and the Computer: An Historical Perspective on the Modern Productivity Paradox", *American Economic Review*, vol. 80, issue 2, pp. 355-361.

GOLDMAN SACHS (2023), "Generative AI could raise global GDP by 7 percent.", mimeo, April 5, <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/generative-ai-could-raise-global-gdp-by-7-percent.html>

MTFP - MINISTÈRE DE LA TRANSFORMATION ET DE LA FONCTION PUBLIQUE (2023), « Intelligence artificielle, l'État s'engage pour rendre l'action publique plus simple, plus efficace au service des français », Communiqué 1452 du 12 décembre 2023, <https://presse.economie.gouv.fr/intelligence-artificielle-letat-sengage-pour-rendre-laction-publique-plus-simple-plus-efficace-au-benefice-des-francais/>

MOKYR Joel, VICKERS Chris & ZIEBARTH Nicolas L. (2015), "The History of Technological Anxiety and the Future of Economic Growth: Is This Time Different?", *Journal of Economic Perspectives*, vol. 29, n°3, Summer 2015, pp. 31-50.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE (2024), "A new future of work: The race to deploy and raise skills in Europe and beyond", Report, May 21, <https://www.mckinsey.com/mgi/>

our-research/a-new-future-of-work-the-race-to-deploy-ai-and-raise-skills-in-europe-and-beyond

MORTIMER Thomas (1772), *The Elements of Commerce, Politics, and Finance*, 464 pages.

PISSARIDES Christopher (2024), "Should Workers Fear AI?", Project Syndicate, 11 March, <https://www.project-syndicate.org/magazine/ai-workers-fears-overblown-especially-with-prudent-policies-by-christopher-pissarides-2024-03>

SAUVY Alfred (1980), *La machine et le chômage*, Paris, Dunod, 319 pages.

# Géopolitique de la logistique et rôle du numérique

Par Maxime FOREST  
France Logistique

Omniprésente dans le fonctionnement de l'économie, la logistique aura un rôle clé à jouer dans les transformations du tissu productif européen. Son coût économique et environnemental peut être amélioré notamment par une numérisation accrue et une plus large circulation des données. Bien que prometteuse en termes d'optimisation des opérations, cette circulation reste limitée à présent. Les enjeux ne sont pas seulement économiques mais aussi politiques, car la souveraineté repose sur la performance des chaînes logistiques.

## LA LOGISTIQUE EST LE BRAS ARMÉ DES PUISSANCES ÉCONOMIQUES ET INDUSTRIELLES

### La logistique est le support de l'économie des produits et de ses transformations

Du transport au stockage, en passant par tous les services associés pour que les marchandises arrivent au bon endroit, au bon moment, avec les données de traçabilité qui leur sont associées, la logistique recouvre une large gamme d'activités qui peuvent être soit internalisées par des entreprises, soit réalisées par des prestataires spécialisés.

En France, près de 10 % de l'emploi salarié est exercé dans la logistique, qui agit comme le système sanguin de l'économie des produits. Chaque jour, pour chaque Français, ce sont 70 kg de marchandises en moyenne qui se mettent en mouvement. Des ports aux usines, des exploitations agricoles aux commerces et restaurants, des entrepôts aux services publics, entreprises et ménages, c'est tout un pays qui fonctionne grâce aux flux de marchandises. Sur le territoire français, ces flux (en tonnes-kilomètres) sont assurés à 88 % par la route, 10 % par le rail et 2 % par le fleuve.

Les flux logistiques reflètent nos modes de vie et de consommation : en ville en particulier, les norias de poids lourds alimentant les commerces, les utilitaires des artisans et les véhicules de tous types, du camion au vélo, assurant la livraison des entreprises et des particuliers, notamment pour le e-commerce, illustrent la variété des activités économiques qui reposent sur la logistique. Plus du quart des marchandises transportées relèvent de l'agroalimentaire : littéralement, la logistique nous nourrit.

Pourtant, lorsque l'on examine les volumes de marchandises transportées à une échelle plus macroscopique et sur le temps long, c'est la production industrielle d'un territoire qui apparaît comme le déterminant principal de la croissance des trafics (Clément et Morain, 2023). Ainsi apparaît la fonction majeure de la logistique, qui est le soutien essentiel de l'activité productive d'un territoire. Se dessine aussi le défi principal de la filière pour le futur : permettre et accompagner la réindustrialisation de l'Europe et de la France, en se préparant à une augmentation des besoins de logistique, tout en s'inscrivant dans une trajectoire vertueuse sur le plan environnemental.

En Allemagne, les autorités prévoient une augmentation des flux de marchandises sur le territoire de l'ordre de + 45 % à l'horizon 2050 (Nadal, 2023), quand le ministère des transports français table sur + 12 % (Gouvernement, 2023) : méthodologies différentes sûrement ; trajectoires industrielles distinctes peut-être ; mais dans tous les cas, une nette augmentation des flux est à prévoir.

Au-delà de la capacité de la filière logistique à répondre à l'augmentation de la demande, l'enjeu est aussi celui du niveau de performance économique et environnementale du service qui sera rendu. On a coutume de considérer que le coût logistique représente de l'ordre de 10 % du coût d'un produit fini. À l'heure des obligations environnementales issues notamment de la directive CSRD et des bilans carbone en « scope 3 », le coût environnemental de la logistique sera aussi de plus en plus scruté par les industriels. En d'autres termes, la compétitivité et la décarbonation de la logistique sont un enjeu d'intérêt général pour le destin du pays.

## Une affaire de souveraineté, nécessairement politique

Bien connu des militaires, le rôle vital de la logistique se rappelle aux civils à l'occasion des crises : crise sanitaire, quand on découvre que des stocks de vaccins peuvent être réquisitionnés et détournés sur le tarmac d'un aéroport ; crise géopolitique, quand on observe que les stocks d'une entreprise en France peuvent se vider du fait de tensions en mer Rouge ; crise politique et sociale, quand les blocages sur nos routes mettent sous tension toute l'alimentation des villes.

La puissance logistique est un bras armé des politiques économiques et de souveraineté. La Chine et les États-Unis appliquent ce précepte chacun à sa manière : la première, en déployant ses nouvelles routes de la soie qui reposent notamment sur un contrôle étroit des infrastructures (ferroviaires, portuaires) qui la relie à l'Europe, s'assurant la maîtrise stratégique de ses voies d'exportation ; les seconds, en réunissant autour du président un haut conseil des chaînes d'approvisionnement qui s'assure que la logistique concourt aux objectifs politiques intérieurs et en n'hésitant pas à recourir de manière agressive à la politique douanière.

En Europe, la France est entourée de places fortes de la logistique : Rotterdam et Anvers sont des plaques tournantes des flux internationaux de marchandises, avec des ports puissants, très bien connectés à leurs territoires (*hinterlands*) et soutenus par les politiques économiques, notamment commerciales, de leurs États. La France tient une position plus mitigée, à la treizième place mondiale du classement des nations de la logistique selon la Banque mondiale.

La prise de conscience de la dimension politique de la logistique progresse en France. Depuis 2020, le Gouvernement réunit chaque année un comité interministériel de la logistique, avec les acteurs privés de la filière rassemblés sous la bannière de France Logistique. Ce CILOG annuel donne à voir la montée en puissance des politiques publiques pour la logistique et leur mise en cohérence avec les autres objectifs de la nation, notamment en matière de réindustrialisation et de décarbonation. Une stratégie nationale logistique a été publiée en 2022, organisant une action concertée des ministères de l'Économie et des Transports pour le développement de la filière. Elle se décline localement, à travers l'action des collectivités dans leurs domaines de compétences (stratégies d'aménagement et de développement économique pour les régions, urbanisme, circulation et stationnement pour les communes, etc.).

## LA VALEUR DE LA LOGISTIQUE REPOSE SUR LA MAÎTRISE DES DONNÉES

### La logistique, un métier d'optimisation qui repose sur la donnée

La rentabilité de la logistique repose sur l'optimisation : minimisation des temps de tournée, de l'énergie consommée, des espaces de stockage. Le secteur s'est naturellement intéressé à l'exploitation de ses données, qui sont au cœur des modèles d'affaires des entreprises. La logistique a toujours été un champ d'application naturel pour la recherche opérationnelle.

Aujourd'hui, les algorithmes de prévision se sophistiquent et requièrent des volumes d'informations croissants, pour optimiser les stocks et mieux décider des stratégies de réassort et de livraison. En parallèle, les enjeux de traçabilité des marchandises ont gagné en importance, à la fois pour des raisons économiques et réglementaires, forçant à structurer de véritables politiques de gestion et de protection de la donnée : livrer une marchandise ne suffit pas, il faut aussi assurer simultanément la circulation de la donnée associée, tout en garantissant son intégrité et sa sécurité.

La mesure, l'exploitation et la valorisation des données ouvrent naturellement de vastes champs d'innovation, dans lesquels se créent de nouveaux modèles d'affaires et de possibles disruptions. Maîtriser la donnée, c'est de plus en plus souvent capter la valeur.

### L'échange de données, une évidence contrariée

Les chaînes logistiques reposent souvent sur de multiples acteurs et contrats de sous-traitance, entre les étapes de stockage, chargement, transport, déchargement, transbordement, etc. Ces étapes peuvent se dérouler dans plusieurs villes, ou sur plusieurs continents. Le papier est encore la manière la plus fréquente de transmettre les données entre acteurs : le récent rapport de Mario Draghi sur la compétitivité de l'Europe (Draghi, 2024) rappelait que 99 % des opérations de transport international requièrent encore un document papier à un moment ou à un autre. La numérisation constitue un levier d'efficacité prioritaire pour le secteur.

Fluidifier la circulation des données entre les acteurs, c'est permettre une optimisation sur un système plus grand que celui de chaque entreprise. La valeur potentielle (économique et environnementale) est considérable : par exemple, si plusieurs clients d'un transporteur ou d'un entrepôt acceptent de partager leurs prévisions de volumes de marchandises, des mutualisations efficaces deviendront possibles. Plus généralement, toutes les tâches de planification et d'anticipation sont susceptibles d'être mieux exercées, et la traçabilité mieux assurée. En Europe, les obligations environnementales des entreprises sont un puissant moteur qui incite les clients en bout de chaîne à avoir une vision fiable du trajet et des émissions de leurs marchandises. Aussi surprenant que cela puisse paraître, c'est aujourd'hui un défi difficile.

L'intérêt pour les données de la logistique concerne aussi les pouvoirs publics. Traditionnellement, c'est la douane qui a un droit de regard sur tous les flux internationaux de marchandises, afin de les taxer et de les contrôler. La numérisation et la circulation des données se joue aussi à cette interface entre public et privé : le règlement européen eFTI (*Electronic Freight Transport Information*), adopté en 2020, prévoit de numériser et harmoniser les documents qui accompagnent les marchandises pendant leur transport.

Les collectivités territoriales aussi, qui s'intéressent à la logistique sous l'angle de la politique foncière et des questions de circulation routière, voudraient avoir accès aux

données de la logistique : savoir quels véhicules circulent, pour quoi faire, avec quelles marchandises... afin de mieux gérer les places de stationnement, ou de réglementer plus finement le trafic. Le chemin du partage des données entre public et privé sera encore long et sinueux, mais de premières initiatives sont à saluer, notamment en matière de numérisation de la réglementation locale (zones à faibles émissions, règles de circulation).

## Les nouvelles règles du jeu logistique dépendront de la politique des données

Si la circulation des données entre les acteurs apparaît aujourd’hui comme un impératif, elle n’est pas généralisée. Les organisations et les systèmes d’information logistiques sont largement fragmentés par modes de transport, par types de services, et les normes et standards s’y sont développés isolément.

Le besoin de circulation des données est particulièrement exprimé par les chargeurs qui, dans leur fonction de donneur d’ordre de la chaîne logistique, ont le plus intérêt à en avoir une vision globale pour améliorer leur prise de décision.

Au-delà des questions techniques et économiques, l’enjeu de confiance et de confidentialité est crucial. Partager des prévisions d’activité avec un concurrent est évidemment inconcevable. Les solutions de partage de données doivent donc prévoir des règles de fonctionnement qui permettront l’adhésion des acteurs.

De nouvelles coopérations entre acteurs privés doivent s’établir, en traitant deux questions :

- La standardisation : vu la multiplicité des entreprises, des chargeurs aux logisticiens, ainsi que des solutions logicielles coexistantes, la mise en place de langages communs assurant l’interopérabilité ou la comparabilité des solutions peut être envisagée. Dans les secteurs du transport aérien et maritime, des associations d’acteurs ont déjà créé des standards pour les processus ou les données, mais il n’existe pas de standard englobant tous les modes de transport.
- La gouvernance : comme dans les autres secteurs économiques, la question de la gestion et du contrôle de la donnée est cruciale. Il s’agit de garantir la confidentialité et la sécurité, mais c’est aussi une question de captation de valeur et de maîtrise des nouveaux modèles d’affaires.

Et, comme souvent en logistique, la géopolitique n’est pas loin : depuis 2023, la Chine a obtenu la création et la présidence d’un groupe de travail dédié à la logistique innovante à l’ISO, matérialisant son souhait de peser davantage sur les règles du jeu de la logistique mondiale.

## BIBLIOGRAPHIE

CLÉMENT L. & MORAIN J.-É. (2023), « Les facteurs explicatifs de la demande de transport de marchandises par pays », *Transports, Infrastructures & Mobilité*, n°541, pp. 24-31.

DRAGHI M. (2024), “The future of European competitiveness”, Commission européenne.

GOUVERNEMENT (2023), « 4<sup>e</sup> comité interministériel de la logistique », Dossier de presse, décembre.

NADAL H. (2023), « Comprendre la demande de transport de marchandises et ses facteurs d’évolution », *Transports, Infrastructures & Mobilité*, n°541, pp. 32-43.

# Un dialogue culturel entre industrie et numérique au service de la productivité industrielle

Par Arthur GAUDRON

Enseignant-chercheur au sein du Centre de Robotique Mines Paris – PSL

Dans un environnement mondialisé, l'acculturation numérique pourrait être un levier important pour la compétitivité de l'industrie. L'article met en lumière la nécessaire collaboration entre les équipes « métier » et les équipes « digitales » dans la réflexion sur les pratiques opérationnelles pour bénéficier des possibilités du numérique. Il souligne également la nécessité pour les directions générales de participer à ce processus d'acculturation pour prendre part aux décisions stratégiques relatives à ces deux champs d'expertise.

Enfin, l'article relève les défis pour mener à bien ce dialogue et aboutir à une décision stratégique concertée. D'une part, la connaissance du management des opérations est la condition nécessaire, et d'autre part l'évolution des pratiques souhaitable sur un plan technique et opérationnel peut être entravée par des dynamiques organisationnelles.

## INTRODUCTION

Les rapports remis régulièrement sur la réindustrialisation (Vicard, 2024) semblent montrer une préoccupation continue de l'État sur cette question. Seul l'avenir nous dira si les récentes crises sanitaires ou géopolitiques inscriront durablement l'intérêt pour le développement d'une industrie domestique forte. Au-delà d'un intérêt de souveraineté porté principalement par un projet politique, le mouvement vers une industrie plus locale porte des intérêts économiques pour les entreprises (Mouhoub, 2017). Et si les perspectives commerciales poussent au développement des moyens de recherche et de production locaux, les entreprises sont aussi poussées au travers de la RSE par le législateur, et ce dernier est suivi dans une certaine mesure par leurs investisseurs (Durand *et al.*, 2019).

Néanmoins le développement de nouvelles ressources est nécessaire à la réalisation de cette stratégie pour espérer son succès. En effet, cette ambition de réindustrialisation s'insère dans un environnement encore très mondialisé. L'industrie domestique se devra d'être compétitive sur le plan économique, social et environnemental. Dans la perspective de compétitivité économique, une enquête de la Banque de France (Lesterquy *et al.*, 2024) montre que 68 % des entreprises de l'industrie manufacturière (de 20 salariés ou plus) jugent important ou très important « l'investissement en numérique et informatique » en tant que l'un des principaux leviers permettant l'augmentation de la productivité.

Une analyse des cinq autres leviers jugés « importants » révèle le caractère transversal du numérique. Est-ce que les outils numériques antédiluviens ne sont pas un frein au levier de « la politique de recrutement et attractivité » en particulier pour les plus jeunes

génération ? Comment se passer de la maintenance prédictive et de l'Internet des Objets pour le levier des « équipements et machines plus efficace » ?

L'omniprésence du numérique dans nos vies professionnelles et personnelles laisserait à penser que nous en sommes arrivés à sa maîtrise pour en tirer tous les bénéfices. Mais si nous observons notre expérience dans nos organisations, il nous est aisé d'énumérer les exemples d'outils numériques inadaptés à nos pratiques « métier ». En revanche, il est plus difficile d'identifier comment faire évoluer nos pratiques « métier » grâce aux possibilités inédites du numérique. Cette difficulté appelle logiquement à une interface entre les usagers et les concepteurs des outils numériques.

Le but de cet article est d'aborder ce défi, déjà bien identifié par l'industrie<sup>1</sup>, sous l'angle du concept de culture (c'est-à-dire ce qui est commun à un groupe d'individus). Pour simplifier le propos, nous distinguerons deux cultures. D'un côté, une culture « métier » associée au management des opérations et de la *supply chain*. Et de l'autre côté, une culture « numérique » associée au DSI et aux équipes dites « digital ». Nous illustrons les échanges entre ces cultures pour mettre en valeur l'intérêt dans le potentiel d'évolution des pratiques et des technologies pour augmenter la compétitivité des industries dans la production de biens et de services. Nous montrons aussi que les directions doivent se saisir de ce travail d'acculturation pour donner les ressources nécessaires à la collaboration des équipes « métier » avec les équipes « digitales ». De plus, l'implication de la direction est indispensable dans une perspective d'évolution des pratiques qui peuvent mettre en cause l'identité des groupes ainsi que les relations de pouvoir au sein de l'organisation.

## LA PLACE DU NUMÉRIQUE DANS DES PRATIQUES DU MANAGEMENT DES OPÉRATIONS ET DE LA *SUPPLY CHAIN*

La culture d'une fonction peut produire un « modèle épistémique » (Berlinski et Morales, 2024) propre à cette dernière, et de fait rentrer en conflit avec les autres fonctions qui auraient choisi une autre façon de représenter leur environnement au travers par exemple de règles ou de normes. À partir d'une situation de conflits entre deux modèles épistémiques (comptables et informaticiens), Berlinski et Morales (2024) s'interrogent pour savoir si la comptabilité ne pourrait pas se réinventer en s'appropriant les normes des informaticiens (modularité et décentralisation). Il s'agirait de s'appuyer sur une certaine perméabilité entre les cultures pour innover dans leurs pratiques.

Dans la suite de l'article, nous proposons des exemples de pratiques du management des opérations et de la *supply chain* qui bénéficient ou bénéficieraient d'une plus grande proximité avec les équipes « digitales ».

### Logistique

Dans le domaine de la logistique, nous nous intéresserons à l'analyse ABC pour la gestion de stocks, l'analyse de séries temporelles pour la prévision de la demande, et les outils numériques pour la distribution.

L'analyse ABC propose une segmentation des références en trois classes (A, B et C) pour adapter une politique de gestion spécifique. L'outil s'appuie sur le principe de Pareto où 20 % des efforts produisent 80 % des résultats. L'application de ce principe produit généralement une classe A avec peu de références générant la majorité de la valeur, et une classe C avec beaucoup de références générant une valeur marginale. La valeur peut

---

<sup>1</sup> <https://agilemanifesto.org/>

être mesurée par différents indicateurs comme le coût, le nombre de ventes, le chiffre d'affaires, ou la marge.

Ainsi l'outil incite le gestionnaire à concentrer ses efforts sur les références de la classe A, plutôt que la classe C, pour maximiser la disponibilité des références dont la valeur est la plus grande. Dans la pratique, l'analyse ABC est un outil utilisé pour réaliser des estimations de premier ordre, mais elle a disparu des grandes entreprises dans la gestion quotidienne des stocks.

L'analyse ABC reste un outil largement enseigné, car elle conserve des vertus pédagogiques en plus d'un intérêt pratique. Et pour notre discussion, l'expérience d'enseignant sur les limites de l'analyse ABC apporte un éclairage, bien qu'anecdotique, sur la difficulté de ponts entre les cultures *supply chain* et numérique. Nous observons que la majorité des étudiants formés au génie industriel et à l'informatique ne voit pas une contradiction entre une analyse *data science* permettant théoriquement un traitement pour chaque référence et une analyse avec seulement trois classes de références. Le principe de Pareto semble tellement ancré dans l'esprit d'étudiants logisticiens que la possibilité d'opérer à une granularité plus fine ne semble pas être une idée séduisante.

Ensuite, l'analyse de séries temporelles est une technique répandue dans les entreprises, car elle est rendue très accessible au travers de nombreux logiciels. Néanmoins, elle fait appel à des notions mathématiques (par exemple le lissage exponentiel, le biais, la variance) qui provoquent un effet boîte noire pour les utilisateurs. L'une des conséquences est la mise en place de pratiques manuelles comme le nettoyage des erreurs ou la suppression d'une demande exceptionnelle dans les historiques. Pour les équipes « digitales », ces activités sont généralement considérées, à raison, chronophages et risquées pour l'intégrité des données. Les équipes « métier » utilisatrices de ces analyses manquent parfois de compétences en programmation pour automatiser des tests de performance des modèles, et en optimisation pour paramétrer leurs modèles. Le développement d'une culture autour du numérique permettrait d'ouvrir la boîte noire, et ouvrir des perspectives vers des modèles plus avancés comme la prévision probabilistique.

Enfin, la fonction de distribution s'est largement étoffée grâce au numérique : l'omnicanalité, *drive auto* ou piéton, course en 15 min, etc. Mais le numérique n'a pas toujours été une évidence pour la distribution, et cela a été la force de la *start-up* Colizen (racheté depuis par Chronopost en 2014). Colizen était l'un des rares logisticiens à proposer une grande innovation pour l'époque : la prise de rendez-vous ! Cette différenciation a permis à l'époque de livrer des produits à haute valeur ajoutée grâce à une traçabilité et un haut niveau service permis par une infrastructure numérique.

## Production

“Yes, excessive automation at Tesla was a mistake. To be precise, my mistake. Humans are underrated”. Cette citation d'Elon Musk en avril 2018 survient à la suite de l'échec de la montée en capacité de la production de la Tesla Model 3. Le manque de flexibilité due à une automatisation excessive a empêché de résoudre les différents problèmes rencontrés. Cette mésaventure d'une entreprise résolument innovante fait écho à l'article séminale de Skinner (1969) sur le caractère stratégique de l'outil de production. Il souligne notamment la fausse promesse d'un modèle systémique (c'est-à-dire un jumeau numérique). L'argument principal ne porte pas tant sur l'incapacité technique d'un informaticien à modéliser un système, mais sur le risque de déléguer des décisions stratégiques relevant de la direction à des experts de la production ou de l'informatique.

Dans le cadre de notre discussion, l'argument de Skinner signifie que la direction doit prendre part à ce mouvement d'acculturation entre le « métier » et le « digital ». Ce type de positionnement peut être illustré par l'ambitieuse stratégie de l'entreprise Fairmat vers une automatisation d'usine à grande échelle. L'entreprise recycle des composites en

fibres de carbone et conçoit des produits à partir de la matière recyclée. L'entreprise est confrontée à plusieurs défis, tels que la capacité à faire évoluer rapidement les processus de recyclage et de production, qui doivent pouvoir s'adapter pour changer d'échelle, ainsi que la capacité à assurer la traçabilité des matières, garante de la qualité des produits finis. Cette stratégie s'exprime aujourd'hui avec le développement en interne de son propre *Manufacturing Execution System* (MES) plutôt que de faire appel à une solution classique sur étagère. En effet, si l'ambition est un progiciel de gestion encore capable de gérer une usine de manière autonome, Fairmat se doit de commencer à développer et cultiver le dialogue entre le métier et le digital pour espérer dépasser le *statu quo* proposé par les vendeurs de progiciels de gestion.

## CONCLUSION

À travers les exemples, nous avons cherché à montrer l'intérêt d'un dialogue entre les cultures « métier » et « numérique » pour mobiliser les compétences et les connaissances, et que cet échange est vertueux pour l'amélioration de la productivité de l'industrie en général. Nous retenons trois défis dans cette ambition de dialogue.

Premièrement, le lancement de ce mouvement d'acculturation nécessite l'existence même de ces cultures. Or l'observation de missions industrielles réalisées par les étudiants du Mastère Spécialisé Management Industriel et Systèmes Logistiques montre que certaines entreprises ne considèrent pas le caractère stratégique du management des opérations. Un exemple frappant est celui d'une direction générale souhaitant un grand plan « usine 4.0 », alors que les opérateurs ne sont pas dotés de fournitures simples comme une ceinture porte-outils (utile pour limiter la perte de temps en déplacement).

