



## COMITÉ STRATÉGIQUE DE FILIÈRE

# SOLUTIONS INDUSTRIE DU FUTUR 2021 - 2023



**Comité d'Orientation de la Recherche et de  
l'Innovation pour l'industrie du Futur  
-CORI2DF-**

**Feuille de Route technologique**



**Décembre 2022**



## Table des matières

1	Introduction .....	3
2	Les enjeux de la filière « Solutions pour l'Industrie du Futur » .....	5
2.1	Souveraineté industrielle.....	5
2.2	Décarbonation .....	6
2.2.1	Circularité et durabilité .....	6
2.2.2	Décarbonation de l'industrie.....	7
3	Les technologies capacitanes pour répondre à ces enjeux .....	7
3.1	Automatisation : robotique & machines intelligentes .....	8
3.2	Fabrication additive .....	8
3.3	La numérisation de l'industrie : Données et systèmes distribués.....	9
3.3.1	L'usine connecté (Ilot Internet des objets industriel) /5G /Edge/Cloud) .....	9
3.3.2	Blockchain .....	10
3.3.3	Cybersécurité .....	10
3.4	Chaine numérique .....	10
3.4.1	Jumeau numérique.....	10
3.4.2	Ingénierie des Modèles et des Systèmes .....	11
3.5	Intelligence artificielle .....	11
4	L'écosystème des principales filières utilisatrices .....	12
5	Recommandations & Propositions .....	14
5.1	Enjeux sociétaux de la filière .....	15
5.1.1	Economie circulaire & durabilité.....	15
5.1.2	Décarbonation des process .....	16
5.1.3	Efficacité énergétique .....	16
5.2	Socle technologique .....	17
5.2.1	Intelligence artificielle .....	17
5.2.2	Systèmes distribués.....	17
5.2.3	Chaine numérique .....	18
5.2.4	Automatisation : Robotique & Machines intelligentes.....	19
5.2.5	Fabrication additive.....	20
	Récapitulatif des 11 recommandations.....	21
	Annexes .....	24

# 1 Introduction

Il est urgent de donner à la France les moyens de redevenir une grande puissance industrielle. Depuis le début des années 2000, le pays subit une désindustrialisation constante avec une part de l'industrie manufacturière qui a lourdement chuté dans le PIB national. Longtemps considérée comme une évolution nécessaire de l'économie et de la société comme un passage obligé pour entrer dans la société post-industrielle, la « tertiarisation de l'économie » se caractérise par le remplacement de la prépondérance des activités industrielles celle des services. Les différentes crises qui nous secouent, en commençant par la crise sanitaire à laquelle se sont rajoutées la guerre en Ukraine et les crises climatique et énergétique, ont mis en lumière les fragilités que cette désindustrialisation entraîne pour l'ensemble de la société et la nécessité, pour des raisons de souverainetés, de retrouver une souveraineté industrielle. La filière « solutions pour l'industrie du futur » est incontournable pour réussir cet objectif.

La valeur ajoutée manufacturière de l'Allemagne est restée relativement stable de 1998 à 2019 passant de 18 à 20% alors qu'en France elle passait sur la même période de 13 à 10%. De même les capacités de production manufacturière de la France ont baissé de 10% depuis la crise de 2008 quand celles de l'Allemagne ont progressé de 20%.

Dans ce contexte préoccupant, les Pouvoirs publics ont pris une série de mesures, dont certaines visent plus particulièrement les PME industrielles, avec la relance du Conseil National de l'Industrie et signature des contrats de filière, les plans France Relance puis France 2030, comprenant des dispositifs tels que la baisse des impôts de production ou l'AMI Solutions Industrie du Futur annoncé en oct 2021.

Afin de renforcer la compétitivité de son industrie, l'Allemagne a déployé le programme « Industrie 4.0 » afin de soutenir la numérisation et l'automatisation de ses chaînes de production. Ce paradigme essentiellement technologique, centré sur l'émergence d'objets cyber-physiques offre une promesse d'efficacité accrue grâce la connectivité numérique et à l'intelligence artificielle.