Deuxièmement, si les directions identifient une nécessité de promouvoir une culture industrielle, celle-ci peut se révéler difficile à acquérir, car elle repose sur des investissements industriels pensés sur le long terme. La difficulté actuelle d'Apple d'amorcer le découplage de sa production avec la Chine (Chan, 2024) illustre bien l'idée que l'entreprise s'y est installée pour bénéficier de compétences et d'un réseau de fabricants existants, plutôt que pour une unique motivation de réduction des coûts. Il y a un long chemin pour rattraper la Chine qui tire le bénéfice de cet investissement dans les compétences industrielles. Elle n'est plus seulement « l'usine du monde », elle fournit maintenant le capital et les compétences pour ouvrir des usines à l'étranger. Certaines sont même destinées à contourner les barrières douanières<sup>2</sup> pour le bénéfice des consommateurs et des entreprises d'Amérique du Nord.

Troisièmement, les directions doivent être attentives à ce que les changements de pratiques « métier » peuvent déstabiliser l'organisation en modifiant l'identité des groupes et les relations de pouvoir. La remise en cause d'un savoir-faire technique signifie aussi la remise en cause de personnes au sein de l'organisation (Vermorel et Verdo, 2023). Si l'échange entre les cultures est vertueux sur le plan de la technique, il faut s'assurer que la conduite du changement prenne en compte les déséquilibres organisationnels.

Pour conclure, nous soulignons que ce dialogue entre le monde des usines et le monde des ordinateurs existe déjà bel et bien. L'ouvrage *The Phoenix Projet* (Kim *et al.*, 2013) est l'une des preuves que ce dialogue peut être fécond de concepts fondateurs. Les auteurs s'inspirent de la théorie et du style narratif d'un ouvrage incontournable du management des opérations « *Le But* » (Goldratt et Cox, 2004) pour penser un concept connu de tous les informaticiens : le DevOps !

<sup>2</sup> *How Chinese firms are using Mexico as a backdoor to the US* (2024, April 21), <https://www.bbc.com/news/business-68825118>

## BIBLIOGRAPHIE

BERLINSKIE. & MORALES J. (2024), “Digital technologies and accounting quantification: The emergence of two divergent knowledge templates,” *Critical Perspectives on Accounting*, 98, 102697, <https://doi.org/10.1016/j.cpa.2023.102697>

CHANK. (2024), “How China is moving up Apple’s supply chain”, <https://www.high-capacity.com/p/how-china-is-moving-up-apples-supply?triedRedirect=true>

DURAND R., PAUGAM L. & STOLOWY H. (2019), “Do investors actually value sustainability indices? Replication, development, and new evidence on CSR visibility”, SSRN Scholarly Paper 3364141, <https://papers.ssrn.com/abstract=3364141>

GOLDRATT E. M. & COX J. (2004), *The goal: A process of ongoing improvement*, third revised edition, North River Press.

KIM G., BEHR K. & SPAFFORD G. (2013), *The phoenix project: A novel about it, DevOps, and helping your business win*, IT Revolution Press.

LESTERQUY P., STOJANOVIC E., DEKONINCK H. & ZORY J. (2024), « Baisse de la productivité du travail dans l’industrie en France en 2023 un constat et des leviers d’action », Banque de France, <https://www.banque-france.fr/system/files/2024-03/Baisse%20de%20la%20productivit%C3%A9%20du%20travail%20dans%20l%E2%80%99industrie%20en%20France%20en%202023%20un%20constat%20et%20des%20leviers%20d%E2%80%99action.pdf>

MOUHOUB E. M. (2017), « Les relocalisations industrielles et les limites des délocalisations », in *Mondialisation et délocalisation des entreprises*, 5<sup>e</sup> éd., pp. 47-56, La Découverte, Cairn.info, <https://www.cairn.info/mondialisation-et-delocalisation-des-entreprises--9782707194572-p-48.htm>

SKINNER W. (1969), “Manufacturing-Missing Link in Corporate Strategy”, *Harvard Business Review*, May 1, <https://hbr.org/1969/05/manufacturing-missing-link-in-corporate-strategy>

VERMOREL J. & VERDO Y. (2023), « Supply chain scientist : Nouveau métier, nouveau modèle économique ? », *Le journal de l’école de Paris du management*, 163(5), pp. 8-15, <https://doi.org/10.3917/jepam.163.0008>

VICARD V. (2024), *Faut-il réindustrialiser la France ?*, PUF.

# Les jumeaux numériques des systèmes

Par Albert BENVENISTE, Yves CASEAU,  
Nicolas DEMASSIEUX, Patrick JOHNSON,  
Catherine LAMBERT, Jean-Luc MOLINER,  
Sophie PROUST et Gérard ROUCAIROL  
Membres de l'Académie des technologies

Avec les concours de :

**Narendra AKHADKAR**  
Schneider Electric

**Alexis MERMET-GRANDFILLE**  
Atos

**Et Dominique VIGNON**  
Académie des technologies

*Cet article pourra faire l'objet d'une communication, éventuellement complétée, sous la forme d'un rapport de l'Académie des technologies dans son ensemble en 2025.*

Les jumeaux numériques ont pris une importance croissante dans l'industrie et certains services à forte valeur ajoutée, en particulier pour la productivité et l'innovation. Ils donnent lieu à des systèmes de plus en plus complexes, en interaction les uns avec les autres. Ce qui suit, résultant d'un travail collectif pour les appréhender, décrit leur genèse et raison d'être, les principaux secteurs dans lesquels ils sont utilisés, leurs applications et comment ils s'articulent avec d'autres technologies numériques, les problématiques de plateformes, de standards et d'écosystèmes qu'ils génèrent, des enjeux stratégiques auxquels ils sont confrontés. Une perspective futuriste est présentée à la suite des conclusions et recommandations de l'étude.

## MOTIVATIONS ET GENÈSE DES JUMEAUX NUMÉRIQUES

### Complexité, filières, écosystèmes

La conception de systèmes de plus en plus complexes (transports, énergie, santé, militaire...) fait intervenir, de manière croissante, à la fois des connaissances physiques, des données et des processus industriels multiples. Que cette complexité caractérise l'objet réalisé ou le système de production nécessaire à sa réalisation, sa représentation virtualisée a constitué dès les années 1980 un formidable levier d'innovation et d'organisation, conduisant à la fois à un puissant moteur de créativité et à une performance industrielle nouvelle<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> La NASA fait remonter au moins à Apollo XIII l'apparition *de facto* du concept, voir [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210023699/downloads/ASME%20Digital%20Twin%20Summit%20Keynote\\_final.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210023699/downloads/ASME%20Digital%20Twin%20Summit%20Keynote_final.pdf)

La maîtrise de la complexité a conduit à la constitution de filières de plus en plus larges, avec des acteurs divers, OEM (Original Equipment Manufacturer, le systémier), sous-traitants de premier niveau et autres sous-traitants, offreurs de services. La conception collaborative a connu un essor constant grâce au virtuel et a permis l'établissement de nouveaux équilibres entre tous ces acteurs.

Le cycle de vie de ces systèmes inclut un grand nombre de phases successives : conception ou découverte<sup>2</sup>, fabrication, opération et maintenance, décommission et recyclage.

Certaines de ces phases ont une importance croissante. La fabrication doit être optimisée et absorber la variabilité des intrants ; ce besoin est exacerbé par le rôle grandissant de la fabrication additive. De plus en plus de produits sont vendus, non pas en tant que tels, mais par des contrats assurant le service par le produit (*leasing*, heure de vol pour les moteurs en aéronautique, etc.) : ceci accroît l'importance de la maintenance. Finalement, la prise en compte des défis climatiques augmente l'importance du recyclage. Au-delà, la prise en compte de l'empreinte d'usage des produits, de leur recyclabilité ainsi que celle de leurs constituants amène à une nouvelle notion de cycle de vies multiples, où le virtuel permet de produire de multiples lignées dès l'origine de la première conception. Dans le secteur de la santé, le jumeau numérique apporte un grand nombre de révolutions ; à titre d'exemple, dans la pharmacie, les essais cliniques sur cohortes humaines peuvent être en partie remplacés par des essais cliniques sur cohortes virtuelles.

### **Standardisation, interopérabilité, lignes de produits**

Certains composants ou sous-systèmes peuvent servir, avec des variations réduites, dans des systèmes différents, voire dans des lignes de produits ou des secteurs différents, apportant ainsi une forme de passage à l'échelle *via* la standardisation, et structurant l'écosystème de la filière. L'émergence de d'architectures de référence pour les systèmes et certaines infrastructures devient un point clé.

Les écosystèmes des filières subissent des mutations profondes autour des points centraux que sont les OEM (*Original Equipment Manufacturer*). Les OEM reprennent la main sur les architectures systèmes et les repensent. Cela permet à des acteurs nouveaux d'offrir, non plus des composants ou sous-systèmes complets équipés de leur informatique et électronique, mais des services transversaux, architectures de calcul, de communication, architectures logicielles, qui peuvent être configurées pour piloter des assemblages variés de composants ou sous-systèmes.

Par exemple, 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...) étaient assemblés par le fabricant d'automobiles, à un monde où le fabricant devient un systémier 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 ou de nouveaux métiers apparaissent chez des sous-traitants de premier rang. Le besoin de standards se fait sentir.

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.

---

<sup>2</sup> Il s'agit en particulier de la découverte de médicaments en pharmacie.

## Le jumeau numérique (*digital twin*) : une représentation numérique partagée

Il y a donc des problématiques variées, avec des intervenants différents, mais il s'agit toujours du même système, qui évolue au cours de son cycle de vie. Pour faire face aux besoins de tous les acteurs du cycle de vie, le concept de jumeau numérique a été formalisé par la NASA dans les années 2000 et a été depuis adopté et mis en œuvre dans de très nombreux secteurs.

Un jumeau numérique est une représentation numérique d'entités et/ou de processus du monde réel, de fidélité plus ou moins grande selon les besoins, et synchronisée aux évolutions de l'objet réel à une fréquence plus ou moins grande. Cette représentation numérique du système est partagée entre les différents acteurs pour les différentes problématiques. Elle est construite en exploitant les connaissances sur le système et les données recueillies et, le cas échéant, analysées par le biais de l'Intelligence Artificielle (IA), connaissances et données qu'elle contribue à nourrir en retour.

Le jumeau numérique est le pivot indispensable qui permet, à chacun des acteurs différents, d'exercer son rôle dans le cycle de vie du système en intervenant sur la vue qui le concerne et au moment opportun.

Moins médiatique, sans doute, que l'Intelligence Artificielle, c'est un élément central pour de nombreux secteurs de la société dans le futur, un puissant atout dans une perspective de réindustrialisation et un levier pour la transition environnementale pour les raisons suivantes :

- les jumeaux numériques sont un puissant levier de compétitivité d'une filière en réduisant les coûts et erreurs liés aux échanges entre acteurs, en améliorant la qualité, en facilitant la formation ou la commercialisation ; ils contribuent à la constitution d'un capital intangible de savoir et savoir-faire des industriels ;
- les jumeaux numériques incorporent, formalisent et permettent de partager les connaissances clés des objets et processus industriels. Les données collectées autour de la vie du jumeau numérique deviennent une source majeure pour entraîner des IA industrielles, avec une connaissance de ce qui se passe dans le monde réel ;
- les jumeaux numériques permettent de simuler et d'optimiser des processus industriels complexes, d'étudier à moindre coût et sans prototypages ou expériences réelles des scénarios, des alternatives de conception ou d'exploitation ;
- en proposant une intégration multi-métiers, multi-disciplines (et également multi-échelles), les jumeaux numériques permettent également une recomposition et une modification de ces représentations techniques et scientifiques et donnent naissance à de nouvelles pratiques ;
- 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 ;
- enfin, ils permettent l'exploration des usages potentiels des produits et services, et, en ce sens, constituent un levier considérable pour une économie durable.

Le nom même de jumeau numérique renforce l'attractivité de la technologie auprès des jeunes ou futurs ingénieurs, comme l'illustre la dernière partie du présent document.

## LES SECTEURS D'APPLICATION

Commençons par une revue des principaux secteurs d'application, avec leurs motivations. 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.

### Secteur de référence : les systèmes critiques

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

#### *Transports : aéronautique, ferroviaire, automobile, naval*

Le cas de l'aéronautique est emblématique. C'est comme une 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.

L'usage fait par le secteur automobile est un peu différent, en raison de l'absence de process de certification. Le côté prudentiel de l'aéronautique ne s'y retrouve pas, mais en revanche, les jumeaux numériques y ont été utilisés très tôt, dès les années 2000, pour explorer l'espace de conception (*design space exploration*).

#### *Énergie : nucléaire, grids, réseaux de chaleur*

Le secteur de la production et de l'approvisionnement en énergie est confronté à des défis formidables liés à l'évolution des sources d'énergie, à la dégradation des infrastructures/systèmes, au besoin de protection des infrastructures critiques, et à l'instabilité du réseau en fonction de la charge. La gestion des charges et les dispositifs de protection jouent un rôle central pour satisfaire et assurer l'approvisionnement continu en énergie. Pour relever ces défis et permettre la maintenance prédictive et l'optimisation du réseau, les solutions de jumeaux numériques sont devenues une nécessité. Elles permettent aussi de réduire les délais et les coûts de développement de nouveaux produits. Les motivations et applications sont très diverses :

- Conception et développement de produits : un jumeau numérique est utilisé pour simuler et tester de nouvelles conceptions et fonctionnalités de produits, ce qui permet d'innover plus rapidement et de commercialiser de nouveaux produits plus fiables et plus efficaces.
- Qualité prédictive : un jumeau numérique est utilisé pour simuler des actifs physiques avant qu'ils ne soient assemblés et expédiés, garantissant ainsi la qualité du produit avant la livraison au client.
- Performances améliorées des actifs, réduction des coûts en optimisant les performances, diagnostic et prévention des pannes : des jumeaux numériques fournissent une représentation virtuelle des actifs physiques, permettant de surveiller, d'analyser et d'optimiser les performances des produits de gestion de l'énergie et de protection de l'alimentation en temps réel. Ceci peut conduire à une efficacité améliorée, à une réduction des temps d'arrêt et à de meilleures performances globales. En optimisant

les calendriers de maintenance et en améliorant la gestion des actifs, les jumeaux numériques peuvent réduire considérablement les coûts opérationnels.

- Surveillance et contrôle à distance : par une comparaison entre les prévisions du jumeau numérique et les données en opération, on peut surveiller et contrôler à distance les produits de gestion de l'énergie et de protection de l'alimentation. Ceci permet une prise de décision, un dépannage et des ajustements proactifs, sans nécessiter une présence physique sur le site de l'équipement.
- Conformité aux exigences environnementales : des jumeaux numériques aident à surveiller et à gérer les impacts environnementaux, à garantir le respect des réglementations et à réduire l'empreinte carbone.
- Gestion du cycle de vie : plus généralement, le jumeau numérique est utilisé pour suivre l'intégralité du cycle de vie d'un produit, de la conception et de la fabrication à l'exploitation et à la maintenance, fournissant ainsi des informations précieuses pour l'amélioration continue et les futures itérations de produits.

Les jumeaux numériques ont ainsi 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 grille (*smart grid*), 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. Par exemple 1) pour évaluer la possibilité de réduire la quantité de matière utilisée tout en garantissant la solidité mécanique et la résistance thermique d'un composant clé d'un produit ; 2) pour comparer la température attendue et la température mesurée d'un produit en fonctionnement ; 3) ou pour tester des stratégies de contrôle d'un réseau ou sous-réseau avant de les mettre en application.

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 "demande-réponse", c'est à dire l'offre d'une rétribution en échange d'une réduction de la consommation du client pendant une période de pointe. De tels modèles peuvent souvent être appris grâce à des données antérieures, mais restent entachés d'incertitude.

### *Pourquoi des jumeaux numériques pour ces secteurs ?*

La conception et la gestion de tout le cycle de vie des systèmes pour ces secteurs nécessite de maîtriser, depuis la conception jusqu'à la décommission et le recyclage en passant par la fabrication, l'exploitation et la maintenance, un nombre élevé d'aspects différents :

- 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...

Ces aspects sont tous essentiels. Leur examen fait partie intégrante de ce qu'examinent les autorités de certification. Or, ces aspects sont de nature différente, mais liés. Les maîtriser conjointement n'est possible que par le recours aux jumeaux numériques.

### *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. Le lecteur enthousiaste pourrait en déduire que les jumeaux numériques constituent un pilier central de la certification : il n'en est rien. Les principes de la certification des systèmes critiques sont : 1) c'est le système qui est certifié, plus que la façon dont on l'a conçu, 2) autant que la méthode utilisée, c'est sa totale documentation qui importe. 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, c'était le code objet qui devait être testé ; depuis, il suffit de tester le code source (autant que nous sachions, les autorités du nucléaire n'ont pas franchi cette étape). De même, le combat pour faire reconnaître des validations formelles de certains codes comme valant test, reste permanent. L'IA, de par le caractère fondamentalement statistique de sa démarche, reste encore bloquée en certification (d'où le projet IA de confiance<sup>3</sup> lancé par les industriels de certains secteurs critiques). 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 ?<sup>4</sup> 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.

### *Une barrière de compétitivité*

La maîtrise des jumeaux numériques est, pour les grands industriels de ce secteur des systèmes critiques, une des barrières à l'entrée de la concurrence. La difficulté de cette maîtrise est sans doute la protection majeure des grands industriels français et européens. La capacité à maîtriser ces techniques qu'ont nos générations d'ingénieurs issus du cursus français des grandes écoles est un atout.

---

<sup>3</sup> <https://www.confiance.ai/>

<sup>4</sup> Sous peine de périr d'une instabilité aéroélastique appelée flottement, à quoi aucun avion ne peut survivre.

## Autres secteurs

### *Les matériaux*

Le monde de demain, c'est à dire les réponses aux défis multiples du changement climatique, de l'épuisement des ressources et de la recherche d'un monde durable, sera inventé sous forme de simulations avec des jumeaux numériques, à des échelles multiples, et ce pour les raisons suivantes :

- La complexité des *process* et du monde est trop grande et l'espace des innovations possibles est trop vaste : l'énorme avantage de la simulation sur un jumeau numérique est à la fois le coût et le temps ; les simulations numériques sont paramétrables par essence et peuvent donc être parallélisées.
- Le monde de demain avec ses intrants issus du recyclage et des biomatériaux a besoin d'IA pour absorber les variations naturelles des caractéristiques physiques et chimiques des intrants : les premières expérimentations démontrent la capacité du *machine learning* (et du *renforcement 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.
- La résilience est une propriété fondamentale dans le XXI<sup>e</sup> siècle : préparer nos *supply chains* à résister à des crises de Covid, des événements climatiques majeurs ou des crises géopolitiques telles que nous venons de les voir, passe par des simulations sur des jumeaux numériques à grande échelle.

### *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 chaînes 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'intelligence générative) ont permis d'accélérer la proposition de nouveaux candidats médicaments et l'appréhension, via des expérimentations virtuelles, de leurs caractéristiques en termes d'efficacité, de sûreté, de rétro-synthèse 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<sup>5</sup>, 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

---

<sup>5</sup> Selon le site <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.

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).

Les jumeaux numériques ont un impact fort sur les chaînes de valeurs par le développement des CDMOs (*Contract Development Manufacturing Organisations*) en pharmacologie.

### *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 (SoS). 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 nom 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 avions avec la tâche dite de SLAM (*Simultaneous Localisation and Mapping*), qui consiste à effectuer le recalage permanent de l'avion 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 sous forme réelle. 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.

### *Environnement*

La Commission européenne a lancé une initiative phare pour développer un modèle numérique très précis de la Terre à l'échelle mondiale : Destination Earth (DestinE)<sup>6</sup>, afin de modéliser, surveiller et simuler les phénomènes naturels, les risques et les activités humaines qui y sont liées.

---

<sup>6</sup> <https://destination-earth.eu/>

Les utilisateurs de DestinE, y compris les experts non scientifiques, seront en mesure d'accéder et d'interagir avec de grandes quantités de données du système terrestre et socio-économiques :

- afin d'effectuer des simulations très précises, interactives et dynamiques du système terrestre, éclairées par de riches ensembles de données d'observation. Par exemple, en mettant l'accent sur des domaines thématiques d'importance sociétale tels que les incidences régionales du changement climatique, les risques naturels, les écosystèmes marins ou les espaces urbains ;
- pour améliorer les capacités de prédiction et en maximiser l'impact. Par exemple pour protéger la biodiversité, gérer l'eau, les énergies renouvelables ou les ressources alimentaires, et atténuer les risques de catastrophe dans un monde en mutation ;
- en exploitant le potentiel du calcul distribué et haute performance (HPC) et du traitement des données à une échelle extrême. Par exemple, grâce à une plateforme interactive qui hébergera des jumeaux numériques complexes et des boîtes à outils complètes pour développer et exploiter des modèles basés sur l'analyse, avec un accès complet à de grandes quantités de données diverses.

Les principaux composants du système DestinE sont les suivants :

- La plateforme de services de base fournit un point d'entrée convivial pour les utilisateurs de DestinE. La plateforme fournira des outils, des applications et des services de prise de décision fondés sur des données probantes, basés sur un système informatique en nuage ouvert, flexible et sécurisé.
- Le lac de données (Data Lake) rassemble les fonds de données européens préexistants de Copernicus, les fonds de données des trois entités de mise en œuvre de *Destination Earth* (ESA, EUMETSAT<sup>7</sup> et ECMWF<sup>8</sup>) et d'autres sources, telles que l'internet des objets (IoT) et les données socio-économiques. Il intègre également les nouvelles données qui proviendront des *digital twins*, créant ainsi un espace de données DestinE cohérent et autonome. Il donnera accès aux données nécessaires aux opérations des jumeaux numériques et de la plateforme de services de base. Et il hébergera les données des utilisateurs, partagées avec la communauté d'utilisateurs DestinE tout en prenant en charge le traitement des données proches afin de maximiser les performances et l'évolutivité du service.
- Les jumeaux numériques sont des répliques numériques des systèmes terrestres très complexes, développés par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF)<sup>9</sup>. Ils sont basés sur une fusion transparente d'observations en temps réel et de modélisation prédictive à haute résolution dans les domaines thématiques, à partir des événements extrêmes et de l'adaptation au changement climatique. L'objectif à long terme est d'intégrer des jumeaux numériques supplémentaires tels que sur les océans ou la biodiversité, créant ainsi un jumeau numérique complet du système terrestre. Les jumeaux numériques de DestinE fourniront aux utilisateurs un accès sur mesure à des connaissances de haute qualité pour le développement de scénarios spécifiques à l'utilisateur qui peuvent soutenir la prise de décision fondée sur des données probantes.

<sup>7</sup> <https://www.eumetsat.int/>

<sup>8</sup> <https://www.ecmwf.int/>

<sup>9</sup> <https://www.ecmwf.int/>

## JUMEAU NUMÉRIQUE : CE QUE C'EST

### En guise de définition

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 et pas plus fidèlement que nécessaire, l'état et le comportement de l'objet. Il constitue également un outil d'analyse, 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 données 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 recalibrer (par assimilation de données ou apprentissage).
- 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* : Interfaces de Programmation d'Application) appropriés.
- Le jumeau est un ensemble de modèles et d'interfaces virtuelles permettant de tester des scénarios 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 effectuer de test physique long, coûteux ou risqué. 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 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.

Dans ces deux dernières dimensions, le concept de jumeau numérique repose sur la modélisation et la simulation de l'objet ou du système, par exemple pour en explorer un grand nombre de variantes possibles lors de la conception, sans faire des prototypes en nombre. 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 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 dynamique. Les déclinaisons sont donc variées.

Mais avant 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, avec la montée en puissance de l'IA, il faut aujourd'hui adjoindre des données.

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

## Couvrir le cycle de vie

Dès qu'on a affaire à un système (ou gros sous-système) dans son ensemble, d'autres besoins apparaissent, tout au long du cycle de vie :

- Base de données des sous-systèmes et composants. 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.
- Architecture système. C'est la description (boîtes et flèches, bref du dessin avec quelques attributs) de la structure du système, décomposé en sous-systèmes et composants, de manière hiérarchique.
- Modèle dit fonctionnel. C'est une version encore un peu plus simplifiée de ce qu'on met dans le jumeau numérique. Ça 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.
- Scénarios d'utilisation (*use cases*). Ça décrit le fonctionnel vu de celui qui utilise le système. Il y a des formalismes de type scénarios pour ça (*message sequence charts*, etc.).

Les niveaux ci-dessus sont en général couverts par le monde SysML et les outils correspondants, et ils sont en général bien reliés (par hyperliens) au monde des *requirements* (exigences), constitué de :

- les exigences ;
- les tests pour vérifier, sur le système ou un modèle du système, si les exigences sont satisfaites.

En plus, il y a d'autres aspects importants :

- Analyse de sûreté (*safety*). C'est un peu l'analogue du jumeau numérique, mais pour la dimension *safety*. C'est aussi un modèle et il y en a différents types, plus ou moins simples ou puissants :
  - arbre de défaillance (le plus élémentaire et le plus fréquemment utilisé) ;
  - modèle à chaînes de Markov en interaction.
- Analyse de cybersécurité ou de « cyber-vulnérabilité ». C'est la contrepartie de la *safety* concernant la cybersécurité.
- Analyse de performance énergétique ou de performance temporelle. Pour savoir, par exemple, quel composant du système est le goulot d'étranglement. Cet aspect est certainement prospectif (surtout l'énergie) mais ça pourrait devenir important dans le futur, jusqu'à couvrir des tickets carbone si une TVA carbone voit le jour.

## Divers niveaux de modélisation, *digital continuity*

Tous les jumeaux numériques offrent différents niveaux de modélisation, d'où découle le besoin de continuité numérique (*digital continuity*), détaillé plus loin.

Si l'on considère le jumeau en tant qu'ensemble de données reflétant l'état présent et l'histoire du système physique, il faut garantir que les évolutions du système physique sont bien reflétées par le jumeau. Ceci est facilité par l'utilisation du jumeau en tant qu'intermédiaire dans l'administration du système. Mais pour certains changements (par

exemple, le déplacement d'un objet), des procédures doivent être mises en place pour assurer la mise à jour du jumeau.

Pour le cas des systèmes qui correspondent à des produits, il y a plusieurs niveaux de modélisation que l'on peut classer comme suit, sans trop entrer dans les détails.

### *Modèle physique détaillé*

Modélisation physique et multi-physique, en général par EDP (Équation aux Dérivées Partielles). Ces modèles sont utilisés depuis longtemps : mécanique, aérodynamique, thermique, etc. et leur couplage.

### *Modèle condensé (surrogate)*

Ça se rapproche du niveau précédent. Il s'agit, si on reste en EDP, de réduire le nombre de mailles. Ou bien de condenser le modèle par des méthodes d'analyse numérique. 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*

Central pour le futur du MRO (opération et maintenance conditionnelle) et le *health monitoring* et le CND (contrôle non destructif). Mais aussi pour la fabrication. Penser à la fabrication additive, qui utilise les modèles deux fois : pour la conception de la pièce et la satisfaction des objectifs de performance mécanique et autre, mais aussi pour la fabrication où la calibration de processus de fabrication demande une mise au point s'appuyant sur des données et des 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.

Les niveaux suivants sont manipulés par une autre population, d'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).

### *Modèle physique simplifié*

Ce sont des modèles 0-D (de type ODE et non pas EDP), utilisés par les automaticiens pour concevoir leurs contrôles ; ils doivent 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 multi-physiques sous forme de lois macroscopiques).

Il y a une vraie difficulté de naviguer entre ces différents niveaux : le passage de l'un à l'autre n'est ni systématique, ni automatisable en général (on sait le faire dans des cas particuliers rares). C'est ce que l'on désigne sous le nom de « continuité numérique » (*digital continuity*).

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.

Tous ces modèles ont en général besoin d'être qualifiés du point de vue des incertitudes : signaux bruités, incertitudes du modèle. Il existe un lien avec les données et l'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.

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<sup>10</sup>, 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 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. Et c'est une problématique que l'on rencontre aussi dans les jumeaux numériques pour les villes (*smart cities*)<sup>11</sup>.

## Combiner modélisation physique et IA

L'IA permet à la fois de modéliser des comportements pour faire des jumeaux numériques plus complexes, et de résoudre des problèmes de conception et d'amélioration des performances, par exploration et optimisation :

- Accélération des performances : *cf.* IA hybride chez Michelin lorsque le *machine learning* permet de converger plus vite, et surtout d'explorer plus vite (capacité prédictive). L'utilisation de réseaux neuronaux permet de prédire les résultats et les performances de façon approximative (par construction) mais suffisamment précise pour aider à diriger les domaines à explorer (tout comme un oracle dans un algorithme de *branch and bound*).
- Modèles "at scale", au plus juste : combiner la modélisation *data-driven* et la simulation fondée sur les principes de la physique permet de faire des modèles plus riches et plus efficaces. Il ne faut pas opposer ces deux approches.
- Hybridation avec l'IA générative : Les modèles de type LLM (*cf.* chatGPT) peuvent en fait générer toutes sortes de scripts, pas seulement du langage naturel mais également des objets et des scènes 3D. De la même façon, *l'input* n'est pas simplement un texte mais peut être multimodal (texte, image, son). La capture de modèles 3D d'ilots machine ou d'usines complètes à partir d'images de caméras ou de captures LIDAR (qui se sont démocratisées) révolutionne l'utilisation des jumeaux numériques dans l'industrie manufacturière.
- Le couplage fort du réel et de son jumeau est un enjeu important de maîtrise technologique. Les jumeaux numériques ont le plus souvent été entraînés avec des données réelles pour calibrer des simulations qui sont jouées ensuite. Il est possible, sous certaines conditions, de faire cette opération en boucle continue pour que le jumeau numérique soit un outil de pilotage du réel :
  - On peut de la sorte distinguer : 1) les jumeaux numériques à froid qui permettent à travers la simulation, la prévision et l'optimisation, de réinventer et améliorer

<sup>10</sup> Voir par exemple <https://www.inria.fr/fr/jumeau-numerique-coeur-dossier-sante-innovaheart>

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

l'efficacité des procédés ; 2) les jumeaux numériques à chaud, dont les algorithmes de simulation fondés sur l'IA peuvent servir de système de contrôle en temps réel.

- Dans le modèle « à chaud » (rebouclé), le modèle numérique s'enrichit en continu des informations du monde réel, tandis que le processus réel, constitué de robots et d'objets connectés est optimisé en temps réel par un logiciel (qui s'appuie sur le modèle numérique). On retrouve les enjeux d'ingénierie système (MBSE) dont l'importance en termes de compétitivité a été soulignée dans les rapports précédents de l'Académie.

## Le métavers industriel

C'est une technologie du présent qui évolue constamment. Le métavers des jeux est en plein essor depuis des années, son développement entraîne celui du métavers industriel, même si le métavers commercial 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). Les jumeaux numériques des procédés de fabrication permettent à la fois de tester les performances attendues mais également de vérifier l'ergonomie et la praticité des opérations de maintenance.

## ***Low-code/no-code :*** **importance et difficultés**

### *Importance du 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 maîtrise 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 maîtriser. Pour beaucoup d'entre eux (et en France, on peut en particulier citer EDF et le secteur aéronautique), des jumeaux numériques ont été développés « à la main » avec des efforts conséquents demandant un savoir-faire acéré. Des éléments de plateforme ont même été développés permettant une réutilisation sur plusieurs projets.

Mais s'en tenir à ce type d'approche limite considérablement la pénétration de la technologie des jumeaux numériques dans des secteurs plus larges de l'activité économique. Cet obstacle concerne tout particulièrement les PME. Il explique en grande partie la faible pénétration des jumeaux numériques en France, largement limitée aux grands comptes disposant en interne d'une maîtrise 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* ?

- La possibilité de construire des modèles de système à coût réduit (sans maîtrise de la technologie de modélisation), ouvrant ainsi la technologie des jumeaux numériques à un panel élargi d'utilisateurs ;
- L'infrastructure pour bâtir un marché du jumeau numérique, dans lequel, au sein des chaînes 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 ? 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.

### Difficultés du low-code/no-code<sup>12</sup>

#### Une petite digression didactique

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

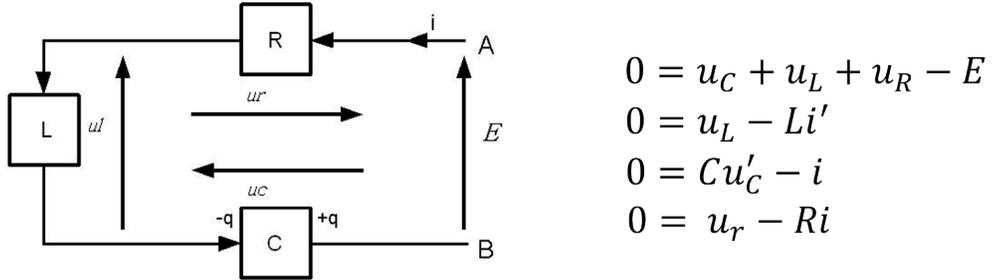


Figure 1 : Circuit RLC (Source : auteurs).

La figure 1 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 première et seconde. 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 connaît 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 dans les années 1970 avec le logiciel Spice pour les circuits électriques, puis, pour les systèmes multi-physiques, depuis les années 1980 par les automaticiens, avec d'abord la

<sup>12</sup> En plein essor, le développement *no code* promet une programmation sans saisir une ligne de code grâce à des outils graphiques gommant la complexité des langages de programmation. Le *low-code* consiste à compléter un environnement no code de possibilités d'éditer en parallèle le code source de l'application.

proposition des *bond graphs*<sup>13</sup>, puis de la modélisation à base de DAE<sup>14</sup> (*Differential Algebraic Equations*) au lieu des ODE habituelles. Ceci a donné naissance à Modelica (standardisé en 1996 pour sa V1), un standard de langage permettant la spécification de modèles multi-physiques avec la réutilisation de modèles, et prenant en charge la génération de code de simulation.

### Le cas Modelica

Pour les modèles possédant un état de dimension finie (les modèles aux éléments finis ne sont donc pas couverts), Modelica apporte une réponse pour le *low-code/no-code*, sous la forme d'une programmation graphique où les modèles sont simplement assemblés.

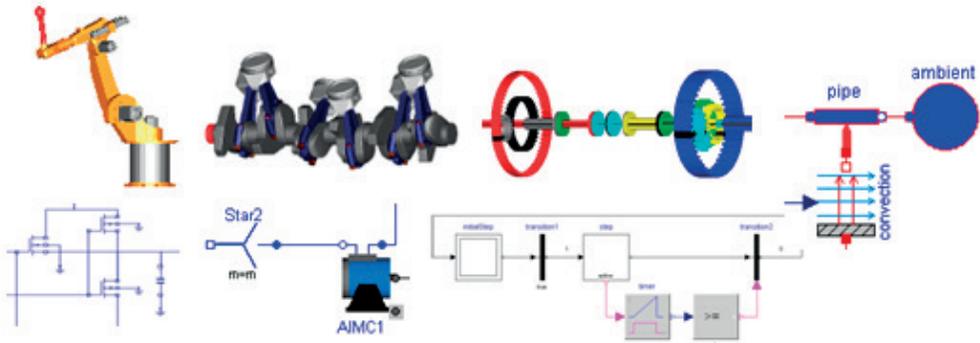


Figure 2 : Les différents modèles Modelica (Source : cf. note de bas de page 15).

Ainsi, la Figure 2 ci-dessus<sup>15</sup> 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'intéresse à un contexte physique particulier, une architecture ayant l'apparence d'un système physique complexe ; tous ces modèles partagent le même type de représentation textuelle, standardisée. 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 intimement des savoir-faire mathématique et informatique.

<sup>13</sup> THOMA J. (1975), *Bond graphs: introduction and applications*, Elsevier Science, ISBN 0-08-018882-6, 192 pages.

<sup>14</sup> 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.

<sup>15</sup> <https://github.com/modelica/ModelicaStandardLibrary/raw/master/Modelica/Resources/Images/UsersGuide/ModelicaLibraries.png>

## PLATEFORMISATION, STANDARDS, ÉCOSYSTÈMES

### Plateformes : de quoi s'agit-il ?

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

#### *Plateformes intégrant les services requis pour les jumeaux numériques*

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 (*low-code/no-code*) 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 3DEXPERIENCE<sup>16</sup> de 3DS, Xcelerator<sup>17</sup> de Siemens, et Ansys Twin Builder<sup>18</sup>.

#### *Frameworks de modélisation*

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<sup>19</sup>. Modelica est un standard pour un langage de modélisation de systèmes multi-physiques pouvant, additionnellement, supporter la modélisation du logiciel attaché. Il en existe une implémentation open source, OpenModelica, et plusieurs implémentations commerciales (dont une dans 3DEXPERIENCE). Dans un créneau très proche se situent aussi Simscape/Simulink 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 graphique d'assemblage de sous-modèles. Y sont attachés des écosystèmes de boîtes à outils, voir ci-après.

<sup>16</sup> <https://www.3ds.com/fr/3dexperience> : « Découvrez comment l'utilisation d'une plateforme 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 ».

<sup>17</sup> <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".

<sup>18</sup> <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".

<sup>19</sup> <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 second exemple concerne la modélisation de *workflows* d'entreprises ou inter-entreprises, éléments clés pour les processus de suivi du cycle de vie d'un système. Le standard pour ce type de modélisation est BPMN (*Business Process Model and Notation*<sup>20</sup>), un modèle d'obédience des réseaux de Petri. BPMN est un standard qui est supporté par plusieurs plateformes.

### *Plateformes plus génériques : données, IA, cloud*

Les jumeaux numériques sont concernés par d'autres types de plateformes, plus génériques : les infrastructures *cloud*, de partage de données, les infrastructures d'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*.
- Les 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). En revanche, tous ces outils et *frameworks* sont aujourd'hui incontournables dans les grandes plateformes dédiées aux jumeaux numériques (3DS, Siemens...).

### *Caveat*

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

## Quels standards ?

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

- Nous avons des standards pour certains des langages de modélisation évoqués ci-dessus (Modelica, BPMN...).

---

<sup>20</sup> <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".

- Nous avons aussi des standards d'interconnexion (ou d'interopérabilité). Le standard FMI/FMU<sup>21</sup> pour l'interconnexion de jumeaux numériques à des fins de cosimulation en est un exemple important, soutenu et suivi par quelques grands éditeurs.
- Les jumeaux numériques sont aussi concernés en général par les standards contribuant à l'interopérabilité, nous ne développons pas plus ce point.

## Écosystèmes

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

### *Les grands éditeurs*

Nous en avons cité quelques-uns : 3DS et Siemens en Europe, Ansys et Mathworks aux États-Unis. 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'outils de positionnement 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<sup>22</sup> en est un exemple.

### *Les développeurs de solutions 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.

---

<sup>21</sup> <https://fmi-standard.org/>

<sup>22</sup> Voir le bandeau « Solutions » sur le site <https://www.se.com/fr/fr/>

## QUESTIONS ET ENJEUX STRATÉGIQUES

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

### Les enjeux de la maîtrise des jumeaux numériques à grande échelle

La maîtrise des jumeaux numérique à grande échelle est un atout compétitif majeur pour la réalisation des grands systèmes de demain (*manufacturing*, énergie, urbains, etc.). Les jumeaux numériques sont composables et peuvent s'assembler en systèmes de systèmes. Il faut donc penser interfaces (API, protocoles, lois de composition), architecture modulaire (*twins composables*), plateforme (il faut souligner l'atout que représente Dassault Système) et écosystème (tout le monde ne peut pas tout faire, c'est même le contraire : les grands manufacturiers comme Michelin ont besoin de faire du judo avec les compétences de simulation de leurs partenaires) :

- C'est nécessaire pour réaliser des grands systèmes : ingénierie modulaire des jumeaux. Les jumeaux de SoS (*Systems of Systems*) sont multi-échelle par définition.
- Le sujet de la "digital continuity" est essentiel ; c'est le sujet le plus important de l'accélération du Digital Manufacturing, et donc un enjeu de compétitivité pour la France.
- C'est nécessaire à cause de la nécessaire collaboration en entreprise étendue : le jumeau numérique est 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.
- L'Europe doit développer une vision écosystème, autour d'acteurs majeurs qui jouent le rôle de plateformes et d'acteurs innovants qui développent des nouveaux composants. La distribution de l'intelligence (le *machine learning* dans les moteurs, les robots élémentaires ou les caméras) signifie que la coordination globale est plus complexe – on ne pilote pas de la même façon des éléments passifs et actifs. La coordination d'un réseau hiérarchique de systèmes de systèmes intelligents nécessite des *digital twins*. Ce point est critique. À l'ère de l'économie de plateforme, on comprend que des plateformes qui permettent la génération de *digital twins* ainsi que leur opération constituent les socles stratégiques des filières industrielles.

### Une difficulté centrale : assurer la continuité numérique

La conception, la mise en place et le maintien en bon état d'usage d'un jumeau numérique nécessitent un investissement :

- Le coût correspondant peut dépasser les avantages attendus. Il est donc nécessaire de savoir évaluer l'intérêt d'un projet et le bon niveau de modélisation à mettre en œuvre.
- Les procédures mises en œuvre pour assurer les mises à jour du jumeau peuvent sembler inutilement complexes à certains acteurs. D'où le besoin de partager une bonne compréhension de leur raison d'être et des gains qui en sont attendus.
- Les données nécessaires au bon fonctionnement du jumeau numérique peuvent provenir de différentes sources, appartenir à et être maintenues par des acteurs différents, avec qui il est nécessaire de s'entendre, en termes de propriété, de droits d'accès, et éventuellement de modèle de financement.

- Comme pour tout système d'acquisition de données et de contrôle, la protection des données et la cybersécurité sont des enjeux importants. La pollution des données au niveau du jumeau numérique a un impact direct sur la fiabilité des fonctions auxquelles son exploitation contribue. Et la sécurité des APIs est cruciale dès lors que le jumeau est utilisé comme un intermédiaire pour l'administration et le contrôle du système.

Dans ce qui suit, le terme « synchroniser » signifie « mettre en cohérence », pour assurer la *digital continuity*.

### *Dans les phases amont de la conception : synchroniser*

Le jumeau intègre de multiples vues sur le même objet (le « système », même s'il est vu 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) :

- architecture système (ou organique) ;
- architecture fonctionnelle ;
- cas d'usage (*use cases*) ;
- sûreté (*safety*) ;
- cyber-vulnérabilité.

Quand le concepteur modifie les use cases ou le fonctionnel, il peut impacter la sûreté (*safety*) et vice-versa : 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 (hyperliens) afin de minimiser les interventions manuelles sur les autres vues pour rétablir la synchronisation.

### *Dans l'entreprise étendue : synchroniser*

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 maîtrise 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) ;
- partager et synchroniser des jumeaux numériques.

### *Modélisation système et jumeau numérique : synchroniser*

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. C'est certainement le cas des intérieurs cabine, les câblages, mais peut-être le faites-vous 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 *health monitoring* ;
- ou concevoir le contrôle de chacune des variantes de la ligne de produits.

Le standard SysML<sup>23</sup> 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 jumeau numérique.

### *Assurer la continuité numérique est un métier*

C'est comme dans un montage électrique ou de plomberie : il faut 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 avoir ça en tête, il peut aussi être utile d'encadrer ça. Par exemple en remontant dans les modèles SysML des informations de typage des interfaces, dont la mathématique est issue des modèles de jumeaux numériques sous-jacents.

Il y a des cas plus ennuyeux. 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.

Et il y a encore d'autres chausse-trappes...

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 associées aux composants. C'est le seul moyen d'éviter qu'une plomberie bricolée 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.

## Barrières technologiques

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

Pour les secteurs « séniors » sur cette technologie, 40 ans d'investissements et d'expérience<sup>24</sup> 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 plateforme 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-3D, à partir de quoi 3DS a construit sa croissance.

---

<sup>23</sup> <https://www.uml-sysml.org/sysml/>

<sup>24</sup> 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.

- 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 manufacturier et de la défense. Pour les secteurs santé et ville/mobilité, la plupart des technologies de modélisation mises au point pour le 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.

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 constitué 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. D'ailleurs, le recours à l'IA dans la construction et l'utilisation des jumeaux numériques est, pour l'essentiel, combiné au calcul, 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 considérer que les jumeaux numériques constituent une technologie clé, et vouloir s'assurer une souveraineté sur cette technologie. 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 inter-entreprises. Mais la barrière technologique que représente l'usage et la maîtrise des jumeaux numériques n'est pas si considérable (grâce, précisément, au *low-code/no-code*). Aussi l'usage et la maîtrise des jumeaux numériques peut 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.

## Quid des verrouillages par les fournisseurs (“vendors lock-in”) ?

La situation sur ce point est mitigée :

- Grâce aux standards dont nous avons parlé, des avatars open source de certaines plateformes de modélisation existent (OpenModelica<sup>25</sup>, Scilab<sup>26</sup>,...). 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 d’une plateforme de qualité pour les jumeaux numériques.
- L’IA renforce encore cette difficulté, car les solutions IA reposent souvent sur des savoir-faire cachés et propriétaires.

## La France et l’UE dans la compétition internationale

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. Par exemple, sur la foi d’informations provenant de Schneider Electric :

- « EcoStruxure Machine Expert Twin<sup>27</sup> » est une solution logicielle (Schneider Electric) de jumeau numérique évolutive pour gérer l’ensemble du cycle de vie des machines. Ce logiciel permet aux fabricants d’équipement d’origine (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. Au-delà des gains en temps et coût de conception et de mise en service, l’utilisation de la solution permet d’améliorer la qualité, la taille, l’efficacité énergétique et l’empreinte carbone des machines.
- Dans le domaine de la distribution électrique, le logiciel ETAP (Schneider Electric) est utilisé pour concevoir, opérer et contrôler *via* un jumeau numérique des réseaux électriques locaux. Le service associé « EcoConsult Electrical Digital Twin<sup>28</sup> » consiste à numériser le schéma « unifilaire » du client à l’aide du logiciel ETAP et à fournir une assistance continue à la maintenance du modèle. Il contribue à réduire les coûts d’investissement et d’exploitation, à améliorer la sécurité et la fiabilité, à réduire les temps d’arrêt et à garantir la conformité réglementaire en maintenant l’architecture du système électrique à jour.
- Le « Grid Digital Twin<sup>29</sup> », solution de jumeau numérique de réseau, aide les services publics à surmonter les défis liés aux données en permettant une gestion efficace des

---

<sup>25</sup> <https://openmodelica.org/>

<sup>26</sup> <https://www.scilab.org/>

<sup>27</sup> <https://www.se.com/fr/fr/product-range/97196554-ecostruxure-machine-expert-twin/#products>

<sup>28</sup> <https://www.se.com/fr/fr/product-range/108356464-ecoconsult-electrical-digital-twin/#products>

<sup>29</sup> <https://www.se.com/ww/en/work/campaign/grid-digital-twins-guide/>

données du réseau, révélant un large éventail de valeurs et améliorant la fiabilité et l'efficacité du réseau.

- Dans le domaine de la conception et de la conduite optimisée de processus industriels, AVEVA<sup>30</sup> fournit des solutions de création et d'intégration de jumeaux numériques, avec des applications à chaque étape du cycle de vie, de la conception et la construction à l'exploitation et la maintenance.
- 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. Il aidera les équipes de conception à effectuer des analyses de type "what if" pour évaluer l'impact des modifications de conception sur l'empreinte carbone, le coût, les délais de mise sur le marché et la fabricabilité. Les scénarios de simulation de conception incluront des matériaux alternatifs, une intelligence artificielle générative d'options de conception, et une évaluation de l'impact environnemental de la fabrication.

### *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<sup>31</sup>.

Suivant un positionnement analogue, Siemens propose la plateforme Xcelerator<sup>32</sup>, 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).

---

<sup>30</sup> <https://www.aveva.com/fr-fr/>

<sup>31</sup> 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, le développement, et les tests cliniques pour plus de 70 % des nouveaux médicaments, ainsi que dans la conception et fabrication de plus de 50 % des équipements médicaux.

<sup>32</sup> 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.*

Les États-Unis disposent de deux majors avec Ansys (Sinopsys) et sa plateforme Ansys Twin Builder<sup>33</sup>, et Mathworks avec son environnement Matlab/Simulink<sup>34</sup> enrichi de l'outil Simscape<sup>35</sup>. 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<sup>36</sup>, 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.