Cependant, le paradigme de l'industrie 4.0, tel qu'il est actuellement conçu, n'est pas adapté à un contexte de crise climatique et ne répond pas aux tensions sociales profondes. Au contraire, elle est structurellement alignée sur l'optimisation des modèles commerciaux et de la pensée économique qui sont en partie à l'origine des menaces auxquelles nous sommes confrontés aujourd'hui. L'industrie 4.0 manque des dimensions clés qui sont indispensables pour rendre possible la transformation systémique de l'industrie et pour assurer le découplage nécessaire de l'utilisation des ressources et des matériaux des impacts environnementaux, climatiques et sociétaux négatifs. Ces dimensions comprennent :

- Les caractéristiques régénératrices de la transformation industrielle, afin d'embrasser à la fois l'économie circulaire et les boucles de rétroaction restauratrices positives non pas après coup, mais comme un pilier clé de la conception de chaînes de valeur entières ;
- Une dimension intrinsèquement sociale, exigeant une attention au bien-être des travailleurs, au besoin d'inclusion sociale et à l'adoption de technologies qui ne remplacent pas, mais plutôt complètent et augmentent les capacités humaines chaque fois que possible ; et
- Une dimension environnementale obligatoire, qui conduit à promouvoir une transformation qui élimine progressivement l'utilisation des combustibles fossiles, favorise l'efficacité énergétique, s'appuie sur des solutions fondées sur la nature, régénère les puits de carbone, restaure la biodiversité et élabore de nouvelles façons de prospérer dans une interdépendance respectueuse avec les systèmes naturels.

Pour éclairer les évolutions à venir des technologies de l'industrie, le Comité stratégique de filière Solutions pour l'Industrie du Futur a mis en place un « Comité d'Orientation de la Recherche et de l'Innovation pour l'Industrie du Futur » (CORI2DF), avec pour objectif de définir les paradigmes qui replacent au premier plan notre capacité à maîtriser l'outil productif en termes de souveraineté industrielle.

Le CORI2DF partage avec l'ESIR (Economic and Society Impact of Research and Innovation) une vision très proche appelé « Industrie 5.0 ». La vision de « l'industrie 5.0 » va au-delà d'une focalisation sur la technologie ou la croissance économique vers une vision axée sur le progrès humain et le bien-être, sur de nouvelles formes de création de valeur économique durable, circulaire et régénératrice. Plutôt que de représenter un bond en avant technologique, l'Industrie 5.0 imbrique l'approche de l'Industrie 4.0 dans un contexte plus large, en fournissant un objectif et une direction à la transformation technologique de la production industrielle pour la prospérité des personnes et de la planète.

Cette approche a des conséquences pour la stratégie industrielle car elle répond à de nouvelles orientations économiques pour la performance de l'industrie, une nouvelle conception des modèles commerciaux, des chaînes de valeur et des chaînes d'approvisionnement, un nouvel objectif pour la transformation numérique, de nouvelles approches de l'élaboration des politiques en partenariat avec les entreprises et l'industrie, de nouvelles capacités et approches de la recherche et de l'innovation ainsi que des stratégies verticales et la cohérence horizontale en agissant à tous les niveaux par le biais de normes internationales. Elle s'appuie sur les enseignements récents de la pandémie de COVID et le besoin fondamental de renforcer la résilience à travers les chaînes de valeur et de sécuriser la vie et les moyens de subsistance des personnes.

Afin de formaliser cette vision et les moyens pour y parvenir, le CORI2DF a mis en place un groupe de travail (Task Force) ayant pour objectif de fixer les directions à prendre à travers une feuille de route avec pour objectifs de cerner :

- Les enjeux majeurs que doit relever la filière en définissant une véritable ambition qui distinguera l'industrie française ;
- L'identification de problématiques communes à plusieurs filières et les véritables enjeux de rupture technologique ou incrémental ;
- Le passage à l'échelle, en particulier sur le déploiement de solutions identifiées ou sur l'accélération des phases de maturations industrielles ;
- Le développement et le transfert des technologies pour accompagner la transformation des entreprises offreurs de solutions au meilleur niveau mondial en intégrant des objectifs de souveraineté, d'efficacité énergétique et de décarbonation ;
- La fourniture de solutions technologiques pour supporter les nouvelles filières industrielles comme les filières hydrogène ou batteries ;
- La facilitation de l'accès des PME/ETI aux technologies clés ;
- Le travail en lien avec les travaux de normalisation et réglementation des industriels.