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### Pour une science de la représentation

Les jumeaux numériques ont deux ambitions :

- représenter de manière intégrative les produits, services et objets de la société ;
- 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 :

- Mathématiques : analyse numérique et calcul scientifique (simulations, *surrogate models*, continuité numérique, HPC), formalisation et représentations géométriques, topologiques et multi-dimensionnelles.
- Modèles multi-disciplines et multi-échelle : pour les produits, pour les matériaux, pour le vivant. C'est sur cette science que repose la construction de représentations métiers, modèles représentant les objets à des échelles et résolutions différentes ; la question est de comprendre comment ces échelles sont reliées.
- *Machine learning* sous diverses formes (*deep learning*, mais aussi recalage de modèle, assimilation de données) ; et pour l'apprentissage boîte-noire (dont le *deep learning*) avec l'élément prégnant de l'explicabilité, que, justement, les modèles ci-dessus permettent d'adresser.
- Génie systèmes complexes et génie logiciel : plateformes, combinaisons de formalismes, standards, données, aide à la navigation au sein de tout cela.
- Frontière entre génie logiciel et les mathématiques ; pour les formalismes de modélisation par exemple, dont l'étude requiert un recours non-trivial aux deux ; pour la modélisation des systèmes dits cyber-physiques qui combinent un système physique et son informatique associée embarquée sur une architecture de calcul.

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 pour la reconnaissance d'une science et d'une ingénierie de la représentation (*depiction science, representation science, representation engineering...*).

---

<sup>33</sup> <https://www.ansys.com/products/digital-twin/ansys-twin-builder>

<sup>34</sup> <https://fr.mathworks.com/discovery/digital-twin.html>

<sup>35</sup> <https://fr.mathworks.com/products/simscape.html>

<sup>36</sup> <https://www.ibm.com/fr-fr/products/systems-design-rhapsody>

## Accompagner le développement de cette technologie et sa pénétration

### *Élargir la population d'utilisateurs des jumeaux numériques (PME...)*

Nous avons vu que le domaine des jumeaux numériques est riche d'une multiplicité de formalismes et de techniques, dont beaucoup sont difficiles d'accès pour une maîtrise 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 maîtriser. Pour beaucoup d'entre eux (et en France, on peut en particulier citer EDF, 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, largement limitée aux grands comptes disposant en interne d'une maîtrise approfondie de ses différents piliers technologiques et scientifiques.

Nous avons vu dans la sous-partie intitulée « *Low-code/no-code* : importance et difficultés » 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.

### *Favoriser le développement d'un marché du jumeau numérique*

Un autre objectif important qui créerait une révolution est de bâtir un marché du jumeau numérique, dans lequel, au sein des chaînes 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.

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.

### *Lancer un projet expérimental fédérateur*

#### La proposition

L'échelle de réflexion utile pour la R&D pourrait être la Ville et/ou une grande conurbation qui rassemblent suffisamment de modèles numériques différents devant coopérer pour être un chantier définissant des modes de coopération, des interfaces ouvertes et des passages à l'échelle significatifs en termes de complexité et de variabilité.

Les jumeaux numériques peuvent en effet jouer 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 pourrait donc soutenir 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<sup>37</sup>.

### La question du choix

Deux possibilités : la ville (en effet) ou un aspect de la santé.

## Quels verrous, quelles recherches ?

Comme il a été dit, tout progrès réalisé dans l'un des sujets listés dans la sous-partie intitulée « Pour une science de la représentation » bénéficie aux jumeaux numériques. Mais d'autres sujets, liés à la conclusion de cette sous-partie, ainsi qu'aux objectifs énoncés dans les sous-sous-parties précédentes intitulées « Élargir la population d'utilisateurs des jumeaux numériques (PME...) » et « Favoriser le développement d'un marché du jumeau numérique », émergent : nous les développons ici.

### *La quête du low-code/no-code*

Nous avons vu, à la sous-partie intitulée « *Low-code/no-code* : importance et difficultés » le rôle du *low-code/no-code* dans la satisfaction des objectifs énoncés dans les sous-sous-parties intitulées « Élargir la population d'utilisateurs des jumeaux numériques (PME...) » et « Favoriser le développement d'un marché du jumeau numérique », ainsi que les verrous scientifiques qui y sont associés.

Un exemple intéressant à imiter et élargir est celui du standard Modelica<sup>38</sup> et de son écosystème de fournisseur de boîtes à outils de modèles spécialisés : Modelon<sup>39</sup>, Modeliconseil<sup>40</sup>, Claytex<sup>41</sup>, en sont quelques exemples (il y en a d'autres), voir aussi la page *libraries*<sup>42</sup> 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 multi-physiques<sup>43</sup>. Dans ce secteur du service au-dessus de Modelica et des écosystèmes correspondants, les forces principales au sein de l'UE se trouvent dans les pays du Nord, la France étant quelque peu sous-dotée.

Il faut donc :

- élargir la base technique couverte par le *low-code/no-code* ;
- approfondir et améliorer ces approches lorsqu'elles existent ;
- favoriser le développement d'écosystèmes de sociétés offrant bibliothèques et services.

---

<sup>37</sup> À noter que dans cet esprit le programme de recherche Horizon Europe a lancé en 2021 une mission « Villes intelligentes et neutres en carbone », <https://www.horizon-europe.gouv.fr/mission-villes-intelligentes-et-neutres-en-carbone-30228>

<sup>38</sup> <https://modelica.org/>

<sup>39</sup> <https://modelon.com/modelon-library-suite-modelica-libraries/>

<sup>40</sup> <http://www.modeliconseil.com/services/>

<sup>41</sup> <https://www.claytex.com/services/>

<sup>42</sup> <https://modelica.org/libraries/>

<sup>43</sup> 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 composants 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.

Un objectif important 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 sujet difficile, de nature profondément différente (apprentissage distribué et décentralisé). Il s'agit alors, non pas tant d'offrir du *low-code/no-code*, que de décomposer l'apprentissage pour gagner en taille.

### *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 compagnies 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 de 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 présenté le MBSE, 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 de ces formalismes se pose alors. Les dimensions collaboratives des plateformes centrées sur les jumeaux numériques apportent des pratiques et standards de coopération 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, l'engagement d'un client.

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

## 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 14 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 au vert, 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 1 000 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 15 000 m<sup>2</sup> 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 1 000 milliards de contraintes ne seront pas plus détaillés. Quelques itérations ont été nécessaires, mais cela fait maintenant l'équivalent de 10 ans que Munich (numé-

rique) 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 ans 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 équivaldrait 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 ?

# L'industrie du futur : 10 ans de plans français et comparaisons internationales

Par **Betina JANNETEAU**

Cheffe de projets Industrie du futur au service de l'industrie  
de la direction générale des Entreprises

Si le rôle de la numérisation de l'industrie comme une des réponses aux défis posés au secteur industriel semble aujourd'hui généralement accepté, l'enjeu est désormais de faire en sorte que l'ensemble du tissu industriel puisse être modernisé pour réduire la polarité croissante entre grands groupes, et PME et ETI. Afin d'y répondre, de nombreuses actions de sensibilisation, de financement, de formation, de soutien à l'offre de solutions françaises ont été menées ces dix dernières années.

Elles ont conduit à des résultats encourageants avec, par exemple, une densité robotique industrielle passant de 132 robots pour 10 000 employés en 2016 à 180 en 2022. Néanmoins, un retard structurel subsiste par rapport à nos concurrents étrangers directs. Avec les gains de productivité qui seront permis par l'intelligence artificielle nous nous trouvons à un moment charnière dont il faut saisir l'opportunité pour que ses usages bénéficient à l'ensemble de l'industrie française.

## L'INDUSTRIE DU FUTUR, UNE RÉPONSE AU DÉFI DE RELANCE DE L'INDUSTRIE FRANÇAISE

### Depuis 2016, une dynamique de réindustrialisation encore fragile

Le mouvement de désindustrialisation qui a eu lieu entre la fin des années 1970 et les années 2010 a vu la part de l'industrie dans le PIB national passer de 17 % en 1995 à 11 % en 2016. Depuis 2016, un mouvement de réindustrialisation s'est amorcé avec plus d'usines ouvertes que fermées, en témoigne la création de 130 000 emplois, ou encore la première place de la France en Europe pour les investissements étrangers. Depuis 2017 on dénombre plus de 600 ouvertures nettes d'usines ; selon le baromètre industriel de l'État réalisé par la DGE<sup>1</sup> il y a eu 176 créations nettes de sites industriels en 2022, et 201 en 2023. La part de l'industrie dans le PIB français est restée stable malgré les différentes crises depuis 2020. Néanmoins, des progrès sont encore possibles pour renforcer ce renouveau industriel.

---

<sup>1</sup> Direction générale des Entreprises (2024), « Baromètre industriel de l'État », <https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/communique-presse/1702-barometre-industriel-de-letat-mars-2024.pdf>

## **L'industrie du futur, une des réponses aux enjeux économiques, sociaux et environnementaux auxquels fait face l'industrie**

Pour poursuivre le mouvement de réindustrialisation, l'industrie française doit répondre à plusieurs défis économiques, sociaux et environnementaux.

L'industrie du futur constitue une des réponses à l'ensemble de ces défis. En ce qui concerne la productivité et la compétitivité, l'automatisation des processus de production et de contrôle permet un gain de productivité important et une réduction des coûts opérationnels. Selon l'étude du BCG sur la compétitivité-coût de septembre 2023, les efforts de modernisation entrepris depuis 2018 ont joué un rôle prépondérant dans le passage de la France devant l'Allemagne en termes de compétitivité-coût<sup>2, 3</sup>.

Par ailleurs, l'industrie du futur peut également répondre à des enjeux sociaux dans l'industrie comme la pénibilité au travail, par exemple grâce à l'automatisation de tâches répétitives ou de manutention. Elle peut aussi avoir un effet d'attractivité pour les métiers industriels, notamment auprès des jeunes, grâce à l'utilisation des nouvelles technologies. Aussi, elle permet de pallier des difficultés de recrutement sur certains métiers en tension grâce à l'automatisation de certaines tâches.

Enfin, en prolongeant la durée de vie des machines grâce à la maintenance prédictive, en réduisant la quantité de matière première utilisée grâce à l'optimisation de procédés ou en réduisant la consommation énergétique grâce à un pilotage intelligent par la donnée, l'industrie du futur tient toute sa place dans la transition écologique.

## **UNE PRISE EN COMPTE DE CES POSSIBILITÉS BIEN ANCRÉE DANS L'ESPRIT DES DÉCIDEURS AVEC 10 ANS DE PLANS POUR L'INDUSTRIE DU FUTUR**

Les possibilités offertes par l'industrie du futur sont désormais bien connues et ont conduit les gouvernements successifs à mettre en place différents plans, pilotés par la direction générale des Entreprises, pour encourager l'adoption et le développement de technologies 4.0. Le premier plan a été lancé en 2013 avec le plan Usine du Futur, un des 34 plans de la Nouvelle France industrielle. Une seconde phase de ce plan a été lancée en 2015 en capitalisant sur les acquis de ce dernier concernant le développement et le déploiement des technologies. Ce plan a également approfondi de nouveaux aspects tels que la formation, la normalisation et la coopération internationale<sup>4</sup>.

En 2018, le soutien à l'industrie du futur s'est poursuivi par le plan « Transformer notre industrie par le numérique » qui visait à accompagner 10 000 PME supplémentaires dans leur transformation, à renforcer le soutien à l'investissement avec un nouveau dispositif de suramortissement de 40 % pour les dépenses de robotisation et numérisation, la création de plateformes numériques de filière et les plateformes d'accélération vers l'industrie du

---

<sup>2</sup> Boston Consulting Group (2023), "Harnessing the tectonic shifts in global manufacturing", <https://www.bcg.com/publications/2023/harnessing-tectonic-global-shift-in-manufacturing>

<sup>3</sup> Quiret M. & Renaud N. (2023), « Compétitivité : l'usine France remonte la pente », *Les Échos*, 28 septembre 2023.

<sup>4</sup> Faure P. & Darmayan P. (2016), « Le plan français Industrie du futur », *Annales des Mines – Réalités industrielles*, novembre 2016, pp. 57-60.

futur. L'accompagnement financier pour l'équipement a été renforcé dans le plan France Relance avec un guichet de subventions ouvert en 2020 et 2021, doté d'une enveloppe de 840 M€. La création du comité stratégique de filière (CSF) « Solutions industrie du futur » en mars 2021 a marqué une étape dans la structuration de la filière des offreurs de solutions et la consolidation du travail partenarial entre les industriels et l'État. Enfin, en 2021, le lancement du plan France 2030 a renouvelé le soutien au développement technologique et à la formation avec respectivement la stratégie robotique et machines intelligentes qui a déployé plusieurs appels à projets pour une enveloppe de 350 M€ et l'appel à manifestation d'intérêt « Compétences et métiers d'avenir ».

Le soutien de l'État pour l'Industrie 4.0 se poursuit donc depuis plus de 10 ans à travers une vision globale de l'industrie du futur et un triptyque constant : numériser, former et innover.

## NUMÉRISER

La France souffre d'un retard structurel de modernisation de son industrie. Les deux obstacles principaux à la transformation des entreprises sont le manque de connaissances des possibilités offertes par l'industrie du futur et l'obstacle financier. C'est pour cela que les différents plans de soutien à l'industrie du futur ont fait de l'accompagnement des entreprises et le soutien financier leurs axes majeurs.

### **Prendre le chemin de la transformation : sensibiliser les entreprises aux possibilités offertes par l'industrie du futur**

Dès 2015, des plans d'accompagnements des entreprises vers l'industrie du futur ont été mis en place par les régions. Ils ont permis d'accompagner plus de 5 000 entreprises. En 2018, l'État a souhaité accélérer cette démarche d'accompagnement en mobilisant 10 000 accompagnements supplémentaires d'ici fin 2023 afin que la moitié des 32 000 entreprises industrielles aient été accompagnées. Pour ce faire, une enveloppe de 80 M€ a été mobilisée. Ce dispositif, associant État et Conseils régionaux, a accompagné 6 000 entreprises sur les 7 500 finalement conventionnées, en dépit des difficultés de la crise sanitaire.

En complément, les entreprises ayant un projet d'investissement mais souhaitant le tester et lever les risques d'intégration dans leur processus peuvent bénéficier de l'accompagnement des huit plateformes accélération vers l'industrie du futur. Elles permettent de tester un projet, avec des experts, en conditions proches du réel, ce qui permet de fiabiliser l'investissement.

### **Le financement, premier obstacle à la transformation**

Différents outils ont été mis en place successivement afin de faciliter le financement des projets : prêts BPI, deux dispositifs de suramortissement, puis le guichet de subventions de France Relance. Cela a mobilisé près de 6,5 Mds€ et a bénéficié à plus de 10 000 entreprises.

L'étude des équipements financés révèle que ces dispositifs ont principalement servi à financer du rattrapage technologique plutôt que de la transformation. Par exemple, les machines à commande numérique représentent 80 % des financements France Relance. Néanmoins, ce rattrapage reste une condition indispensable pour pouvoir effectuer ensuite une véritable transformation.

## FORMER

### De nouveaux besoins pour de nouveaux métiers

L'automatisation de procédés entraîne un besoin de nouvelles compétences. Contrairement aux idées reçues, l'automatisation ne causera pas une suppression massive d'emplois, en revanche elle nécessitera une transformation de la majorité d'entre eux<sup>5</sup>. Ainsi, le besoin en formation initiale et continue est majeur pour acquérir les compétences nécessaires pour répondre aux nouveaux besoins. L'UIMM estime entre 65 000 et 115 000 les nouveaux besoins de recrutement liés à l'industrie du futur dans les 10 ans à venir<sup>6</sup>. Cela nécessite donc d'accompagner la formation sur l'ensemble des métiers, de l'opérateur à l'ingénieur en passant par les techniciens.

### Favoriser la création de nouvelles formations en adéquation avec les besoins de demain

Un premier dispositif « Osons l'industrie » (2016) a été une première étape en analysant les compétences requises par les projets de transformation dans le but de faire évoluer les référentiels de formation et en créant un portail internet pour informer les étudiants. En 2019, la création de l'opérateur de compétences interindustriel (Opco2i) regroupant 32 branches de l'industrie a facilité la programmation et le financement de formation liées à l'industrie du futur touchant l'ensemble des secteurs industriels. En outre, divers dispositifs d'attractivité et de féminisation des métiers de l'industrie ont été créés afin d'encourager l'orientation vers ces métiers, dont la Semaine de l'industrie organisée chaque année depuis 2011 par la direction générale des Entreprises pour attirer les jeunes et demandeurs d'emplois vers les métiers de l'industrie. Enfin, afin de répondre aux besoins des métiers de demain, un appel à manifestation d'intérêt transverse « Compétences et Métiers d'avenir » a été lancé dans France 2030 afin de financer des diagnostics pour évaluer les besoins en compétences et de nouvelles formations. Parmi les plus de 130 lauréats des deux premières vagues de l'AMI, 45 intégraient des éléments d'une partie de l'industrie du futur.

## INNOVER

Le troisième axe du triptyque commun à l'ensemble des plans des 10 dernières années est le soutien à l'innovation et aux offreurs de solutions. Cela s'est traduit par la création du CSF Solutions industrie du futur, consacrant le travail partenarial entre industriels et État. En complément, des aides financières à la R&D ont été mises en place grâce au PIA et France 2030 afin de faire émerger de nouvelles solutions technologiques.

<sup>5</sup> Conseil d'orientation pour l'emploi (2017), « Automatisation, numérisation et emploi », 172 pages, <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/coe-rapport-tome-2-automatisation-numerisation-emploi-septembre-2017.pdf>

<sup>6</sup> Union des industries et métiers de la métallurgie (2023), « Cartographie des emplois, des compétences et des formations de l'Industrie du futur », <https://www.observatoire-metallurgie.fr/analyses-previsions/cartographie-industrie-du-futur>

## La structuration d'une filière pour un meilleur dialogue

En mars 2021, le CSF Solutions industrie du futur a été créé. Cela permet la réunion des acteurs de la filière des machines et solutions industrielles intelligentes, ainsi que l'offre digitale, au sein d'une même structure et une meilleure fluidité du travail entre l'État et les industriels. Cela facilite également les échanges avec les autres filières industrielles. En effet, de par sa nature horizontale, ce CSF a vocation à interagir avec l'ensemble des autres CSF afin de promouvoir les solutions françaises auprès des filières pour aider à leur modernisation. Ce travail de structuration s'inscrit dans un temps long, du fait notamment d'un grand nombre de PME qui peinent à atteindre la taille critique.

## Des subventions pour le développement de nouvelles offres

Une partie du soutien public au cours des 10 dernières années a ainsi été allouée à l'innovation et la R&D dans l'objectif de proposer de nouvelles solutions pour la modernisation des entreprises. La France dispose d'un atout majeur avec une recherche d'excellence mondiale sur laquelle elle peut capitaliser. Des appels à projets (AAP) spécifiques à l'industrie du futur ont été lancés depuis 2013 permettant de financer de très nombreux projets de R&D. France 2030 a ensuite renforcé cet axe avec 350 M€ dédiés à la robotique et aux machines intelligentes. Trois dispositifs ont été lancés : un programme de recherche, un AAP « Défi Transfert » autour de consortia entraînant l'ensemble de la chaîne valeur autour de projets de transfert de briques technologiques génériques vers l'industrie, et l'AAP « Robotique et machines intelligentes d'excellence » qui vise à l'industrialisation d'offres de robots en se focalisant sur la robotique agile, la fabrication additive et la robotique mobile en milieu ouvert. Enfin, les différents AAP dans le domaine numérique concourent indirectement au développement de solutions d'industrie du futur.

Les effets du soutien à l'innovation mettent plusieurs années à être tangibles. Le temps de maturation d'un projet centré sur l'équipement est de l'ordre de 6 à 8 ans, bien supérieur à un projet uniquement logiciel. Ainsi, les effets de France 2030 seront pleinement visibles dans quelques années.

## OBJECTIFS SIMILAIRES, DISPOSITIFS DIFFÉRENTS : COMPARAISON INTERNATIONALE

Ces trois grandes orientations (numériser, former et innover) sont aussi les piliers des plans en faveur de l'industrie du futur à l'étranger. Certains pays ont mis en place des dispositifs différents pour atteindre ces objectifs. Ce sont autant d'exemples, couronnés de succès, dont pourrait s'inspirer la France lors de la conception de futurs dispositifs. Alors que les mécanismes de soutien français reposent en partie sur des subventions, les États-Unis ont bâti leur stratégie sur un modèle plus indirect, notamment grâce à la commande publique avec des critères de préférence nationale. Le modèle italien est basé sur des incitations fiscales. Néanmoins, ces dispositifs fiscaux ne concernent pas uniquement l'investissement productif mais aussi l'investissement dans les compétences avec un crédit d'impôt formation 4.0 variant selon la taille de l'entreprise entre 2018 et 2022. Le modèle allemand basé sur la Plattform Industrie 4.0 constitue également un cas intéressant en termes de structuration de la filière. Celle-ci travaille sur un ensemble de domaines tels que la standardisation, les modèles d'affaires, les cadres juridiques et veille à la mise en œuvre technique des résultats de ces groupes de travail. La création du CSF en France s'inscrit dans une démarche similaire et pourrait s'inspirer de son voisin dans les prochaines étapes de cette organisation.

## CONCLUSION

Les différents plans successifs depuis 10 ans ont commencé à porter leurs fruits mais les effets se mesurent sur le long terme. La transformation de l'industrie passait d'abord par un rattrapage avant de pouvoir effectuer une transformation, c'est l'enseignement principal des dispositifs de soutien à la demande. Pour les entreprises qui ont bénéficié d'un accompagnement, la conversion vers un investissement n'est pas toujours assurée et dépend de multiples facteurs, en premier lieu la rentabilité. L'âge moyen du parc machines étant élevé en France, les résultats du renouvellement des machines seront longs à percevoir. Enfin, concernant le développement de nouvelles offres, l'arrivée sur le marché des innovations financées prendra plusieurs années. Ainsi, le soutien à l'industrie du futur doit se concevoir sur le temps long et avec continuité.

Malgré les 10 ans de plans industrie du futur, l'obstacle financier reste un enjeu majeur, tout comme les compétences nécessaires face à l'évolution constante du secteur. Il reste donc de nombreux défis à relever, notamment face au carrefour technologique que représente l'IA et des possibilités qu'elle va apporter, dont l'ensemble de l'industrie doit pouvoir se saisir. Cela suppose de capitaliser sur l'ensemble des efforts précédemment réalisés et de poursuivre l'accompagnement (financier ou non) des entreprises que ce soit en modernisant celles ayant encore besoin de l'être ou bien en accompagnant celles, plus matures, dans de véritables projets d'intégration des données, de l'IA et de la robotique. Dans un contexte économique incertain, une plus grande visibilité apportée aux entreprises sur les dispositifs existants et à venir, et leur articulation entre eux, sera cruciale pour mener une véritable transformation de l'industrie sur le long terme.

# 5G Steel : l'expérience d'ArcelorMittal France

Par Damien SOLLER et David GLIJER  
Groupe ArcelorMittal

L'industrie 4.0 repose sur l'intégration des technologies numériques avancées dans les processus de production. Parmi ces technologies, la mobilité et les données jouent un rôle central en transformant les opérations industrielles et en ouvrant la voie à une nouvelle ère de productivité et d'innovation.

La mobilité dans l'industrie 4.0 se réfère à l'utilisation de dispositifs mobiles et de technologies sans fil pour améliorer la flexibilité et l'efficacité des opérations. Les *smartphones*, tablettes et autres appareils connectés permettent aux travailleurs d'accéder aux informations et de contrôler les processus à distance. Fort de ces convictions ArcelorMittal France a pris la décision de lancer un programme de déploiement de réseau 4G/5G. La plateforme est un projet partagé dédié à l'expérimentation multisites et multi applications des technologies 4G/5G.

Le programme consiste à développer les nouveaux usages dans les métiers et les processus de travail (production, qualité, service...) des usines sidérurgiques.

## LA MOBILITÉ ET LES DONNÉES : PILIERS DE L'INDUSTRIE 4.0

L'industrie 4.0, souvent qualifiée de quatrième révolution industrielle, repose sur l'intégration des technologies numériques avancées dans les processus de production. Parmi ces technologies, la mobilité et les données jouent un rôle central en transformant les opérations industrielles et en ouvrant la voie à une nouvelle ère de productivité et d'innovation.

La mobilité dans l'industrie 4.0 se réfère à l'utilisation de dispositifs mobiles et de technologies sans fil pour améliorer la flexibilité et l'efficacité des opérations. Les *smartphones*, tablettes et autres appareils connectés permettent aux travailleurs d'accéder aux informations et de contrôler les processus à distance. Cette connectivité accrue offre plusieurs avantages :

- réactivité accrue : les travailleurs peuvent recevoir des alertes en temps réel sur les anomalies de production, permettant une intervention rapide et réduisant les temps d'arrêt ;
- collaboration améliorée : les équipes peuvent collaborer plus efficacement, partageant des données et des informations instantanément, peu importe leur localisation ;
- optimisation des ressources : la gestion des ressources devient plus agile, avec la possibilité de surveiller et d'ajuster les opérations en temps réel.

Plusieurs technologies sans fil coexistent dans les environnements industriels apportant chacune ses propres avantages et inconvénients. Il n'est donc pas rare de voir plusieurs technologies cohabiter en fonction des cas d'usage.

Tableau 1 : Comparaison des performances techniques de diverses technologies sans fil (Synthèse réalisée à partir de *Les réseaux : L'ère des réseaux cloud et de la 5G* - Pujolle).

Technologie	Portée	Débit max	Latence	Consommation d'énergie	Avantages	Inconvénients
<b>WiFi</b>	100 m	Plusieurs Gbps	Faible à moyenne	Moyenne à élevée	Débit élevé, disponibilité	Portée limitée, consommation d'énergie élevée
<b>Bluetooth</b>	100 m	2 Mbps	Faible	Très faible	Faible consommation d'énergie, facilité d'intégration	Portée limitée, débit limité
<b>LoRaWAN</b>	15 km	50 kbps	Élevée	Très faible	Portée étendue, faible consommation d'énergie	Débit très faible, latence élevée
<b>TETRA</b>	50 km (avec répéteurs)	Faible à moyen	Faible	Moyenne	Fiabilité, sécurité	Débit limité
<b>5G</b>	Plusieurs km	10 Gbps	Très faible	Variable	Débit très élevé, latence très faible	Portée limitée

Avec la connectivité, les données sont au cœur de l'industrie 4.0, fournissant les informations nécessaires pour prendre des décisions éclairées. L'analyse des données permet de transformer des volumes massifs d'informations en éléments compréhensibles, synthétiques et exploitables.

L'intégration de la mobilité et des données crée un écosystème industriel intelligent où les informations circulent librement et où les décisions sont prises en temps réel. Cette synergie permet de transformer les opérations industrielles, offrant une flexibilité, une efficacité et une capacité d'innovation sans précédent :

- créer des usines intelligentes : les usines deviennent des environnements hautement connectés où les machines, les systèmes et les travailleurs interagissent de manière transparente ;
- améliorer la sécurité : les technologies mobiles et les données permettent de surveiller les conditions de travail et de garantir la sécurité des employés ;
- favoriser l'innovation : l'accès à des données en temps réel et la capacité de les analyser rapidement stimulent l'innovation, permettant aux entreprises de développer de nouveaux produits et services plus rapidement.

## LE PROGRAMME 5G STEEL D'ARCELORMITTAL FRANCE

Fort de ces convictions ArcelorMittal France a pris la décision de lancer un programme de déploiement de réseau 4G/5G. La plateforme est un projet partagé dédié à l'expérimentation multisites et multi applications des technologies 4G/5G. Le programme consiste à développer les nouveaux usages dans les métiers et les processus de travail (production, qualité, service...) des usines sidérurgiques.

### Périmètre, enjeux et objectifs

L'objectif du projet est de valider l'usage industriel de la 5G en environnement industriel sévère au travers de cas d'usage ciblés sur les différents métiers et lever les incertitudes et les risques (robustesse, sécurité) :

- réaliser une expérimentation technique pour appréhender la technologie 5G et ses contraintes de déploiement dans un environnement industriel difficile et de vérifier la robustesse de la solution dans un contexte d'applications hautement critiques ;
- mener des expérimentations d'usine intelligente pour répondre aux enjeux de performance industrielle en environnement de production tant en région Hauts-de-France (Dunkerque, Mardyck, Desvres) qu'en région Grand-Est (Florange).

Les deux principales implantations géographiques d'ArcelorMittal France constituent le périmètre du programme. Il s'agit des sites de Dunkerque/Mardyck d'une superficie de 10 km<sup>2</sup> et du site de Florange d'une superficie de 6 km<sup>2</sup>.

### Un programme piloté par la valeur

ArcelorMittal se positionne sur ce programme en qualité de donneur d'ordre. Au-delà de son aspect expérimental, le programme se doit d'apporter toute la valeur possible pour ArcelorMittal. La construction du réseau est donc pilotée par les cas d'usage identifiés.



Figure 1 : Délimitation de l'expérimentation sur les sites de Dunkerque/Mardyck (Source : ArcelorMittal France).



Figure 2 : Délimitation de l'expérimentation sur le site de Florange (Source : ArcelorMittal France).

Le programme a donc été segmenté en plusieurs projets permettant d'aboutir aux déploiements les plus pertinents pour les métiers de la sidérurgie :

- Construction du réseau privé :
  - construction sur les sites de Dunkerque/Mardyck ;
  - construction sur le site de Florange.
- Déploiement des cas d'usage de type « mobilité homme » :
  - maintenance en mobilité (consignation et déconsignation des équipements, accès aux documentations, réalisations d'avis de maintenance, rondes opérationnelles de contrôle) ;

- contrôles qualités (photos de produit, listes de contrôles, traçabilité de chargement) ;
- management d'équipe posté (accès aux outils RH, aux différents formulaires, aux documents à diffuser).
- Déploiement des cas d'usage de type « mobilité outil » :
  - accès aux programmes de production de l'aciérie dans les équipements (grues et AGV du parc à matière) ;
  - remontées d'informations *process* (poids des ferrailles des augets pour maîtriser les ajouts d'acier recyclé, poids-position-température des wagons poche tonneaux) ;
  - pilotage des trains en situation de refoulement (sans visibilité sur l'avant des wagons qui sont poussés).

### Un réseau intégré à l'infrastructure existante

Le réseau déployé est donc considéré comme un réseau opérationnel d'ArcelorMittal France. À ce titre, il a été complètement intégré aux réseaux actuels sur chaque site. Le schéma situé page suivante (voir la Figure 3 page suivante) illustre cette intégration qui se réalise concrètement au travers de plusieurs éléments :

- utilisation du *backbone* existant pour le transport des informations entre les sites radios et le cœur de réseau, ainsi que pour le maintien en synchronisation des cœurs de réseau entre eux ;
- création de VLAN permettant de séparer l'administration des plans utilisateurs ou techniques ;
- utilisation du pare-feu de séparation entre les réseaux IT et OT pour isoler les éléments et router les trafics en fonction des accès autorisés à chaque appareil se connectant à 5G Steel *via* sa carte SIM ;
- mise en place d'outils, de procédures et de mécanismes automatisés pour contrôler l'accès au réseau *via* les SIMs (provisionnement, authentification, IMEI...).

### Des choix techniques cohérents avec les cas d'usage envisagés

Les critères de choix techniques ont été réalisés au travers des cas d'usage envisagés et des contraintes qui en découlent.

#### *Couverture globale du site et des installations*

Les cas d'usage pré-identifiés couvrent l'intégralité des sites, à la fois en extérieur et en intérieur :

- les simulations de rayonnement ont permis de positionner et de définir les paramètres des antennes (*tilt*, puissance, orientation) afin de couvrir au mieux les zones concernées ;
- le choix a été également réalisé d'installer les antennes en extérieur sur des points hauts permettant d'assurer également un rayonnement suffisant à l'intérieur des bâtiments.

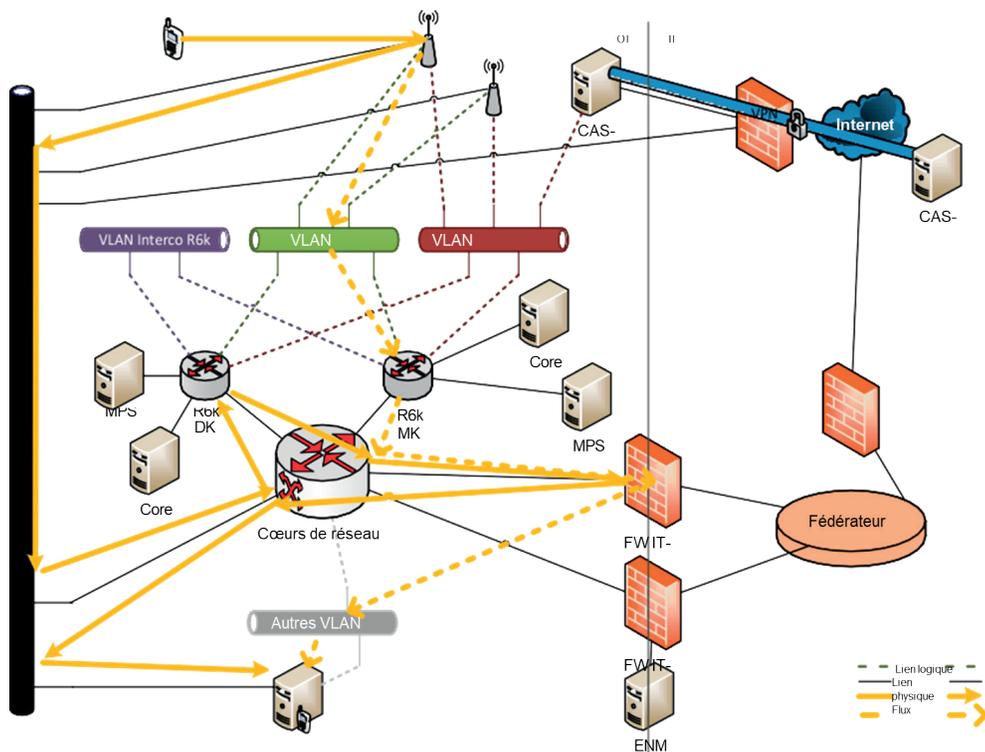


Figure 3 : Intégration du réseau 5G Steel dans les réseaux ArcelorMittal (Source : ArcelorMittal France).

### Optimisation de l'utilisation des bandes de fréquence

Les bandes de fréquence demandées par ArcelorMittal France et attribuées par l'ARCEP sont limitées (une tranche de 20 MHz dans la bande 38 et une tranche de 100 MHz dans la bande 77). Il est donc nécessaire de maximiser l'utilisation de celle-ci :

- la technologie MiMo 4\*4 nous a permis de viser des débits raisonnables (+ 50 à + 100 % par rapport à une technologie MiMo 2\*2) ;
- nous avons également décidé d'utiliser la trame 1 TDD pour son équilibre (54 % d'occupation en *Down Link* et 40 % d'occupation en *Up Link*) ce qui est cohérent avec une consommation de données équivalente à une production de données.

### Cas d'usage de production 24/7

Ce critère implique une résilience importante du système et une redondance des composants principaux :

- en premier lieu, il est critique d'obtenir une géo-redondance des cœurs afin de permettre la continuité de session en cas d'anomalie d'un des cœurs ou d'un des bâtiments hébergeant ces cœurs ;
- la couverture doit également être assurée au maximum en cas de défaillance d'un secteur radio. Des simulations croisées ont permis de valider et de modifier les emplacements des sites radio et leurs configurations. Certains sites ayant été identifiés comme critiques ont été complétés en termes de redondance.



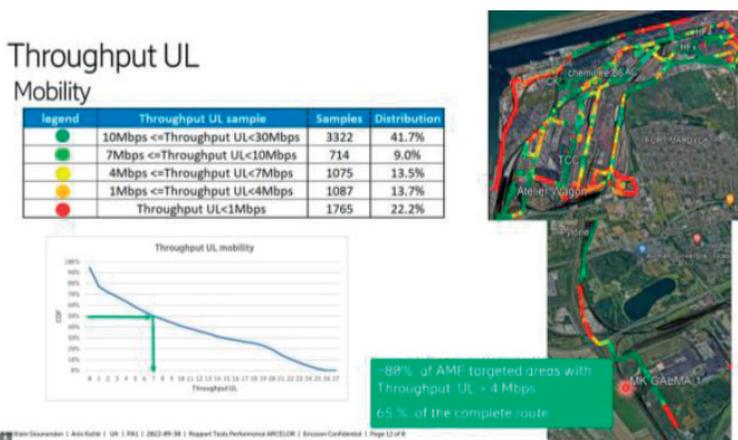


Figure 5 : Tests de réceptions en *upload* pour le site de Dunkerque (Source : ArcelorMittal France).

Tableau 2 : Liste des formations incluses au plan (Source : ArcelorMittal France).

<b>Titre de la formation</b>
Telecom Basics and LTE Overview for IT Professionals
Network Director (ND) Operations and Administration: main procedures
Ericsson Radio System Overview
Baseband Radio Node - Field Operations - main procedures
Baseband Radio Node - Operation and Configuration - main procedures
Baseband Radio Node - Troubleshooting (most common procedures)
LTE Foundation for 5G
Ericsson CEE System Administration R9: Overview
SGSN-MME 1 Operation and Configuration for EC: Overview
EPG 2 Operation and Configuration for EC: Overview
SAPC 1 Operation and Configuration for EC: Overview
HSS-FE 1 Operation and Configuration for EC: Overview
CUDB 1 Operation and Configuration for EC: Overview
EDA 1 Operation and Provisioning: Overview

Sur cette base un plan de formation conséquent (16 jours) des équipes a été élaboré en cohérence avec les ambitions d'ArcelorMittal France. En effet ArcelorMittal a décidé de réaliser en interne l'exploitation au niveau 1 (procéduré) et au niveau 2 (analytique). Seul le niveau 3 (expertise) est externalisé.

### **Un réseau sécurisé permettant d'améliorer l'expérience utilisateur**

Le fait de se connecter directement à un réseau opérationnel et de gérer la sécurité par la maîtrise des appareils connectés et des accès en fonction des cas d'usage permet de s'affranchir des éléments de sécurité qui introduisent de l'instabilité (VPN, rebonds, *reverse proxy*...). Les conséquences sont doubles : meilleure fiabilité des systèmes et meilleure expérience utilisateur.

### **Une facilité de mise en place de pilotes et de déploiement de solutions**

Lors des projets de digitalisation, en particulier pour les sujets se trouvant dans des zones non couvertes en connectivité classique (liaison filaire RJ 45 ou *wifi*), il est désormais possible de déployer à moindre coût des solutions temporaires sans infrastructures lourdes.

Cette agilité pour les pilotes est également disponible lors du déploiement. Pour les solutions utilisées dans des lieux très éloignés de connectivité et/ou pour lesquels de grands espaces de couverture réseau sont nécessaires.

## **LES PERSPECTIVES**

Bien que le programme 5G Steel soit récent, ArcelorMittal France prévoit plusieurs axes de développement de ce réseau. Ces développements ont pour objectif :

- d'étendre le réseau à d'autres sites d'ArcelorMittal ;
- de développer des capacités de continuité avec les opérateurs de télécommunication publics ;
- de construire des écosystèmes pour développer des solutions.

### **Déploiement de 5G Steel sur des sites**

C'est le premier axe de développement du programme. Il s'agit d'amener la connectivité 5G Steel sur les sites pour lesquels le déploiement d'un cœur de réseau n'est pas économiquement rentable.

ArcelorMittal France c'est en effet 7 sites différents.

Pour ces déploiements un travail sera nécessaire afin de déterminer quelles fonctionnalités du cœur devront être délocalisées. Les cas d'usage qui pourront être déployés dépendront de la résilience et de l'autonomie de chacun de ces sites.

### **Continuité avec les zones couvertes par les opérateurs publics**

Le deuxième axe de développement du programme concerne la continuité et l'interopérabilité avec les opérateurs publics. Cet axe de développement couvre les cas d'usage consistant à permettre de passer sans interruption de service du réseau privé 5G Steel

vers un réseau d'un opérateur de télécommunication public. On peut penser par exemple à des cas d'usage de géolocalisation de marchandises en dehors des sites d'ArcelorMittal.

## **Écosystème de développement**

Enfin, le troisième axe de développement du programme, en lien avec les *Digital Lab* d'ArcelorMittal (lieux d'animation de l'écosystème numérique), consiste à créer des FabLab 5G. Ces lieux permettront de développer des solutions industrielles utilisant les réseaux mobiles (LTE ou NR) et d'accélérer les changements déjà engagés.

# Construire des espaces de données interopérables pour l'industrie du futur

Par **Didier NAVEZ**

Senior Vice President Data Policy & Governance chez Dawex

Et **Sébastien GÉRARD**

Senior Fellow au CEA

Dans un contexte de chaînes de valeur mondialisées et de concurrence accrue, les espaces et les écosystèmes de données industriels jouent un rôle essentiel pour améliorer la compétitivité et la résilience des entreprises européennes, répondre aux exigences réglementaires croissantes, et soutenir l'innovation.

Dans cet article, nous proposons d'explorer les espaces de données industriels de confiance, et d'apporter un éclairage sur ces écosystèmes collaboratifs qui facilitent la circulation et l'échange de données entre organisations. Des initiatives clés d'espaces de données industriels sont présentées pour illustrer les progrès technologiques en matière de gouvernance, de sécurité, et d'interopérabilité, visant à transformer le secteur manufacturier européen en un écosystème interconnecté et résilient.

## INTRODUCTION

Dans un contexte de transformation profonde de l'industrie par le numérique, la notion d'espaces de données industriels se présente comme une solution innovante pour relever les défis du futur. Ces espaces de données se définissent comme des écosystèmes collaboratifs, réunissant des parties prenantes qui partagent des intérêts et des objectifs communs, comme par exemple des acteurs d'une chaîne de valeur, d'une chaîne d'approvisionnement ou d'un marché, dans le but de faciliter l'échange et le partage de données de manière maîtrisée, sécurisée et en toute confiance. Les espaces de données permettent entre autres d'améliorer les opérations, que ce soit au niveau de la production, de la distribution, de la gestion des ressources ou tout autre processus critique de l'entreprise, de répondre à des exigences réglementaires, ou encore d'assister et d'optimiser la prise de décision.

Au sein de ces espaces, des organisations mettent en œuvre des cas d'usage spécifiques, comme par exemple la mesure de l'empreinte carbone. Pour ce faire, elles s'appuient sur des produits de données (*data products*) qui sont partagés et échangés entre partenaires et applications. La mise en place d'une gouvernance solide, englobant les aspects réglementaires, organisationnels, juridiques et techniques, est ainsi cruciale pour orchestrer ces échanges de données et garantir une collaboration efficace et de confiance entre tous les acteurs concernés.

Cet article met en avant l'importance des espaces de données industriels pour renforcer la compétitivité européenne, tout en répondant aux défis réglementaires et environnementaux. Il explore les avantages opérationnels, les initiatives clés telles que

Data4Industry-X, projet phare de Manufacturing-X, et les technologies essentielles à leur mise en œuvre, notamment en matière de gouvernance, de sécurité, et d'interopérabilité des espaces de données.

## LES ESPACES DE DONNÉES INDUSTRIELS : UNE NÉCESSITÉ ABSOLUE POUR L'ESSOR DE L'INDUSTRIE EUROPÉENNE

Les bénéfices industriels et opérationnels liés à la création d'espaces de données industriels sont indéniables :

- Ils permettent non seulement d'optimiser les processus, mais aussi d'améliorer la compétitivité des entreprises en leur offrant une résilience accrue face aux crises, qu'il s'agisse de ruptures dans la chaîne d'approvisionnement, de fluctuations des prix des matières premières, ou de crises globales telles que la pandémie de Covid-19.
- Dans un contexte de mondialisation où les industries européennes font face à des concurrents globaux, les espaces de données industriels deviennent un atout stratégique essentiel pour soutenir la compétitivité et la résilience des industries en Europe. En effet, les espaces de données en facilitant le partage de données entre différents acteurs de l'industrie (fournisseurs, partenaires, clients) créent des opportunités d'innovation, de réduction des coûts, d'amélioration de la qualité, ou encore d'accélération du développement de nouveaux produits, conduisant à renforcer la compétitivité des entreprises européennes. Enfin, les infrastructures de données sécurisées et conformes aux réglementations européennes permettent aux entreprises européennes de réduire leur dépendance aux plateformes de données soumises à des lois extraterritoriales, non européennes, et protéger leurs informations stratégiques.
- Les industriels sont tenus de se conformer à un cadre réglementaire de plus en plus exigeant. Les législations récentes, telles que l'ESPR (*European Sustainability Reporting Regulation*) et CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*), obligent les industries à une transparence accrue, notamment en matière de durabilité et de traçabilité des produits. Le "Data Act", quant à lui, introduit de nouvelles exigences de partage des données collectées *via* les objets connectés. Ainsi, l'essor des espaces de données industriels contribue à faciliter la mise en conformité des entreprises à ces nouvelles réglementations européennes.

## DATA4INDUSTRY-X : UNE SOLUTION TECHNOLOGIQUE POUR LA MISE EN ŒUVRE D'ESPACES DE DONNÉES INDUSTRIELS

Data4Industry-X<sup>1</sup>, soutenue par l'État français dans le cadre du plan France 2030, avec l'appui de l'Alliance Industrie du Futur, rassemble de grandes organisations industrielles comme Valeo, Schneider Electric, le CEA-List – l'institut de recherche technologique du CEA dédié aux systèmes numériques intelligents –, ainsi que des acteurs technologiques spécialisés comme Prosyst et Dawex.

Data4Industry-X est un exemple significatif d'initiative nationale qui vise à améliorer la compétitivité de l'industrie manufacturière française par la collaboration et l'échange de données entre partenaires et fournisseurs. Data4Industry-X est la solution d'échange de données de confiance, sécurisée et souveraine pour le secteur de l'industrie, sous le

---

<sup>1</sup> <https://www.data4industry-x.com/fr/>

contrôle des industriels. De plus, Data4Industry-X répond aux enjeux de l'échange de données dans des environnements de fabrication décentralisés. Cette solution permet aux organisations d'innover et de collaborer en partageant des données distribuées, provenant de différents ateliers, usines, organisations et pays.

Data4Industry-X met en œuvre les standards *de facto* de Gaia-X, et est conçue en conformité avec les nouvelles réglementations européennes en matière de données, telles que le "Data Act".

Data4Industry-X s'inscrit en tant que projet phare dans le cadre plus large de Manufacturing-X<sup>2</sup>, une initiative européenne et internationale qui vise à transformer le secteur manufacturier européen en un écosystème interconnecté et résilient, mettant en avant, de manière coordonnée, des espaces de données industriels couvrant l'ensemble de la chaîne de production et d'approvisionnement d'une même filière, ou intra filière.

Un des cas d'usage particulièrement pertinent de Data4Industry-X est celui de l'économie circulaire. Dans ce cadre, les projets comme CIRPASS 1 et 2 jouent un rôle crucial en aidant les entreprises à se conformer aux nouvelles réglementations européennes en matière de durabilité. En effet, les projets CIRPASS 1 et 2, sont des initiatives phares qui visent à définir le concept de passeports numériques pour les produits (DPP, *Digital Passport Product*), ainsi que l'architecture du système d'information nécessaire à son déploiement. Ces deux éléments sont les clés de la mise en œuvre d'une économie circulaire<sup>3</sup>.

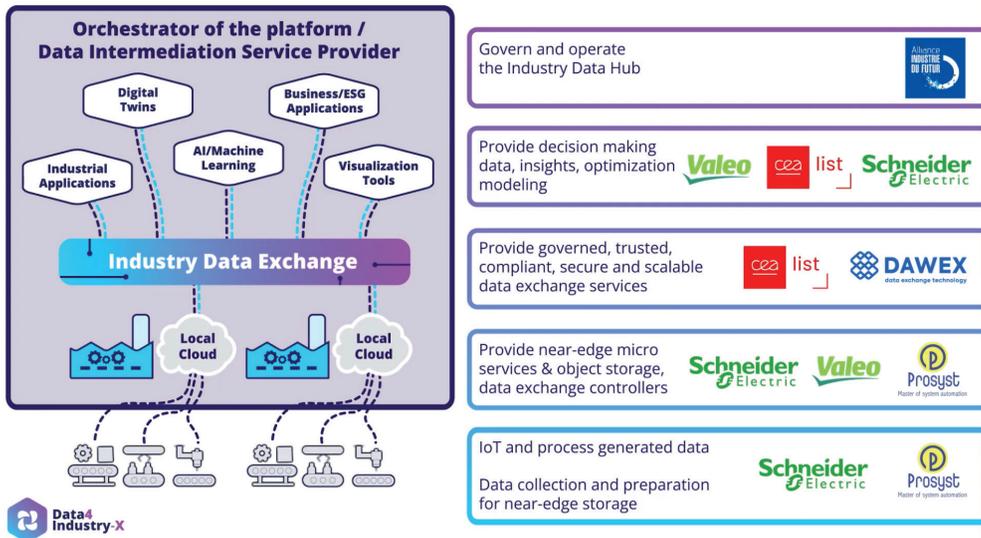


Figure 1 : Architecture haut niveau de Data4Industry-X  
(Source : Data4Industry-X).

<sup>2</sup> <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Manufacturing-X/Manufacturing-X.html>

<sup>3</sup> Annika Hedberg et Stefan Šipka, "The Circular Economy: Going Digital", EUROPEAN POLICY CENTRE, mars 2020, <https://www.epc.eu/en/publications/The-circular-economy-Going-digital~30c848>

## PRINCIPES CLÉS POUR LA CONSTRUCTION D'ESPACES DE DONNÉES INDUSTRIELS

La construction d'un espace de données industriel repose sur plusieurs fondements essentiels.