Le groupe de travail a, en particulier, examiné les technologies transversales clefs pour la filière et leur impact au service des filières avales et des marchés émergents à forts enjeux de souveraineté et de décarbonation :

- **Technologies capacitantes** : automatisation, fabrication additive, chaîne numérique, systèmes distribués, intelligence artificielle ;
- **Filières Avales fortement impactées**
  - Agroalimentaire
  - Bois
  - Chimie et matériaux
  - Mines et métallurgie
  - Nouveaux systèmes énergétiques (avec un focus sur l'hydrogène et les batteries)
  - Construction automobile
  - Aéronautique et l'aérospatial
  - Industrie de la Mer
  - Transport maritime et ferroviaire
  - Nucléaire
  - Industries et technologies de la santé

De l'ensemble de ce travail, il ressort les **considérations stratégiques et grandes recommandations suivantes pour les technologies transversales**.

## 2 Les enjeux de la filière « Solutions pour l'Industrie du Futur »

A travers les plans France Relance à l'automne 2020 puis France 2030 lancé fin 2021, la France ambitionne de répondre aux grands défis de notre société, en particulier écologiques, industriels, sociaux et de souveraineté économique d'un monde en évolution. Ces défis s'adressent non seulement aux secteurs clés de l'économie française mais aussi aux industriels de la filière S-I-F afin qu'ils permettent aux secteurs clés de l'économie française de bénéficier des meilleures solutions de manufacturing.

Pour cela la filière a défini des enjeux qui rejoignent à la fois les défis de la société française et la vision portée par l'Europe à travers l'industrie 5.0. Ces enjeux auxquels ambitionne de répondre la filière sont en premier lieu la souveraineté industrielle et, pour répondre aux défis écologiques, la décarbonation de l'industrie.

### 2.1 Souveraineté industrielle

Alors que la désindustrialisation latente de l'industrie française a longtemps été vue comme un passage obligé vers une ère « post-industrielle » découlant de facteurs tels que l'externalisation de certaines fonctions tertiaires vers des entreprises de services ou des gains de productivité, la France a concédé dans les années passées des parts de marché signe visible d'une érosion de sa souveraineté économique. Entre 2020 et 2022, les conséquences concrètes des crises liées à la pandémie de Covid-19, aux tensions sur les matières premières et au conflit russo-ukrainien ont mis en lumière cette perte de souveraineté. Regagner cette souveraineté conduit à définir des politiques actives de relocalisation de produits jugés stratégiques, mais aussi d'engager une politique industrielle de rattrapage technologique au travers de la construction d'avantages comparatifs dans certaines productions.

Pour s'attacher à reconstruire enfin la souveraineté industrielle de la France et initier une politique ambitieuse de reconquête économique, la filière propose, à l'issue d'un diagnostic profond, de se concentrer sur cinq technologies capacitantes qui sont détaillées en annexe :

- Automatisation : cobotique, robotique flexible, machines intelligentes ;
- Fabrication additive ;
- Continuité numérique : jumeau numérique, ingénierie dirigée par les modèles ;
- Systèmes distribués : 5G/edge/cloud, blockchain, cybersécurité ;
- Intelligence artificielle : intelligence artificielle, big data, machine learning, chatbot...

## 2.2 Décarbonation

### 2.2.1 Circularité et durabilité

Le modèle actuel de l'industrie est linéaire. Il consiste à « extraire, produire, consommer et jeter », avec comme principe directeur la recherche d'une croissance infinie. Or, les ressources sur lesquelles se fonde cette croissance ne le sont pas et les impacts environnementaux de notre modèle de société se font de plus en plus alarmants.