Les données doivent être hébergées sur des infrastructures accessibles et adaptées aux besoins des parties prenantes concernées par la collaboration. Qu'il s'agisse de *clouds* publics, privés ou de *clouds* locaux industriels, l'infrastructure doit être en mesure de gérer de grandes quantités de données tout en assurant leur sécurité et leur disponibilité. Par exemple, certaines entreprises peuvent choisir des *clouds* locaux pour des raisons de souveraineté des données, tandis que d'autres peuvent opter pour des solutions hybrides combinant les avantages des *clouds* publics et privés.

Pour orchestrer les espaces de données, il faut des solutions techniques performantes pour gérer les échanges de données. Ces solutions créent la confiance, garantissent la sécurité et la traçabilité des données échangées, tout en assurant la conformité aux réglementations. Par exemple, des protocoles de chiffrement peuvent être utilisés pour protéger les données sensibles lors de leur transfert entre les partenaires, tandis que des mécanismes de traçabilité, s'appuyant sur des technologies comme la *blockchain* vont permettre de suivre l'origine et l'utilisation des données tout au long de leur cycle de vie.

De plus, il est nécessaire que des applications métiers verticales puissent être intégrées de manière cohérente dans ces espaces de données pour répondre aux différents cas d'usage identifiés. Par exemple, un espace de données dédié à l'industrie automobile pourrait inclure des applications spécifiques pour la gestion des chaînes d'approvisionnement, la maintenance prédictive, ou encore la gestion des retours de produits.

Enfin, une gouvernance globale, appuyée par un orchestrateur, est nécessaire pour assurer la cohérence et l'efficacité de l'ensemble du système.

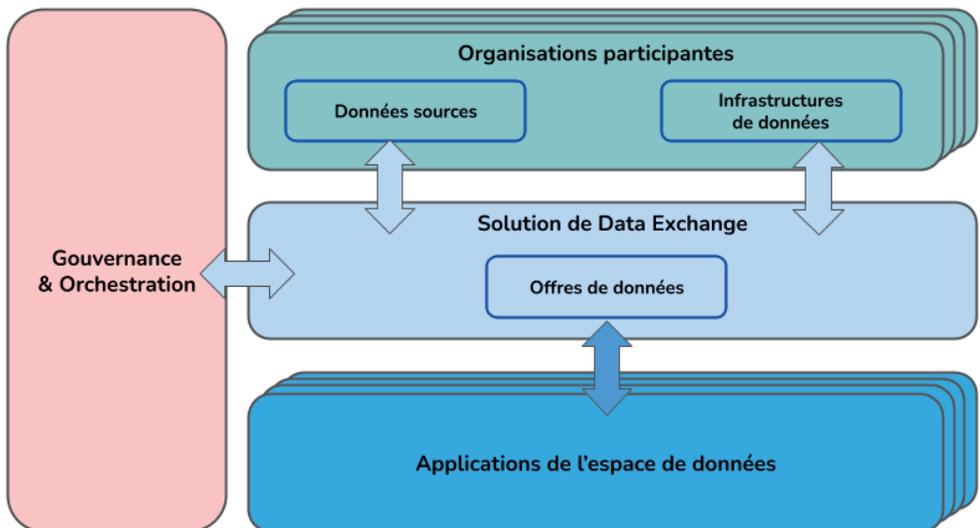


Figure 2 : Architecture d'un espace de données (Source : Dawex).

## INTEROPÉRABILITÉ : UN ENJEU CENTRAL POUR LES ESPACES DE DONNÉES

L'interopérabilité, est définie par la norme ISO/IEC 2382:2015 - Technologies de l'information - Vocabulaire<sup>4</sup> :

*« Interopérabilité : aptitude à l'interfonctionnement, possibilité de communication, d'exécution de programmes ou de transfert de données entre unités fonctionnelles différentes, de telle manière que l'utilisateur n'ait que peu ou pas besoin de connaître les caractéristiques propres à chaque unité. »*

L'interopérabilité est l'un des plus grands défis dans la construction des espaces de données industriels. Construire un espace de données interopérable peut dans la réalité s'avérer complexe. De plus, les acteurs industriels, en particulier les fournisseurs, sont souvent impliqués dans plusieurs chaînes de valeur et donc dans plusieurs espaces de données. Il devient donc essentiel de pouvoir gérer les problèmes d'interopérabilité non seulement au sein d'un espace de données, mais aussi entre différents espaces.

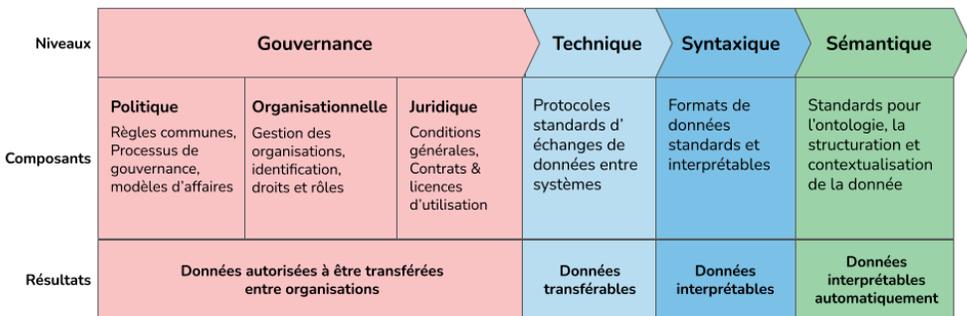


Figure 3 : Les niveaux d'interopérabilité (Source : Dawex).

Cette interopérabilité est assurée à plusieurs niveaux.

### Sur le plan de la gouvernance

Sur le plan de la gouvernance, des règles claires d'échange et de protection des données doivent être établies. Les niveaux visés concernent les politiques de gouvernance, y compris les modèles d'affaires, mais aussi les organisations, identités, ainsi que les aspects contractuels et juridiques avec notamment les conditions générales de service, les contrats et licences d'utilisation des données. Ces aspects sont déjà bien avancés grâce notamment à :

- Gaia-X : Le standard *de facto* de Gaia-X vise à établir un écosystème de données fédéré, sécurisé, créant un cadre qui renforce la confiance, le contrôle des échanges et favorise la circulation des données. Le *Gaia-X Trust Framework* précise un ensemble de règles définissant la base requise pour faire partie de l'écosystème Gaia-X. *Via*

<sup>4</sup> <https://www.iso.org/fr/standard/63598.html>

des “Digital Clearing Houses”, Gaia-X met en place des mécanismes de conformité, afin de garantir que les services d’échanges de données respectent ses standards. En complément, Gaia-X a publié un document de conformité Gaia-X (“Gaia-X Compliance Document”) qui formalise la signification de la Conformité Standard pour les fournisseurs de services, introduisant aussi trois niveaux de labellisation, allant du niveau “Level 1 Gaia-X Label” au “Level 3 Gaia-X Label”, le niveau le plus élevé en termes de sécurité et de protection, pour garantir l’immunité contre les lois extraterritoriales non européennes.

- La stratégie européenne pour les données, qui a permis la mise en application d’un cadre réglementaire européen, dont le “Data Governance Act”, visant à créer la confiance dans les échanges de données, et le “Data Act” spécifiant entre autres dispositions, un ensemble d’exigences favorisant l’interopérabilité au sein et entre les espaces de données.
- La stratégie européenne de normalisation, dont le Programme de travail annuel de l’Union en matière de normalisation européenne pour 2024 (The 2024 annual Union work programme for European standardisation -C/2024/1364)<sup>5</sup> a défini parmi les actions de normalisation prioritaires, la définition d’un cadre de données de confiance européen (EU Trusted Data Framework) afin de faciliter opérationnellement la mise en application du règlement sur les données, le “Data Act”.

## Sur les plans technique et syntaxique

Sur les plans technique et syntaxique, des standards communs doivent être définis pour permettre l’échange de données entre les différentes infrastructures, notamment grâce aux protocoles API et SFTP. Il est également nécessaire de s’assurer que les données échangées utilisent des formats standards et interprétables, comme JSON, JSON-LD, XML et XLS, parmi d’autres.

## Sur l’interopérabilité sémantique

Un enjeu majeur reste l’interopérabilité sémantique, qui est essentielle pour que les applications interagissent automatiquement sans ou avec le moins possible d’interventions humaines si besoin. Par exemple, deux entreprises peuvent utiliser des termes différents pour décrire les mêmes données, ce qui rend difficile leur interprétation automatique. Pour surmonter ce défi, plusieurs approches peuvent être envisagées, notamment la standardisation de types de données au travers de la définition d’ontologies, de glossaires ou encore de métamodèles, la vérification en amont, l’usage d’outils de traduction automatique, ou encore d’analyse de similarités sémantiques issues des travaux scientifiques dans le domaine du traitement automatique du langage.

## CONSTRUIRE L’INTEROPÉRABILITÉ SÉMANTIQUE DANS LES ÉCOSYSTÈMES DE DONNÉES INDUSTRIELS

La construction de l’interopérabilité sémantique peut suivre plusieurs voies complémentaires.

La première est celle de la normalisation, où il s’agit de valider et d’appliquer des standards de données industrielles au niveau européen, ou au-delà. Il s’agit de définir des formats, des vocabulaires et des modèles de données reconnus par une filière industrielle entière,

<sup>5</sup> [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:C\\_202401364](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:C_202401364)

de sorte que chaque système utilisant ces standards puisse interpréter les données de manière uniforme et cohérente. Ce processus nécessite une collaboration étroite entre les autorités publiques et les acteurs privés, à l'image de ce qui a été fait pour les standards GSM dans le domaine des télécommunications.

Une autre voie est celle de la vérification en amont, où des outils permettent de valider que les données échangées entre les différentes unités de production sont conformes à une norme définie. Par exemple, avant de transférer des données d'une ligne de production à un autre système, un outil peut vérifier que les données sont cohérentes avec les spécifications attendues, comme pour s'assurer que les unités de mesure sont uniformes.

Enfin, issues des travaux combinés entre intelligence artificielle et traitement automatique des langues (TAL), les avancées technologiques récentes en traduction automatique sont des solutions prometteuses. Cela pourrait permettre d'opérer des conversions automatiques des données dans des formats sémantiques désirés. Par exemple, une entreprise automobile reçoit des données de différents fournisseurs de pièces détachées, chacun utilisant un format de données propre. Une application d'IA est alors capable de traduire automatiquement les spécifications des pièces telles que les dimensions, matériaux, tolérances, dans le format utilisé par le système de gestion de production de l'entreprise. Cela permet de recevoir et d'interpréter les données sans avoir besoin que chaque fournisseur se conforme, manuellement, aux mêmes standards.

## CONCLUSION

Les espaces de données industriels ne sont plus une simple vision, une idée, mais une réalité en plein essor, et les initiatives et les technologies pour les rendre interopérables progressent aussi rapidement. Dans divers secteurs, il existe déjà des implémentations opérationnelles d'espace de données, comme Agdatahub dans le secteur agricole, "Hub One DataTrust" dans l'écosystème aéroportuaire, mais également dans l'automobile, la construction et la chimie, ainsi que des initiatives à venir de *leaders* industriels notamment dans l'énergie ou l'aéronautique où les enjeux d'accélérer les collaborations par la donnée au sein d'écosystèmes de confiance sont devenus incontournables. Pour les entreprises industrielles, il est donc crucial de s'engager dès maintenant dans la création d'espaces de données de confiance, et d'investir dans les compétences et les technologies nécessaires pour ce faire. Cela représente une opportunité unique pour ces entreprises de jouer un rôle de *leader* dans ces écosystèmes émergents, plutôt que de subir les approches concurrentes qui pourraient dicter les règles du jeu de l'accès aux données, à l'avenir. Saisir cette opportunité permettra non seulement d'influencer les normes en cours de développement, mais aussi de se garantir un avantage stratégique durable. Enfin, l'interopérabilité ne se limite pas aux technologies de l'information, elle touche également aux règles comptables, notamment celles qui intègrent la valeur du patrimoine des données de l'entreprise en tant qu'actif au bilan comptable des entreprises, à l'instar par exemple des nouvelles règles comptables établies en Chine depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2024. Une approche proactive de l'Europe sur ce sujet pourrait devenir un autre puissant levier de création de valeur, incitant les dirigeants à accélérer la digitalisation de leurs activités, renforçant leur résilience et leur compétitivité.

# Formation continue : exemple du Campus du numérique de la DINUM

Par **Fadila LETURCQ**

Cheffe du pôle Campus du numérique public  
à la direction interministérielle du numérique

Et **Stéphanie SCHAER**

Directrice interministérielle du numérique

À mesure que la transformation numérique de l'État et des services publics se développe, le besoin d'adapter les compétences des agents publics est de plus en plus marqué. Qu'il s'agisse de s'acculturer au numérique, d'acquérir de nouvelles qualifications ou d'approfondir une expertise : les agents des trois versants de la fonction publique sont concernés. C'est dans cette perspective que le Campus du numérique public, porté par la direction interministérielle du Numérique (DINUM, placée sous l'autorité conjointe du Premier ministre et du ministre de la Fonction publique, de la Simplification et de la Transformation de l'action publique) a été créé.

Cet article propose de revenir sur le besoin de transformation humaine qui accompagne la transformation numérique de l'État et, précisément, sur les enjeux de formation continue au numérique des agents pour renforcer les rangs de la filière numérique, ambition majeure de la stratégie numérique de l'État publiée en 2023.

## LA DINUM, UNE ADMINISTRATION AU SERVICE DE LA RÉUSSITE DES POLITIQUES PUBLIQUES GRÂCE AU NUMÉRIQUE

Service du Premier ministre, la direction interministérielle du Numérique (DINUM) a pour mission d'élaborer la stratégie numérique de l'État et de piloter sa mise en œuvre. Elle exerce aussi les missions de *chief data officer* et de DRH du numérique de l'État. Sa mission : rendre l'État plus efficace, plus simple et plus souverain grâce au numérique.

Pour assurer l'efficacité de l'action publique et garantir la souveraineté numérique de l'État, la nécessité de disposer d'une stratégie RH puissante est largement partagée au sein de la sphère publique. Attirer, recruter, fidéliser et former des agents publics du numérique est une priorité absolue d'aujourd'hui et de demain. C'est dans ce contexte que la DINUM s'est dotée en 2023, en application de sa nouvelle feuille de route, d'un nouveau département chargé d'accompagner et de renforcer la filière numérique de l'État en intervenant à trois niveaux : attirer ; fidéliser ; former.

## LA FORMATION AUX COMPÉTENCES NUMÉRIQUES : UN BESOIN PARTAGÉ PAR TOUS LES AGENTS PUBLICS

La crise du Covid-19 et les confinements qui l'ont jalonnée ont été un accélérateur de la transformation numérique des administrations et de la modernisation du service public.

De nouvelles pratiques professionnelles ont émergé avec un usage massif de terminaux mobiles et d'outils numériques au service de la gestion des administrations et du travail à distance et collaboratif. La couverture en ordinateurs portables des agents publics accélérée par la crise du Covid-19, de même que le développement d'outils de travail à distance comme la messagerie instantanée Tchap, le Webinaire de l'État ou encore l'outil de partage de document France Transfert, ont permis de faire entrer une part significative des agents publics dans l'ère de l'Administration numérique. Couplée à la dématérialisation des démarches essentielles des usagers du service public et au développement de l'intelligence artificielle, cette dynamique a engendré une demande significative en matière de formation aux compétences numériques. En effet, depuis 2019, la moitié des agents publics (51 % chaque année)<sup>1</sup> issus de toutes filières, grades et catégories confondues, expriment le souhait de bénéficier de formation ou d'accompagnement pour perfectionner leurs usages professionnels et mieux maîtriser leur environnement numérique de travail.

En mai 2023, et pour la première fois, une étude sur les besoins RH pour la filière numérique de l'État était publiée par le Conseil général de l'Économie et l'Inspection générale des finances<sup>2</sup>. Le rapport issu de cette étude alertait sur le besoin de limiter l'externalisation massive en matière de numérique public et de prévoir la création de 3 500 postes numériques sur 5 ans dans les ministères civils. Cette recommandation était assortie de plusieurs enjeux concernant la formation : un enjeu de reconversion d'agents publics vers des expertises du numérique nécessitant un fort besoin en recrutement (métiers de la donnée et de l'IA, métiers du développement et du *Cloud*, entre autres), un enjeu de développement d'une offre de formation spécifique pour les agents de la filière numérique de l'État comme facteur de fidélisation et de développement des carrières, et enfin un enjeu d'acculturation au numérique pour les 25 000 cadres dirigeants et cadres supérieurs de l'État.

Dans le cadre du plan France Relance (2020-2022), la DINUM a octroyé près de 5 millions d'euros<sup>3</sup> aux administrations pour assurer la montée en compétences numériques des agents de la filière numérique de l'État et des agents publics observant leur environnement de travail se moderniser par le numérique. Ces financements ont révélé des besoins variés, notamment la mise en place d'évaluations des compétences numériques des agents publics *via* l'outil PIX, la création de formations socles pour les compétences de base en matière numérique pour l'ensemble des agents publics ou encore des parcours de professionnalisation au métier de chef de projet numérique. Ils ont également mis en

---

<sup>1</sup> Chiffres issus de l'enquête annuelle « Baromètre numérique de l'agent public » adressée entre 2019 et 2023 aux agents de la fonction publique d'État (administrations centrales et services déconcentrés).

<sup>2</sup> Maxence Langlois-Berthelot, Maxime Forest, Jean-François Verdier, Michel Schmitt & Antoine Michon (2023), « Les ressources humaines de l'État dans le numérique », Rapport officiel édité par l'Inspection générale des finances et le Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies, janvier 2023, 113 pages.

<sup>3</sup> Fonds « Innovation et transformation numérique » - volet 4 et « Sac à dos numérique de l'agent public » - volet 5 du champ transformation numérique publique de France Relance.

lumière la nécessité d'investir fortement dans l'offre de formation numérique proposée aux agents de la filière.

C'est dans cette perspective que le Campus du numérique a été créé.

## **LE CAMPUS DU NUMÉRIQUE PUBLIC : PLATEFORME POUR DÉVELOPPER UNE CULTURE NUMÉRIQUE COMMUNE DANS L'ADMINISTRATION**

Lancé en janvier 2024, le Campus du numérique public a été pensé comme agrégateur de formations au numérique, une école du numérique interne à l'État et une offre de services à destination des administrations.

Aligné autour de deux axes phares de la stratégie numérique de l'État<sup>4</sup> : la réussite des projets numériques des ministères et le renforcement des compétences numériques de l'État, le Campus est une initiative hybride, numérique et RH, visant à doter les agents publics de compétences communes pour embrasser la transformation numérique par la diffusion, entre autres, des méthodes agiles dans la conduite de projets numériques et s'inscrivant dans le parcours de développement des compétences et des carrières des agents publics.

### **Augmenter et faire passer à l'échelle l'offre de formation existante**

Le catalogue du Campus est accessible en ligne à tout agent public, et propose des formations sur le numérique en ligne (délivrées de façon synchrone ou asynchrone), principalement sur la plateforme interministérielle MENTOR, ou en présentiel. La première version du catalogue est composée de formations existantes, développées par la DINUM ou par ses partenaires ministériels. En ce sens, le Campus se positionne comme agrégateur de formations développées par les administrations et permet le passage à l'échelle de ces dernières en les intégrant au catalogue interministériel. Ces formations s'adressent à des professionnels du numérique public, comme à des non-professionnels. Au fur et à mesure de l'identification des besoins de formation et du développement des programmes, le catalogue de formation viendra s'étoffer. Ainsi, le site du Campus<sup>5</sup> se veut être une référence en matière de formation au numérique public.

### **Proposer un socle commun de compétences pour tous les agents de la fonction publique**

Le Campus du numérique public souhaite délivrer une culture numérique commune à tous les agents, tenant compte de la spécificité du numérique public. Aussi, fort de l'expérimentation et du déploiement de PIX dans une majorité de ministères, le Campus a souhaité développer un parcours PIX Fonction publique qui sera déployé progressivement dès le dernier trimestre 2024 auprès de l'ensemble des agents publics. La création de PIX Fonction publique s'appuie sur les déploiements déjà menés, se fait en étroite collaboration avec les ministères et est appuyée par un financement du Fonds de transformation

---

<sup>4</sup> DINUM (2023), Feuille de route « Une stratégie numérique au service de l'efficacité de l'action publique », 18 pages.

<sup>5</sup> <https://campus.numerique.gouv.fr/>

de l'action publique (FTAP). Au déploiement de l'évaluation PIX Fonction publique qui permettra aux administrations d'identifier les niveaux de maîtrise du numérique de leurs agents, un parcours de formation « Socle de compétences numériques » est en cours de développement par le Campus et viendra s'ajouter au catalogue de formation.

## **Faire réussir les projets numériques en diffusant des méthodes éprouvées**

Les grands projets numériques sont exposés à plusieurs défis : le défi de l'exécution (dérides budgétaires et calendaires), le défi de la finalité (recherche d'impact) et le défi de la compétence (enjeu d'attractivité et de fidélisation des talents numériques). Aussi, la direction interministérielle du Numérique a souhaité diffuser des méthodes de conduite de projet agiles dans sa stratégie en mettant l'impact au cœur. Il s'agit, par exemple, de délaisser le « cycle en V » dans la conduite de projets numériques, au profit du « mode produit » nécessitant ainsi une adaptation des compétences des agents et des méthodes employées. Le Campus du numérique public accompagne cette transition et développe actuellement un référentiel de compétences « Produit » pour faire transiter les équipes projet de la filière numérique vers ces nouvelles méthodes. De la même façon, le Campus développe des programmes métiers spécifiques pour professionnaliser les métiers du mode produit : un parcours « Directeur de produit numérique / Intrapreneur » est en cours d'expérimentation et viendra compléter une certification France Compétences déjà déployée pour les directeurs de produit et intrapreneurs de l'État.

## **Développer des expertises essentielles à la ré-internalisation des compétences numériques dans l'État**

Au-delà de transiter vers le « mode produit », le rôle du Campus est de développer des formations sur les expertises développées par la DINUM. Lors de ses forums trimestriels réunissant les référentes et référents formation de chaque ministère, plusieurs expertises d'intérêt ont été identifiées et permettent au Campus de concentrer ses efforts de formation sur des thématiques spécifiques parmi lesquelles : la donnée et l'intelligence artificielle, l'accessibilité numérique, le *design*, le numérique responsable (éco-conception et cadre réglementaire), l'agilité à impact, le *cloud*. Pour cet ensemble d'expertises, le Campus développe des référentiels de compétences par publics prioritaires (les agents de la filière numérique praticiens et experts, les agents de la filière du numérique hors de ces expertises et enfin les agents publics ayant besoin de disposer de compétences minimales sur ces thématiques). Sur ces référentiels, viendra s'adosser l'offre de formation du Campus présente au catalogue et accessible également *via* les marchés publics interministériels de formation au numérique.

Enfin, sur des expertises clés dont les besoins en ré-internalisation sont importants, le Campus mène une investigation sur les opportunités de reconversion d'agents publics vers des métiers du numérique.

## **LE CAMPUS DU NUMÉRIQUE PUBLIC : LA BONNE OFFRE POUR LA BONNE COMPÉTENCE**

L'ambition du Campus du numérique public repose sur une infrastructure de formation visant à proposer la bonne formation pour la bonne compétence aux agents publics. En effet, les compétences numériques évoluent vite et les programmes de formation doivent, en conséquence, s'adapter et s'actualiser tout aussi rapidement. Pour permettre cette agilité, les programmes de formation sont pensés comme des produits, permettant une

évolution itérative basée sur l'observation des besoins, les retours et l'appréciation des apprenants ainsi que l'impact métier.

## **Des produits de formation au plus près des besoins terrain**

Les produits de formation développés par le Campus sont issus des administrations et passés à l'échelle par leur interministérialisation et l'octroi d'un financement<sup>6</sup> afin d'adapter ces formations à un public interministériel, ou développés et expérimentés directement en interministériel. Ces programmes de formation visent à délivrer la bonne compétence à chaque agent : aussi, une approche personnalisée en amont des formations *via* une évaluation des compétences en début de parcours permet d'orienter les apprenants et d'adapter au mieux leur trajectoire apprenante à leur besoin. Très concrètement, une évaluation des compétences est menée au départ de chaque formation afin de permettre aux agents publics de se concentrer sur les modules et enseignement qui sont nécessaires. La volonté est ici de sortir de la logique "One size fits all" (format universel) et de rechercher l'impact au plus près du besoin de l'apprenant.