Au regard des défis environnementaux et économiques actuels, **l'industrie du futur** doit être circulaire. La crise sanitaire est venue réaffirmer la nécessité d'une transition du tissu industriel vers plus de robustesse et de sobriété. Constitutive d'une plus grande résilience face aux chocs, l'économie circulaire s'impose comme boussole pour la (ré)industrialisation promue dans le Plan France 2030. L'objectif de l'industrie circulaire est de valoriser et d'optimiser la gestion au plus près de la demande pour minimiser ses impacts sur l'environnement, en intégrant toute la chaîne de valeur dans des leviers de circularité.

Passer à l'industrie circulaire est source d'innovations et ouvre des opportunités vers de nouveaux marchés. Cela permet d'anticiper les contraintes réglementaires et les évolutions de la demande, qui affirme de plus en plus une préférence pour des offres responsables.

L'industrie 4.0 a déjà permis une optimisation du recyclage et des flux énergétiques au cœur de l'usine ce qui réduit l'impact environnemental. Toutefois, le cœur d'usine représente rarement plus de 5% de leur empreinte environnementale. Ces progrès demeurent donc parcellaires. Le modèle qui prédomine dans l'industrie reste fragile et la transformation engagée jusqu'à présent inadaptée pour faire face aux contraintes, non pas à venir mais actuelles. Une stratégie d'économie circulaire peut également être un vecteur d'innovation et de croissance. En permettant de coupler les objectifs économiques de l'entreprise à la production d'impacts socio-environnementaux positifs, l'économie circulaire permet de se différencier sur le marché.

Le passage à l'échelle de l'industrie circulaire pourra advenir grâce à la constitution d'un cadre structurel incitatif, relevant à la fois du réglementaire, de l'économique et du changement de comportement. Tous ces leviers doivent donc être actionnés afin de faire émerger une industrie du futur circulaire.

Il est nécessaire que la filière s'empare des technologies clés de l'économie circulaire pour prendre une place de leader sur cette vision qui irrigue de plus en plus l'industrie. Parmi ces technologies notons :

- L'analyse du cycle de vie : il s'agit de passer d'une analyse longue et couteuse, manuelle et donc sujette à l'erreur humaine à une analyse beaucoup plus automatisée grâce à l'usage de jumeaux numériques et d'ingénierie dirigée par les modèles (**continuité numérique**)
- Le traitement des déchets incluant le tri & le recyclage : **l'intelligence artificielle** intégrée aux infrastructures de recyclage permet d'optimiser le tri et donc d'améliorer la qualité des matières recyclées. En l'intégrant avec des capteurs (essentiellement des **capteurs optiques**) à un **robot**, cela lui permettra d'interpréter des images des déchets prises et d'assumer ainsi des décisions autonomes concernant le tri.

- La traçabilité : les outils numériques permettent le suivi, notamment **l'internet des objets, RFID, capteurs**. La **blockchain** permet de valider l'infaisabilité des données et le suivi des divers éléments des produits.
- Collecte et traitement des données : L'**IIoT** intégrant **l'edge computing** et le **cloud computing** ainsi que **l'intelligence artificielle** permet une analyse des processus d'entreprises, l'identification des inefficiences et les pistes d'optimisations. Il permet également d'anticiper et gérer les consommations (en matières, biens, services, énergie) pour produire au plus juste et éviter les pertes.

### 2.2.2 Décarbonation de l'industrie

La décarbonation est aujourd'hui un enjeu majeur dans l'industrie. Il est nécessaire pour les entreprises de définir une stratégie claire pour décarboner, que cela concerne les émissions liées à la fabrication des produits, et bien sûr aux consommations directes d'énergies fossiles dans les usines. Une étude<sup>1</sup> montre que la réindustrialisation, en particulier des filières les plus intensives en consommation de CO<sup>2</sup> aura non seulement des conséquences économiques positives mais pourra contribuer à diminuer l'empreinte carbone de la France, quand bien même elle engendrerait une augmentation des émissions de l'industrie, et ce sans considérer un effort particulier pour rendre l'industrie plus performante en termes d'émission.

Les outils numériques permettent ce suivi, notamment **l'internet des objets, RFID, capteurs, passeports produit...** En utilisant un système de registre numérique décentralisé et infalsifiable, la **blockchain** valide et enregistre tous les événements (**systèmes distribués**).

La filière doit aussi proposer des solutions pour les technologies de transformation du carbone tel que les électrolyseurs à eau haute température. En lien avec les industries de la filière Chimie & Matériaux, la filière S-I-F doit proposer des solutions innovantes intégrant **nouveaux procédés de fabrication des matériaux et membranes**, suivi des matières (**IIoT**), ingénierie pour mieux gérer les procédés, etc (**Systèmes distribués**).

## 3 Les technologies capacitantes pour répondre à ces enjeux

Les enjeux de souveraineté, de décarbonation et de frugalité ne pourront être relevés que par la capacité à innover des acteurs parties prenantes de la chaîne de valeur de la filière S-I-F. Notre feuille de route doit donc permettre **d'embarquer un maximum des acteurs industriels qui la constitue** (cf. Contrat de Filière "*Le principal défi R&D&I du contrat de filière sera celui de réussir à embarquer un tissu industriel de l'offre très atomisé, composé de grands acteurs autant que de plusieurs milliers de PMI*) pour leur permettre notamment de pouvoir capter la valeur ajoutée générée par le numérique. Il convient également de prendre en compte la transversalité à plusieurs filières de l'offre technologique.

La compétition étant internationale, la feuille de route doit également privilégier les programmes permettant de rassembler les forces vives des écosystèmes technologiques et scientifiques basés par exemple sur des collectifs regroupant des Instituts Carnot, des CTI, des laboratoires CNRS (cf. Contrat de Filière « *Créer un CORI2DF pour fédérer les différents écosystèmes de soutien de l'innovation* »)

Le choix des socles des technologies capacitantes a été fait en se concentrant sur des travaux de recherche applicatifs rapidement transférables auprès des offreurs de solutions, avec un usage dans des filières utilisatrices et en mettant en évidence les technologies qui permettent à notre industrie soit d'acquiescer ou de renforcer une position de leadership soit de rattraper un retard pour des technologies considérées comme souveraines. Cela a permis de mettre en évidence **5 technologies capacitantes** qui sont décrites ci-dessous et détaillées dans **les annexes**.

<sup>1</sup> Le redéploiement industriel, un enjeu social, économique et un instrument de maîtrise de notre empreinte carbone, étude d'impact de la désindustrialisation sur l'empreinte carbone de la France, Deloitte, Janvier 2021

### 3.1 Automatisation : robotique & machines intelligentes

La collaboration entre robots et hommes offre des solutions pour s'affranchir des tâches répétitives, assurer une meilleure précision et la répétabilité. Les déplacements au sein de l'usine se voient simplifiés et autonomes. Ainsi l'homme se concentrera sur des tâches à plus forte valeur ajoutée nécessitant davantage de précision et d'habileté. Le robot devient un collaborateur conçu pour permettre aux opérateurs de le faire intervenir dans la ligne de production quand un besoin le requiert, contrairement aux robots traditionnels dévolus exclusivement à l'amélioration de la cadence.

En complément à la robotique, les « machines intelligentes » désignent les machines capables de générer et d'interpréter des données de fabrication. La mise en œuvre de machines intelligentes implique d'intégrer les briques technologiques suivantes :

- Contrôle commande sensori moteurs ;
- Capteurs et stratégies d'instrumentation ;
- Protocole de connexion des machines à leur environnement ;
- Interaction, perception, coopération et gestion de la sécurité (cf. *fiches socle technologies capacitantes « La numérisation de l'industrie : données et systèmes distribués »*) ;
- Gestion de l'énergie embarquée ;
- Cybersécurité ;
- Algorithmie métiers : techniques d'interprétation des données et de prises de décision qui permettent une action en (quasi) temps réel sur les paramètres process ou toutes autres commandes de la machine-outil. (cf. *fiches socle technologies capacitantes « Continuité numérique/Jumeau numérique »* et « *Intelligence Artificielle pour l'industrie 5.0* »).