Par ailleurs, chaque produit de formation fait l'objet d'évaluations à 360° : par les apprenants, par les ingénieurs pédagogiques du Campus et par les formateurs. L'idée est d'adapter en permanence la formation, son contenu et ses modalités d'apprentissage en prenant en compte les enseignements de chaque session. C'est le cas par exemple du plan de formation au numérique des 220 directeurs d'administration centrale lancé fin 2023 proposé par le Campus en partenariat avec l'Institut national du Service public (INSP) et la délégation interministérielle à l'Encadrement supérieur de l'État (DIESE) qui a fait l'objet de mise à jour régulières pour s'adapter aux besoins identifiés. Avec cette approche, le Campus propose un catalogue de formation « adaptatif » et actualisé.

## **S'appuyer sur les expertises internes et propres aux formateurs internes**

Le numérique public dispose de plusieurs spécificités et les agents publics issus de la filière font parfois partie des meilleurs experts pour délivrer des formations. C'est pourquoi le Campus développe un vivier de formateurs internes occasionnels, experts du numérique, en capacité d'intervenir sur les programmes proposés sur des modules de formation qui ne sont pas externalisés. Le statut de formateur interne occasionnel donne l'opportunité à un agent public d'être partie prenante dans la conception des programmes et des parcours pédagogiques du Campus, de partager ses compétences et ses expériences. Cet engagement ponctuel dans les formations au numérique est rétribué et il a une double vertu : capitaliser sur l'expertise existante dans l'État notamment sur des thématiques qui lui sont propres et disposer d'une reconnaissance de cette expertise à travers le statut et la rétribution.

## **Partenariats avec les écoles du service public et organismes de formation continue de l'État**

Afin de mutualiser les efforts, les approches et les contenus, le Campus du numérique public s'appuie également sur les relais de la formation continue existants. Plusieurs programmes sont ainsi conjointement développés avec des écoles du service public ou

---

<sup>6</sup> Dans le cadre du Fonds de Transformation de l'action publique (FTAP), la DINUM pilote le guichet de financement « Campus du numérique ». Il permet de financer les administrations proposant des projets de formation au numérique.

des acteurs de la formation professionnelle des administrations. En novembre 2023, le Campus lançait par exemple le Cycle approfondi du numérique (CANUM) en partenariat avec l'École nationale de la Magistrature et l'École des Mines : un programme de plusieurs mois destiné aux cadres métiers (magistrats, directeurs de greffe, etc.) du ministère de la Justice amenés à prendre la direction de programmes numériques. Début 2025, le Campus inaugurera le programme « Data et politiques publiques » avec l'Institut national du service public (INSP) à destination des cadres supérieurs désireux de se former à la politique publique de la donnée. À travers cette approche partenariale, le Campus souhaite pouvoir toucher l'ensemble des agents de la fonction publique, de tous corps et de tous métiers.

Grâce à son approche collaborative et intrapreneuriale, le Campus du numérique public contribue à renforcer l'expertise interne en matière de numérique. Il joue un rôle central dans l'adoption des méthodes et expertises qui concourent à la réussite des projets numériques de l'État et à la montée en compétences de ses agents, garantissant une administration plus agile, innovante et performante face aux enjeux du XXI<sup>e</sup> siècle.

# La sécurisation des Jeux Olympiques et Paralympiques à l'ère du numérique : un pari réussi pour l'ANSSI

Par Bertrand LE GORGEU, Justine HAMON

et Thomas HAUTESSEERRES

Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI)

Dans un contexte de menaces cyber grandissantes, la sécurisation des Jeux Olympiques et Paralympiques (JOP) de Paris 2024 a été confiée à l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI). Chargée de protéger les systèmes d'information (SI) critiques et d'anticiper les risques cyber, l'ANSSI a mis en place une stratégie se déclinant en cinq axes : connaissance de la menace, cartographie de l'écosystème, la sécurisation des SI, la sensibilisation des équipes et une préparation opérationnelle intensive.

Grâce à cette approche holistique, les Jeux se sont déroulés sans incident cyber majeur, malgré les nombreuses tentatives d'attaque.

## PRÉPARER LA CYBERSÉCURITÉ DES JEUX OLYMPIQUES ET PARALYMPIQUES : UNE STRATÉGIE EN CINQ AXES

Dans un contexte de dépendance toujours plus grande au numérique, la protection des systèmes d'information s'impose comme un enjeu incontournable. Les cybermenaces ayant trait aux grands événements sont multiformes et peuvent émaner de cybercriminels, d'États ou d'activistes cherchant à voler des données, rendre indisponibles ou saboter des systèmes, porter atteinte à l'image d'organisations ou, plus simplement, monter des arnaques en ligne.

Compte tenu de la sensibilité de l'événement et du niveau de menace cyber, la Première ministre Élisabeth Borne a confié à l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI) le pilotage de la stratégie de prévention des cyberattaques en vue des Jeux Olympiques et Paralympiques (JOP). Un budget de 11 millions d'euros a été alloué à l'Agence pour sécuriser des entités jugées critiques pour l'organisation et le déroulement des JOP. Cela a été l'occasion pour l'ANSSI d'interagir avec des acteurs ne comptant pas parmi les bénéficiaires habituels<sup>1</sup> de ses services, tels que des sites de compétition sportive ou des acteurs de l'événementiel.

---

<sup>1</sup> Ces bénéficiaires sont : les organismes publics (ministères, institutions, juridictions, autorités indépendantes, collectivités territoriales) ; les opérateurs d'importance vitale ou OIV (opérateurs publics ou privés qui exploitent des équipements et des installations indispensables au fonctionnement et à la survie de la nation française) ; les opérateurs de services essentiels ou OSE (opérateurs qui fournissent un service essentiel dont l'interruption aurait un impact significatif sur le fonctionnement de l'économie ou de la société).

Cet événement unique par sa résonance planétaire a dû faire face à plusieurs défis : défi organisationnel, défi sécuritaire dans un contexte géopolitique dégradé, défi en matière d'image pour la France. La France a su relever ces défis : les JOP de Paris 2024 ont été salués comme une grande réussite. Un des facteurs de ce succès réside dans le renforcement de la cybersécurité de nombreuses entités publiques ou privées constitutives de l'écosystème des Jeux.

Cet article entend présenter les différents axes de la stratégie mise en œuvre par l'ANSSI dans le cadre de la préparation des JOP. Le premier – celui de la connaissance de la menace – a permis d'anticiper les risques. Le deuxième a consisté à identifier les acteurs de l'écosystème des JOP et leurs systèmes d'information les plus sensibles. La sécurisation des systèmes d'information et la sensibilisation des acteurs aux bonnes pratiques à adopter en matière de protection, de défense et de gestion de crise ont constitué les troisième et quatrième axes d'effort. Enfin, la préparation opérationnelle, déclinée au niveau de l'ANSSI, de l'interministériel et des acteurs de l'écosystème JOP, a été l'objet du dernier axe de travail.

## CONNAISSANCE DE LA MENACE

En raison de leur portée médiatique et de leur couverture mondiale, les JOP sont susceptibles d'attirer l'attention de divers acteurs malveillants qui pourraient chercher à profiter de ces événements pour acquérir une certaine visibilité et faire progresser leurs revendications en attendant à l'image et au prestige de ces compétitions comme à ceux du pays organisateur ou tout simplement en cherchant à obtenir des gains financiers par extorsion. Plus grave, certaines attaques informatiques pourraient contribuer à la réalisation d'actes terroristes physiques portant atteinte à la sécurité des biens et des personnes.

Ces diverses menaces pesant sur les JOP, les athlètes, les spectateurs, les organisateurs, leurs sous-traitants ou sur les collectivités accueillant les épreuves sont en outre amplifiées par la numérisation de ce type de manifestations. Celle-ci concerne aussi bien la planification et la logistique de l'événement, le déroulement des épreuves, la gestion des infrastructures que la rediffusion des épreuves sur de nombreux médias.

Pour ce qui est des compétitions, les principaux risques identifiés concernent des domaines variés tels que la billetterie, le contrôle d'accès, la gestion technique du site, le chronométrage ou le contrôle antidopage. Il est ainsi indispensable d'anticiper les probables motivations des attaquants, leurs capacités techniques offensives et les types de vulnérabilité qu'ils chercheront à exploiter.

## CARTOGRAPHIE DE L'ÉCOSYSTÈME

L'organisation des JOP fait appel à plusieurs centaines d'entités possédant chacune un grand nombre de systèmes d'information. Cartographier et catégoriser cet écosystème s'est avéré nécessaire afin d'orienter efficacement les actions de sécurisation et les efforts de l'ANSSI.

La connaissance de l'écosystème a démarré par le recensement des entités intervenant directement dans la tenue des JOP, avant de s'élargir à leurs prestataires et fournisseurs. Ces nombreux acteurs ont été répartis en trois catégories, en concertation avec la Coordination nationale de la sécurité des Jeux (CNSJ), le Comité d'organisation des Jeux Olympiques et Paralympiques (COJOP) Paris 2024 et le Délégué interministériel aux Jeux Olympiques et Paralympiques (DIJOP) :

- Les entités critiques dites de rang 1 : celles dont la compromission remettrait en cause l'ensemble des JOP et porterait gravement atteinte à la sécurité des biens et

des personnes ou à l'image de la France. Il s'agit par exemple de Paris 2024 ou du ministère de l'Intérieur.

- Des entités sensibles dites de rang 2 : celles dont la compromission aurait des conséquences importantes pour plusieurs épreuves et porterait une atteinte importante à la sécurité des biens et des personnes ou à l'image de la France. Il s'agit par exemple des sites de compétition.
- Des entités support dites de rang 3 : celles dont la compromission n'aurait pas ou peu d'impact sur le déroulement des épreuves mais pourrait perturber l'expérience des spectateurs ou des « riverains ». Il s'agit par exemple des hôpitaux à proximité des sites de compétition.

Pour certaines entités critiques disposant d'un nombre important de systèmes d'information, telles que Paris 2024 ou le ministère de l'Intérieur, la cartographie a été approfondie grâce à la mise en œuvre d'analyses de risques qui ont permis d'identifier les systèmes les plus critiques pour chaque « composante importante pour l'organisation dans l'accomplissement de sa mission »<sup>2</sup> ou valeur métier<sup>3</sup>.

Cette connaissance de l'écosystème a permis de calibrer les actions de sécurisation, de préparation et de sensibilisation au profit de l'écosystème des JOP.

## SÉCURISATION DES SI

Au regard de leur criticité, l'Agence a choisi de concentrer ses ressources internes sur les entités de rang 1 et de travailler avec des prestataires privés afin d'accompagner les entités de rang 2. Les entités de rang 3, les plus nombreuses, ont fait l'objet d'actions massifiées : incitation au déploiement des outils d'audit automatique des SI de l'ANSSI et actions de sensibilisation grâce à des campagnes d'*e-mailings*.

Pour les entités critiques, le soutien de l'Agence a pris la forme d'audits de sécurité suivis d'accompagnements techniques au bénéfice de certains systèmes d'information, menés par les équipes d'experts de l'ANSSI. Afin de fournir un accompagnement efficace, l'Agence s'est en particulier efforcée de bien comprendre les activités et les métiers associés aux JOP – accréditation, billetterie, gestion des accès aux sites, diffusion audiovisuelle, transports des accrédités, lutte anti-dopage, etc. – et d'en saisir les enjeux de sécurité.

Pour les entités sensibles, un programme doté de fonds spécifiques – 11 millions d'euros – a permis de démultiplier l'action de l'Agence en recourant à des prestataires privés spécialisés en cybersécurité. L'accompagnement a ainsi concerné une centaine d'entités, en particulier la plupart des sites de compétitions, les principales collectivités territoriales hôtes, quelques opérateurs publics, notamment dans le domaine de la gestion de l'eau, et quelques partenaires clés de l'organisateur Paris 2024 identifiés conjointement avec celui-ci. Les prestations ont pris la forme d'audits de cybersécurité, d'accompagnement à la sécurisation et d'assistance à la conduite d'un exercice de gestion de crise. Les sites de compétition ont en outre fait l'objet d'audits de contrôle.

Ce programme a également permis de financer le déploiement d'un service de détection d'attaques informatiques le temps des JOP, sous la forme d'un EDR managé (*End Point Detec-*

<sup>2</sup> ANSSI (2024), *EBIOS Risk Manager*, Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information, Paris, p. 94.

<sup>3</sup> Une valeur métier peut être un service, une fonction support, une étape dans un projet et toute information ou savoir-faire associé. Elle peut être vue comme un élément à protéger. Parmi les valeurs métier de Paris 2024, il y avait par exemple : la préparation et la livraison des sites, la communication et la promotion des Jeux...

tion and Response<sup>4</sup>) et de sondes de détection industrielles positionnées sur les systèmes d'information de 12 entités sensibles qui n'en disposaient pas. Ce service de détection a permis de déceler et de bloquer plusieurs tentatives d'attaque pendant la période des JOP.

Les actions de sécurisation pour l'ensemble des entités se sont également appuyées sur des outils d'audit automatiques proposés par l'Agence. Ces outils évaluent par exemple le niveau de sécurité d'un annuaire d'entreprise (AD ou *Active Directory*), ou cartographient les services actifs des serveurs d'une entité, en examinant ses ports de communication exposés sur Internet. Par les conseils qui accompagnent leurs constats, ces outils permettent aux entités de mener leur démarche de sécurisation en autonomie.

## SENSIBILISATION DE L'ÉCOSYSTÈME

L'ANSSI a conduit plusieurs actions de sensibilisation auprès de l'écosystème des JOP.

Plusieurs séminaires de sensibilisation cyber se sont tenus à l'ANSSI en amont des JOP. Il s'agissait notamment de faire des points d'étape sur la protection numérique de l'événement, de sensibiliser aux risques et de présenter les mesures permettant de les déjouer, ou encore de faire des retours d'expérience sur les exercices de crise massifiés déployés par l'Agence (voir *infra*).

Une campagne d'*e-mailing* a été organisée de mai 2023 à juin 2024, ciblant les équipes en charge de la cybersécurité des ministères, opérateurs régulés, organismes olympiques, villes hôtes, sites de compétition, fournisseurs de Paris 2024, etc. et leurs dirigeants. Plus de 600 personnes ont été destinataires de campagnes de sensibilisation thématiques. Il a en particulier été rappelé aux entités les démarches à effectuer pour alerter, mobiliser et réagir en cas de crise de nature cyber, invitant ainsi à contacter le CERT-FR<sup>5</sup> en cas de tentatives de connexion inhabituelles ou de détection d'activités suspectes sur les réseaux. Au-delà du traitement des attaques, le signalement des incidents est indispensable pour permettre une capitalisation de l'information sur la menace bénéficiant à l'ensemble de l'écosystème.

Enfin, les délégués territoriaux<sup>6</sup> et les coordinateurs sectoriels de l'ANSSI<sup>7</sup> sont allés au contact de l'ensemble de l'écosystème JOP de leurs périmètres respectifs afin de les sensibiliser aux enjeux cyber spécifiques aux JOP.

---

<sup>4</sup> Un EDR est une solution de sécurité informatique conçue pour détecter, analyser et répondre aux menaces sur les terminaux (ordinateurs, serveurs, appareils mobiles). Il surveille en temps réel les activités suspectes sur les terminaux et collecte des données pour faciliter les investigations. L'EDR permet également une réponse rapide, voire automatisée, aux incidents de sécurité, en neutralisant les menaces avant qu'elles ne se propagent.

<sup>5</sup> *Computer Emergency Response Team* ou Centre gouvernemental de veille, d'alerte et de réponse aux attaques informatiques. Le CERT-FR est porté par la sous-direction Opérations de l'ANSSI. Ses missions principales sont la réponse aux demandes d'assistance, le traitement des alertes et la réaction aux attaques informatiques, la détection des attaques au profit des services de l'État, la détection des vulnérabilités systèmes, la prévention des attaques informatiques, la coordination de la prévention et de la réponse à incidents avec les entités partenaires.

<sup>6</sup> Les délégués territoriaux coordonnent l'ensemble des activités de l'agence visant à améliorer la prise en compte des enjeux de sécurité numérique dans les régions. Parmi leurs missions figure l'élévation du niveau général de sécurité numérique des bénéficiaires en région.

<sup>7</sup> Les coordinateurs sectoriels ont pour mission de développer une expertise sectorielle dans 12 secteurs d'importance vitale, de développer des relations avec les bénéficiaires de l'agence qu'ils soient des opérateurs régulés ou des ministères et d'y mettre en œuvre la réglementation sectorielle, notamment la loi de programmation militaire et les directives européennes.

## PRÉPARATION OPÉRATIONNELLE DE L'AGENCE ET DE L'ÉCOSYSTÈME DES JOP

Au sein de l'Agence, une organisation exceptionnelle a été mise en place pour la préparation des Jeux. L'ANSSI s'est entraînée en interministériel dans le cadre des exercices Rugby 2022 et JOP 2023. La Coupe du monde de Rugby, a également permis à l'Agence de tester son organisation à grande échelle. Enfin, l'Agence a dispensé différentes formations spécifiques à ses agents en vue du dispositif opérationnel particulier déployé pendant les JOP. Le dispositif de veille, d'alerte et de réponse a ainsi été temporairement renforcé grâce à l'appui d'une trentaine de vacataires et la mobilisation de personnels internes.

Des renforts capacitaires pour la réponse à incident ont été mis en place. Les conventions signées en 2024 avec d'autres entités étatiques ainsi que la pré-contractualisation avec des prestataires de remédiation en incident de sécurité (PRIS) ont permis de démultiplier la capacité de réponse à incident de l'ANSSI et de prépositionner une équipe de réponse à incident en Polynésie française.

La préparation opérationnelle s'est étendue à l'écosystème au moyen d'exercices massifiés mis à disposition des entités de rang 2 par l'ANSSI. En outre, la création d'un groupe de partage a permis l'échange d'informations entre les entités de l'écosystème *via* un groupe TCHAP<sup>8</sup>. Ce groupe a notamment permis le partage d'adresses IP malveillantes lors d'attaques par déni de service (*Distributed Denial of Service* ou DDOS), d'opérations de balayage de ports ou *port scanning*<sup>9</sup>. Ce partage a facilité la mise en place d'actions d'endiguement.

## L'HÉRITAGE DES JOP POUR LA CYBERSÉCURITÉ DES GRANDS ÉVÉNEMENTS

La préparation de l'écosystème et le dispositif opérationnel mis en œuvre ont permis qu'aucun événement cyber n'affecte la tenue des cérémonies d'ouverture et de clôture ou les épreuves des JOP. Si un total de 548 événements de cybersécurité a été recensé par l'ANSSI entre le 8 mai, arrivée de la flamme à Marseille, et le 8 septembre 2024, date de la cérémonie de clôture des Jeux Paralympiques, leur impact a été faible ou nul. Ces événements se décomposent en 465 signalements (événements de sécurité d'origine cyber avec un impact faible pour le système d'information de la victime, requérant une intervention minimum de l'Agence) et 83 incidents (événements de sécurité pour lesquels l'ANSSI confirme qu'un acteur malveillant a conduit des actions avec succès sur le système d'information de la victime).

Après 4 ans de préparation et 3 mois de conduite des opérations, l'heure est à la capitalisation de la connaissance. Des retours d'expériences (RETEX) sont organisés sous forme d'entretiens afin de produire une synthèse des observations, des améliorations et des progrès mis en exergue au cours de la préparation et du déroulement de l'événement. Une liste de recommandations sera transmise aux homologues italiens et américains de l'ANSSI qui se préparent aux Jeux d'hiver de Milan Cortina 2026 et aux prochains Jeux Olympiques et Paralympiques de 2028. Enfin, ce RETEX servira également à l'organisation des Jeux d'hiver de 2030 en France.

<sup>8</sup> Service de messagerie instantanée de la fonction publique, proposé par la direction interministérielle du Numérique (DINUM).

<sup>9</sup> Technique utilisée pour identifier les ports ouverts ou vulnérables sur un serveur ou un réseau informatique. Il s'agit d'une méthode d'analyse permettant de détecter les services actifs sur une machine en examinant ses ports de communication.

# Digital technology for reindustrialisation

## 04 Introduction *Léo QUENTIN*

### THE NATIONAL AND EUROPEAN DIGITAL INDUSTRY

## 07 Semiconductors: pillars of innovation for a sustainable future *Frédérique LE GREVÈS*

The semiconductor industry plays a key role in addressing the societal challenges of energy transition and digital transformation. By making objects more connected, smarter, and less energy-consuming, chips enhance all the objects in our daily lives. STMicroelectronics, a global leader in semiconductors, illustrates the importance of innovation and mastery of the production chain.

The microelectronics industry, faced with technological, economic, and geopolitical challenges, requires massive investments in R&D and production capacities. The training and recruitment of qualified talents and the promotion of diversity are also major issues to ensure the competitiveness and sustainability of this strategic industry.

## 15 Challenges and opportunities of 5G networks for industrial companies *Philippe HERBERT*

Beyond the benefits for the general public, 5G constitutes a key lever of competitiveness and growth for the industry. The new possibilities and the advantages it brings, the low latency, the very high and secure throughput but above all the possibility of controlling network uses and connecting a large number of terminals and objects, make it a series of key challenges essential for the data-driven industry of the future.

5G brings a set of innovations to many key sectors of the economy, particularly for industry 4.0 (preventive maintenance, high-precision manufacturing, logistical tracking of a very large number of items, the multiplication sensors) but also for the telecom equipment and software market. All these opportunities are on the horizon, it's up to us to seize them.

5G thus stands out as a tool of industrial and economic sovereignty which is being implemented in front of us.

## 22 Cybersecurity: how can we meet the challenges of securing an increasingly interconnected industry? *Pierre-Yves JOLIVET*

The digital transformation of industrial processes is a prerequisite for the competitiveness of our industrial system and the reindustrialisation of France.

Begun more than 10 years ago, it has almost immediately been the subject of cyber attacks, particularly affecting critical industries, whether by rogue states or mafia groups.

The cybersecurity of industrial IT systems (known as *Operational Technologies* or OTs) presents particular challenges compared with the protection of conventional IT systems:

heterogeneity and age of the systems;

the complexity of analysing the impact of a cyber attack on the final operational system;

misunderstanding between information systems and operational teams;

the need to strike a balance between “safety” and cybersecurity constraints;

integration of new technologies, especially AI.

Only a partnership approach with global cybersecurity players with specific knowledge of their customers’ businesses can ensure that these challenges are met.

**29 Cybersecurity is a team sport -  
Voluntary standards, a solid defence  
Franck LEBEUGLE**

Digital technology has penetrated all our industries, and with it comes its corollary: Cybersecurity, identified by global insurers as the number one risk.

Cybersecurity is the ultimate collective issue: you cannot stay relevant if you’re not informed about new attack methods, if you’re not working within a network. If you’re not looking at what’s happening elsewhere, if you’re unaware of your obligations for tomorrow or the day after; if you’re not engaging with your peers, constantly sharing best practices and challenges. In this regard, standardization committees serve as real laboratories for experimentation and exchange.

We have chosen to dedicate half of this dossier to the Cyber risk, before addressing four related topics:

standards, daily allies for industries;

smart standards, our “near future”;

the digital passport for European products: a work in progress;

industry 5.0: enhanced operators.

**35 France’s digital strategy and  
its impact on industry  
Loïc DUFLOT**

France promotes a vision of digital technology that respects its values and is based on accessibility for all. Considering that digital technology is both a high-growth sector and a driver of competitiveness for the economy, the Directorate General for Enterprise (DGE) is focusing its efforts on three areas: democratising access to digital technology, innovating with technologies such as AI, and protecting sensitive data. The aim is to support the development of digital infrastructures while reducing their environmental footprint and working towards digital sovereignty.

## **THE DIGITAL TRANSFORMATION OF COMPANIES**

### **40 Artificial intelligence: between fears and hopes, what is the reality? *Gilbert CETTE & Éric CHANEY***

Artificial intelligence (AI) has been developing steadily over the last few decades, giving rise to fears of various kinds, in particular that it will destroy a huge number of jobs. In the face of the downward trend in labour productivity, AI is also raising hopes of a return to growth that will make it possible to finance the many challenges facing our societies. Future developments in AI will depend on the way in which economic players grasp it. While AI may have a marked effect on the productivity of firms that produce or use AI effectively, its macroeconomic impact remains uncertain. However, AI could transform the nature of jobs and, for example, slow down or reverse the trend towards job polarisation. For a number of reasons, including greater flexibility and lower risk-taking costs, the United States has a strong lead in the production and use of AI. Europe and France are therefore exposed to the risk of economic downgrading. It is therefore up to the public sector to support businesses in the use and production of AI, in order to reduce this risk.

### **48 The geopolitics of logistics and the role of digital technology *Maxime FOREST***

Logistics is an omnipresent part of the functioning of the economy, and will have a key role to play in the transformation of Europe's productive fabric. Its economic and environmental cost can be improved, in particular through increased digitisation and wider data circulation. Although promising in terms of optimising operations, this circulation remains limited at present. The stakes are not only economic but also political, because sovereignty depends on the performance of supply chains.

### **52 A cultural dialogue between industry and digital technology to boost industrial productivity *Arthur GAUDRON***

In a globalized environment, digital acculturation could be an important lever for the competitiveness of industry. The article highlights the necessary collaboration between "business" teams and "digital" teams in thinking about operational practices to benefit from the possibilities of digital technology. It also highlights the need for general management to participate in this acculturation process to take part in strategic decisions concerning these two fields of expertise. Finally, the article highlights the challenges to successfully carry out this dialogue and to provide a shared strategic decision. On one hand knowledge of operations management is the necessary condition, and on the other hand the evolution of practices which are desirable on a technical and operational level can be hampered by organizational dynamics.

- 57 **The digital twins of the systems**  
*Albert BENVENISTE, Yves CASEAU,*  
*Nicolas DEMASSIEUX, Patrick JOHNSON,*  
*Catherine LAMBERT, Jean-Luc MOLINER,*  
*Sophie PROUST & Gérard ROUCAIROL*

Digital twins have become increasingly important in industry and certain high value-added services, particularly for productivity and innovation. They give rise to increasingly complex systems that interact with each other. What follows, the result of a collective effort to understand them, describes their genesis and raison d'être, the main sectors in which they are used, their applications and how they relate to other digital technologies, the issues of platforms, standards and ecosystems that they generate, and the strategic challenges they face. The study's conclusions and recommendations are followed by a forward-looking perspective.

- 88 **The industry of the future: 10 years  
of French plans and international comparisons**  
*Betina JANNETEAU*

While the role of digitisation in industry as one of the responses to the challenges facing the industrial sector now seems to be generally accepted, the challenge now is to ensure that the entire industrial fabric can be modernised to reduce the growing polarity between large groups and SMEs and ETIs. To meet this challenge, numerous initiatives to raise awareness, provide funding and training, and support French solutions have been undertaken over the last ten years. The results have been encouraging, with, for example, industrial robot density rising from 132 robots per 10,000 employees in 2016 to 180 in 2022. Nevertheless, we are still lagging behind our direct foreign competitors. With the productivity gains that will be made possible by artificial intelligence, we find ourselves at a pivotal point where we need to seize the opportunity to ensure that its uses benefit French industry as a whole.

- 94 **5G Steel: the experience of ArcelorMittal France**  
*Damien SOLLER & David GLIJER*

Industry 4.0 is based on the integration of advanced digital technologies into production processes.

Mobility in Industry 4.0 refers to the use of mobile devices and wireless technologies to improve the flexibility and efficiency of operations. Smartphones, tablets, and other connected devices allow workers to access information and control processes remotely. With these convictions in mind, ArcelorMittal France has decided to launch a 4G/5G network deployment program.

The program consists of developing new uses in professions and work processes (production, quality, service, etc.).

- 104 **Building interoperable data spaces  
for the industry of the future**  
*Didier NAVEZ & Sébastien GÉRARD*

In a context of globalized value chain and heightened competition, industrial data spaces and ecosystems are crucial for improving the competitiveness and resilience of European organizations, addressing increasing regulatory requirements, and fostering innovation. In this article, we propose to explore trusted industrial

data spaces, and shed light on these collaborative ecosystems that facilitate the circulation and exchange of data between organizations. Key industrial data space initiatives are presented to illustrate technological advances in governance, security and interoperability, aimed at transforming the European manufacturing sector into an interconnected and resilient ecosystem.

**111 Continuing education: example  
of DINUM's Digital Campus**  
*Fadila LETURCQ & Stéphanie SCHAER*

As the digital transformation of the State and public services develops, the need to adapt the skills of public servants is becoming ever more pronounced. Whether it's a question of becoming acculturated to digital technology, acquiring new skills or developing expertise, employees in all three branches of the civil service are affected. It was with this in mind that the Public Digital Campus was set up, under the auspices of the Interministerial Digital Department (DINUM, placed under the joint authority of the Prime Minister and the Minister for the Civil Service, Simplification and Transformation of Public Action).

This article looks at the need for human transformation that accompanies the State's digital transformation and, more specifically, the challenges of ongoing digital training for civil servants to strengthen the ranks of the digital sector, a major ambition of the State's digital strategy published in 2023.

## MISCELLANY

**117 Securing the Olympic and Paralympic Games  
in the digital age: a successful gamble for ANSSI**  
*Bertrand LE GORGEU, Justine HAMON  
& Thomas HAUTESERRES*

Against a backdrop of growing cyber threats, the Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI) has been entrusted with securing the Paris 2024 Olympic and Paralympic Games. Responsible for protecting critical information systems (IS) and anticipating cyber risks, the ANSSI has put in place a five-pronged strategy: understanding the threat, mapping the ecosystem, securing IS, raising awareness among teams and intensive operational preparation.

Thanks to this holistic approach, the Games went ahead without any major cyber incidents, despite numerous attempted attacks.

*Issue editors*

*Léo QUENTIN and Anne-Lise THOUROUDE*

## Ont contribué à ce numéro

**Albert BENVENISTE, Yves CASEAU, Nicolas DEMASSIEUX, Patrick JOHNSON, Catherine LAMBERT, Jean-Luc MOLINER, Sophie PROUST, Gérard ROUCAIROL et Dominique VIGNON** sont membres de l'Académie des technologies. Leur biographie est disponible à l'adresse suivante : <https://www.academie-technologies.fr/les-academiciens/>

→ *Les jumeaux numériques des systèmes*

**Gilbert CETTE** est professeur à Neoma Business School où il enseigne la politique économique. Il a étudié et obtenu un doctorat d'économie à l'Université Paris-1. Avant de rejoindre Neoma BS, il a travaillé à la Banque de France et été professeur associé à l'Université d'Aix-Marseille. Le 31 octobre 2023, il a été nommé président du Conseil d'orientation des retraites (COR) en conseil des ministres. Avant cela, il a été président du groupe d'experts sur le Smic de 2017 à 2024. Il a présidé l'Afse (Association française de sciences économiques). Actuellement, il coprécide le séminaire emploi. Parmi d'autres positions, il est membre du Conseil national de la productivité (CNP).

Ses recherches et publications portent principalement sur les sujets de la croissance, de la productivité, de l'innovation, de l'économie du travail et des réformes structurelles. Il a également publié plusieurs ouvrages, le dernier en 2024 aux éditions De Boeck, intitulé « Travailleur (mais) pauvre ».

→ *Intelligence artificielle : entre craintes et espoirs, quelle réalité ?*

**Éric CHANEY** est Conseiller économique de l'Institut Montaigne et vice-président du Conseil de l'Institut des Hautes Études Scientifiques.

Précédemment, il a exercé les fonctions suivantes : Chef Économiste d'AXA, directeur de la recherche d'AXA IM ; Chef Économiste Europe chez Morgan Stanley ; Chef de la Division Synthèse conjoncturelle à l'Insee ; Chef de la Division Synthèse internationale de la direction de la Prévision ; Maître de Conférence à l'ENA. Il a été également membre du Conseil scientifique de l'Autorité des marchés financiers, du Conseil scientifique du Fonds pour la recherche d'AXA, du Conseil des Prélèvements Obligatoires et de la Commission Économique de la Nation.

Ancien élève de l'Ensaie-ParisTech et administrateur de l'Insee, il a été professeur de mathématiques et éditeur de l'Ouvert, publication de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

→ *Intelligence artificielle : entre craintes et espoirs, quelle réalité ?*

**Loïc DUFLOT** est ingénieur général des Mines et docteur en informatique. Après un début de carrière au sein de l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI), il rejoint une première fois la direction générale des Entreprises en tant que sous-directeur « réseaux et usages numériques » puis l'Arcep au sein de laquelle il est nommé directeur « internet, presse, postes et utilisateurs ». Il est aujourd'hui chef du service de l'économie numérique de la direction générale des Entreprises au sein du ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.

→ *La stratégie française en matière de numérique et son impact sur l'industrie*

**Maxime FOREST** dirige France Logistique depuis 2023. L'association présidée par Anne-Marie Idrac représente les acteurs privés de la filière française de la logistique et du transport de marchandises et co-anime, avec les pouvoirs publics, la stratégie nationale logistique. France Logistique rassemble les organisations professionnelles et les entreprises du secteur, en portant une voix unifiée pour tous les modes de transport de marchandises, les activités d'entreposage et les chargeurs.

De 2010 à 2021, il a occupé plusieurs postes à responsabilités en matière de réglementation et de régulation des télécoms, au sein du ministère de l'Économie et des Finances et du régulateur sectoriel (Arcep), en œuvrant au financement du déploiement de la fibre optique jusqu'à l'abonné et au déploiement des réseaux 4G et 5G, ainsi qu'à la coordination des actions des régulateurs au niveau européen.

Entre 2021 et 2023, il a rejoint l'Inspection générale des finances où il a piloté des missions d'évaluation et de conseil à destination des membres du Gouvernement.

→ *Géopolitique de la logistique et rôle du numérique*

**Arthur GAUDRON** est enseignant-chercheur au sein du Centre de Robotique Mines Paris – PSL. Sa recherche porte sur l'impact du numérique sur le management des opérations et de la *supply chain*. Il développe des travaux de recherche dans les domaines des sciences de l'ingénieur (optimisation, science des données et systèmes multi-agents) et des sciences de gestion (aide à la décision). Il est le responsable du Mastère Spécialisé Management Industriel et Systèmes Logistiques, et il est le titulaire de la chaire Logistique Urbaine.

→ *Un dialogue culturel entre industrie et numérique au service de la productivité industrielle*

**Sébastien GÉRARD** est Senior Fellow au CEA où il dirige le programme phare, Digital Collaborative and Cognified Engineering de l'institut CEA List. Ses recherches portent sur les systèmes complexes, l'ingénierie à base de modèles, la cognification, l'ingénierie des connaissances et la modélisation visuelle, les outils collaboratifs, la transformation numérique et son impact sur la société. Il représente le CEA à l'OMG depuis plus de 20 ans, a initié et dirigé pendant plus de 15 ans le projet *open-source* Papyrus ([www.eclipse.org/papyrus](http://www.eclipse.org/papyrus)), et il représente le CEA List au conseil d'administration de la fondation Eclipse. Le CEA éclaire la décision publique et apporte des solutions scientifiques et technologiques concrètes aux forces vives (entreprises et collectivités) dans les domaines majeurs pour la société : transitions énergétique et numérique, santé du futur, défense et sécurité globale. Premier organisme de recherche public dans le top 100 mondial des acteurs de l'innovation (Clarivate 2024), le CEA a un rôle de catalyseur et d'accélérateur d'innovation au service de l'industrie française. Il améliore la compétitivité des entreprises de tous les secteurs par la création de produits performants et différenciants et apporte des solutions novatrices pour éclairer les évolutions de notre société.

→ *Construire des espaces de données interopérables pour l'industrie du futur*

**David GLIJER**, titulaire d'un diplôme d'ingénieur et d'un doctorat en physique de l'École polytechnique, a travaillé dans différentes sociétés et centres de recherche en France et à l'étranger avant de rejoindre le groupe ArcelorMittal.

Dans le groupe, il a exercé différentes fonctions en R&D, au sein de la direction Technique Europe et en management de site de production avant de devenir support CEO et *chief digital officer* pour ArcelorMittal France.

Disposant d'une expérience de plus de 10 ans dans les domaines techniques et technologiques, avec des compétences complémentaires en management et finances, il a reçu plusieurs récompenses pour ses travaux et participé à des brevets ainsi qu'à de nouveaux développements chez ArcelorMittal dans le secteur technique.

→ *5G Steel : l'expérience d'ArcelorMittal France*

**Justine HAMON** est coordinatrice de projet à l'ANSSI, l'Agence nationale de sécurité des systèmes d'information. Dans le cadre du programme Jeux Olympiques et Paralympiques (JOP), elle a travaillé sur la planification, la coordination et le suivi des étapes qui ont

permis l'exécution efficace du programme de sécurisation de l'écosystème. Elle était intégrée au dispositif opérationnel de l'Agence pendant les Jeux.

→ ***La sécurisation des Jeux Olympiques et Paralympiques à l'ère du numérique : un pari réussi pour l'ANSSI***

**Thomas HAUTESSE** est architecte en sécurité des systèmes d'information à l'ANSSI. Dans le cadre de sa mission de conseil, il a accompagné les acteurs « critiques » des JOP dans l'identification de leurs risques cyber et dans la sécurisation de leurs systèmes d'information. Il était expert écosystème au sein du dispositif opérationnel de l'Agence pendant les Jeux.

→ ***La sécurisation des Jeux Olympiques et Paralympiques à l'ère du numérique : un pari réussi pour l'ANSSI***

**Philippe HERBERT**, a commencé sa carrière dans une *start-up*, Dassault Systemes, aujourd'hui leader mondial des logiciels de conception 3D et des solutions de gestion du cycle de vie des produits. De 1982 à 1996, il y a occupé différents postes de direction, il a notamment construit et dirigé la politique de partenariats et d'acquisitions en tant que directeur *business development*. De 1996 à 2003, il participe à la relance de l'implantation française/européenne du fonds d'investissement Américain Partech International. De 2003 à 2020, en tant que General Partner de Banexi Ventures Partners devenu Kreaxi, il a investi dans 25 sociétés. Il est notamment membre fondateur du Pass French Tech devenu le Next40 + FrenchTech120, membre du Conseil d'administration de plusieurs *start-ups* et de Wilco, membre actif au sein de la SATT Lutec et du pôle de compétitivité Cap Digital. Au sein de l'association française des investisseurs pour la croissance (France Invest) il a présidé pendant 4 ans la commission Financement de l'Industrie.

En octobre 2021, il est nommé président de la Mission 5G Industrielle par les ministres de l'Industrie, Agnès Pannier-Runacher et du Numérique, Cédric O, à l'issue de laquelle il publie un rapport sur la 5G industrielle en avril 2022. En 2023, les ministres de l'Industrie, Roland Lescure, et du Numérique, Jean-Noël Barrot, renouvellent la Mission 5G jusqu'à fin 2024. Il est ambassadeur France 2030.

→ ***Enjeux et opportunités des réseaux 5G pour les entreprises industrielles***

**Betina JANNETEAU** est diplômée de King's College London en affaires européennes. À la suite de l'obtention du concours d'attachée d'administration de l'État, elle a rejoint la direction générale des Entreprises et son service de l'Économie numérique début 2020 pour travailler sur l'agenda numérique européen (régulation des plateformes numériques, règlements sur les données et l'intelligence artificielle, présidence française du Conseil de l'Union européenne en 2022). Elle a ensuite rejoint le service de l'Industrie de la DGE en novembre 2022 où elle est aujourd'hui cheffe de projet industrie du futur. Elle travaille sur les enjeux de modernisation et automatisation de l'industrie française, ainsi que sur l'émergence de nouvelles solutions d'industrie du futur.

→ ***L'industrie du futur : 10 ans de plans français et comparaisons internationales***

**Pierre-Yves JOLIVET** est vice-président et *general manager* de la Business Line Cyber Digital Solutions au sein de l'activité mondiale Digital Identity and Security de Thales. Il était précédemment vice-président et *general manager* de la Business Line Cyber Defence Solutions au sein de l'activité mondiale Systèmes d'Information et Communications sécurisées de Thales. Il a rejoint Thales en 2027 en tant que directeur de la Stratégie et du Marketing de cette même activité.

Avant de rejoindre Thales, il était *managing director and partner* au Boston Consulting Group où il a dirigé le secteur Télécoms et Technologies en France, ainsi que Marketing B2B pour l'Europe et piloté ainsi les missions de conseil auprès d'entreprises internationales en France, en EMEA et aux États-Unis.

Diplômé de l'École polytechnique en 1996, il se spécialise ensuite dans le domaine des télécoms (Télécom Paris) et de l'économie (Université Paris Dauphine). Il a débuté sa carrière chez Alcatel-Telspan, avant de passer 5 ans en tant que chef de bureau au sein de la direction générale des Entreprises puis de la direction générale du Trésor.

→ ***Cybersécurité : comment relever les défis de la sécurisation d'une industrie de plus en plus interconnectée ?***

**Franck LEBEUGLE** est ingénieur général du Corps des Mines, diplômé de l'École nationale supérieure des télécommunications de Paris ainsi que de l'École polytechnique. Il dirige depuis 2020 les activités de normalisation pour le compte de la France : il s'agit des normes volontaires (standards), rédigées par et pour les entrepreneurs, les pouvoirs publics et les consommateurs. C'est à l'Afnor que se rencontrent tous ces acteurs, dans la recherche d'un compromis.

Les normes permettent à toutes et à tous de parler le même langage (interopérabilité) et d'étendre leurs activités et leur influence au niveau international. IA, biodiversité, égalité de genre, quantique... Tous ces sujets sont sur la table, dans l'intérêt de chacune des parties intéressées par la normalisation.

Auparavant, il a notamment été le directeur d'Afnor Certification pendant 6 ans, mais aussi le directeur des technologies de l'Autorité de Régulation de l'Audiovisuel, qui durant son mandat a géré le passage complet à la diffusion vidéo numérique afin de libérer les chaînes 4G, ainsi que la migration des systèmes d'information internes de l'Autorité vers le schéma gouvernemental *opendata*.

Il a été précédemment le responsable du département de la distribution des médias télévisuels, puis le directeur adjoint des technologies, de l'Autorité de régulation de l'audiovisuel français.

→ ***La cybersécurité est un sport collectif - Les normes volontaires, une défense solide***

**Bertrand LE GORGEU** est chef adjoint de la division industrie et technologies de l'ANSSI. Il était auparavant responsable du programme JOP au sein de l'Agence. Pendant 4 ans, il a coordonné les ressources internes et externes de l'Agence pour sécuriser un écosystème composé de plus de 500 entités. Pendant la période des Jeux, il faisait partie du centre opérationnel stratégique de l'agence.

→ ***La sécurisation des Jeux Olympiques et Paralympiques à l'ère du numérique : un pari réussi pour l'ANSSI***

**Frédérique LE GREVÈS** occupe le poste de présidente de STMicroelectronics France et vice-présidente exécutive en charge des Affaires publiques pour l'Europe et la France, depuis mars 2021.

Elle a débuté sa carrière en 1990 dans le marketing et la communication au sein de différentes entreprises internationales en Europe et aux États-Unis. De 1995 à 2003, elle occupe la fonction de directrice Communications d'Aptiv (ex-Delphi Automotive Systems) pour la région EMEA. En 2003, elle rejoint Nissan Motors en tant que vice-présidente Communications pour l'Europe puis, en 2004, vice-présidente Communications de Nissan Amériques à Los Angeles. En 2008, elle revient en France où elle rejoint Renault en tant que vice-présidente en charge de la communication institutionnelle pour le Groupe. Deux ans plus tard, elle étend ses fonctions en devenant vice-présidente Communications ainsi que directrice adjointe du directeur Marketing et Communications Monde, avant d'être nommée chef de cabinet du PDG de l'Alliance Renault Nissan Mitsubishi en 2011.

En avril 2022, Frédérique Le Grevès a été nommée présidente du Comité stratégique de Filière des Industries électroniques (CSF) en France et en décembre 2023, vice-présidente de l'European Semiconductor Industry Association (ESIA). Elle est également membre indépendant du Conseil de Surveillance de TRIGO Holding depuis mai 2021, siège au

comité stratégique de Clinatec depuis octobre 2021 et a rejoint le conseil d'administration d'ESSO SAF en juin 2024.

Frédérique Le Grevès a été promue Chevalier dans l'Ordre National de la Légion d'Honneur par le ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique en janvier 2023.

Elle est titulaire d'un master en gestion d'entreprise de Paris School of Business (1991) et diplômée du Senior Executive Program de la London Business School (2019).

→ ***Les semi-conducteurs : piliers de l'innovation pour un avenir durable***

**Fadila LETURCQ** a rejoint la DINUM en 2020 après un début de carrière dans le secteur privé (grands groupes, firmes de conseil et *think tanks*) pour développer le conseil interne en transformation numérique des politiques publiques. Elle se consacre aujourd'hui à développer les compétences numériques des agents publics en développant l'offre du Campus du numérique public.

→ ***Formation continue : exemple du Campus du numérique de la DINUM***

**Didier NAVEZ** est senior vice president, Data Policy & Governance chez Dawex. Dawex est le *leader* technologique des solutions d'échange de données pour partager et distribuer des *data products*, en toute confiance, selon les exigences de sécurité, de traçabilité et de conformité aux réglementations sur les données, et créer des écosystèmes de données répondant aux enjeux économiques, environnementaux et d'IA.

Dans le cadre de ses fonctions, il collabore avec des organismes de réglementation, des *think tanks* et des institutions européennes et internationales afin de contribuer à la définition de politiques, de cadres, de normes et des meilleures pratiques en matière de données. Il accompagne également les organisations dans la compréhension des bénéfices et des impacts des réglementations relatives aux données sur leurs activités. *Leader* d'opinion dans les domaines de stratégie numérique, des stratégies d'échange et monétisation des données, du commerce électronique et des stratégies mobiles, il a travaillé pendant plus de 10 ans pour les cabinets d'études Gartner et Forrester, conseillant les dirigeants de grandes entreprises privées et organisations publiques pour leurs initiatives de transformation numérique, en Europe et en Amérique du Nord.

→ ***Construire des espaces de données interopérables pour l'industrie du futur***

**Léo QUENTIN** est un ancien élève de l'École normale supérieure et de l'École des Mines, et ingénieur des Mines. Il a débuté sa carrière à l'Arcep en 2021, où il a d'abord travaillé sur l'accès des entreprises à la 5G, puis est devenu responsable des nouvelles compétences de l'Arcep sur la régulation du *cloud* et des services d'intermédiation de données.

→ ***Introduction***

**Stéphanie SCHAER**, ingénieure générale des Mines, est, depuis septembre 2022, la directrice interministérielle du numérique (DINUM).

Ancienne élève de l'École polytechnique (1997), elle est également diplômée de l'École nationale supérieure des télécommunications / Télécom Paris.

Son parcours professionnel est notamment marqué par des passages à la direction centrale de la sécurité des systèmes d'information (DCSSI devenue ANSSI) de 2002 à 2006 puis au ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi où elle est chargée de mission sur l'électronique embarquée puis chef du bureau de l'Industrie du logiciel de la direction générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services en 2008.

Elle devient plus tard directrice régionale adjointe des Entreprises, de la Concurrence, de la Consommation, du Travail et de l'Emploi (Direccte) de Bourgogne, puis de Bourgogne-Franche-Comté. En parallèle, en 2015, elle lance en tant qu'intrapreneuse la *start-up* d'État Signaux Faibles, qui permet de détecter précocement, pour mieux les accompagner, les entreprises en difficultés grâce à des données détenues par les administrations. Ce service, aujourd'hui déployé dans l'ensemble de la France, a bénéficié de programmes d'ac-

compagnement de la DINUM : les entrepreneurs d'intérêt général (EIG) et le programme d'incubation des *start-ups* d'État, Beta.gouv.

Stéphanie Schaer devient en 2019 directrice adjointe du cabinet d'Élisabeth Borne, au ministère de la Transition écologique et solidaire puis au ministère du Travail où elle sera ensuite nommée à la tête du cabinet, puis à Matignon, en mai 2022, en tant que conseillère auprès de la Première ministre.

→ ***Formation continue : exemple du Campus du numérique de la DINUM***

**Damien SOLLER**, Ingénieur Civil des mines (E99), a travaillé 15 ans dans le conseil et les télécoms avant de rejoindre l'industrie minière et métallurgique sur les sujets de transformation digitale. Il rejoint ArcelorMittal France en 2022 en tant qu'adjoint du responsable de département infrastructure et prend la direction du programme 5G Steel.

→ ***5G Steel : l'expérience d'ArcelorMittal France***

**Anne-Lise THOUROUDE** est une ancienne élève de l'École polytechnique et de l'École nationale supérieure des Télécommunications, et ingénieur en chef des Mines. Après un début de carrière en 2006 à la direction générale des Entreprises au sein du ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, elle rejoint le Secrétariat général du ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance, en 2014 sur des fonctions de développement applicatif et de transformation numérique du ministère. Elle part ensuite à l'Arcep, sur des fonctions d'innovation et de prospective en matière de fréquences entre 2019 et 2022. Elle est actuellement en charge de la sous-direction du Numérique de l'administration centrale des ministères économiques et financiers, au Secrétariat général.