L'objectif est d'améliorer et d'accélérer les techniques d'interaction humains-robots afin de créer des robots **collaboratifs plus intuitifs** dans leurs utilisations et **plus autonomes** dans leurs mouvements. En parallèle à la « cognification » de la robotique et des machines devenues « intelligentes », il faut développer de nouveaux concepts de **conception mécanique avec la création de robots plus innovants** afin d'avoir de plus grand rayon d'action, une plus grande manipulabilité et une plus grande autonomie énergétique. Les futurs robots devront comprendre, communiquer et se fondre en toute sécurité avec les humains.

Les connexions avec l'IA sur le développement d'algorithmes de perception et d'interaction avec l'humain sont réelles, mais se démarquent clairement des recherches actuelles dans ce domaine, car les contraintes et les objectifs liés à la génération temps-réel du mouvement (systèmes embarqués), la rétroaction liée à la perception (commande) et la prise de décision sont spécifiques à la robotique et nécessite des efforts très importants de recherche pour répondre à ces besoins spécifiques.

### 3.2 Fabrication additive

La fabrication additive est considérée comme une technologie « disruptive » pour produire un nombre limité de composants de grande valeur avec des géométries et des fonctionnalités complexes topologiquement optimisées qui ne sont pas réalisables par la fabrication traditionnelle. La réalisation de ce potentiel pour les applications du monde réel est bridée par le manque d'outils de conception standard ; les caractéristiques des matières premières, les dimensions des machines pour les pièces de grandes dimensions, la palette de matériaux utilisables et les méthodes pour contrôler les processus thermomécaniques *in situ* ainsi que l'homogénéité microstructurale et les propriétés statiques et dynamiques. Dans un marché largement dominé par l'Allemagne, la France se place à la 4<sup>ème</sup> place du marché mondial de la fabrication additive en termes de revenus générés et à la 7<sup>ème</sup> place en termes de machines industrielles installées.

Pour rejoindre le trio de tête de la FA (Allemagne, USA et Chine), il est nécessaire d'accompagner la montée en gamme des machines. Pour cela en premier lieu d'augmenter la productivité des machines en augmentant les rendements, en accroissant la dimension des pièces produites et en développant des procédés hybrides. Il faut également augmenter la robustesse des machines en améliorant la qualité dimensionnelle et la qualité-matière, en optimisant les propriétés mécaniques des pièces et en minimisant l'impact environnemental. Il est aussi nécessaire d'assurer la continuité numérique. Le développement de nouveaux matériaux passe par une collaboration avec les CSF Chimie (matériaux polymères) et Mines.

### 3.3 La numérisation de l'industrie : Données et systèmes distribués

Au fur et à mesure que la numérisation s'impose à l'entreprise, les deux mondes de l'IT et de l'OT, traditionnellement séparés convergent vers un système intégré qui permet un meilleur échange des données entre les mondes fonctionnels et opérationnels de l'entreprise. Pour soutenir cette convergence, il est d'abord nécessaire de s'appuyer sur une infrastructure numérique puissante et à large usage. La mission 5G industrielle qui a donné ses conclusions début 2022 a pointé l'importance que la 5G pour l'accession à la numérisation des entreprises et à cette convergence qui s'annonce.

#### 3.3.1 L'usine connectée (Ilot Internet des objets industriel) /5G /Edge/Cloud)

Le continuum des données est un préalable à la numérisation des entreprises. La feuille de route Européenne pour le cloud distingue 3 types de cloud :

1. Le Cloud : Fournit des moyens de calcul et de stockage distants. Il permet aussi d'avoir des espaces de données partagés. Ce type de cloud permet aussi le traitement et le stockage des données externes à l'entreprise.
2. Le Edge Cloud : Traitement local des données (Région-ville, organisme, entreprise, etc.). Ce type de cloud permet le traitement et le stockage des données de l'entreprise liées aux systèmes d'information (IT) concernant les services internes de l'entreprise (Gestion entreprise, bureautique, Mail, ERP ...).
3. Le Far Edge Cloud : Traitement des données sur le terrain (usine, réseau urbain, champs agricole, chantier, ...). Ce type de cloud permet généralement le traitement des données de l'entreprise liées aux opérations (OT : pour operation technology, processus de production des biens et services). Ces données techniques, spécifiques du métier de l'entreprise sont à lier aux autres types de données et à traiter dans le cloud.

La maîtrise des données sur le terrain permettra de :

Renforcer l'offre des solutions pour la maîtrise des données sur le terrain à partir des capteurs et machines intelligentes ;

- Faire émerger des champions du continuum du traitement des données de l'objet au cloud.

Il est nécessaire d'aligner les besoins de la demande et les offres des fournisseurs de solutions pour coconstruire une maîtrise allant depuis la connectivité (5G) jusqu'au cloud appropriée à la numérisation du terrain facile à utiliser par les entreprises y compris les PME. Une telle action doit permettre de renforcer les fournisseurs et les utilisateurs pour maîtriser le continuum de l'objet au cloud en vue de le mettre à la portée de l'ensemble de l'industrie française, y compris les PME.

### 3.3.2 Blockchain

La blockchain fournit un service ne nécessitant pas d'entité centrale de contrôle. Il est par conséquent particulièrement adapté aux applications qui traversent les frontières de différentes organisations, pour lesquelles une autorité universellement reconnue n'existe pas ou serait difficile à établir. Des applications comme la certification de l'énergie verte, la traçabilité de produits ou la certification des diplômes universitaires sont à ce jour déployées et commercialisées. D'autres applications sont à venir comme celles liées à l'économie circulaire et aux passeports produits.

L'enjeu aujourd'hui est de permettre la mise en œuvre de cette technologie, de façon responsable, pour permettre aux industriels de la filière de se positionner compétitivement face aux challenges de la décentralisation. Plusieurs verrous viennent impacter la réalisation de cette stratégie. D'abord, la capacité à analyser et « benchmarker » les solutions existantes ou émergentes, pour permettre une prise de décision adaptée aux contextes industriels spécifiques des acteurs de la filière. Par exemple, les temps d'enregistrement des différentes chaînes de blocs peuvent influencer sur l'applicabilité dans des contextes terrain contraints. Ensuite, le développement de nouvelles fonctionnalités « cœur » des infrastructures blockchains et des services clés déployés, pour permettre de garantir par exemple la protection des données ou la traçabilité des calculs. Enfin, le plus important verrou concerne les chaînes d'outillage pour la conception et la vérification de registres de confiance décentralisés.

### 3.3.3 Cybersécurité

La connectivité à la base de l'Industrie 5.0 fait apparaître un risque critique de cybersécurité. En effet, l'échange de données industrielles et le contrôle à distance des systèmes de production imposent d'accroître les mesures de sécurité. Avec l'arrivée de la convergence entre l'IT et l'OT, les risques d'attaques sont de plus en plus élevés : les environnements critiques industriels sont aujourd'hui au cœur des cyberattaques. Leurs vulnérabilités les exposent à des conséquences physiques, environnementales et/ou financières importantes.

La coexistence entre des dispositifs modernes sécurisés et des dispositifs anciens qui n'auront pas pu être modifiés doit être soigneusement étudiée. Les protocoles de communications sont particulièrement concernés, car il faut assurer l'interopérabilité de ces différents systèmes. Dans un contexte où il est difficile d'intégrer de nouveaux mécanismes et dispositifs, la supervision apparaît essentielle : l'étude de mécanismes de détection efficaces et spécifiques, aptes à être déployés dans ce contexte sans le perturber, est donc cruciale. Les développements en cybersécurité pour les installations industrielles portent principalement sur le développement de mécanismes de sécurité autonome, une approche conjointe de la privacy et de la sécurité, le développement de méthodes & outils pour la transition vers des systèmes numériques avec des niveaux de sécurité adaptés.

## 3.4 Chaîne numérique

### 3.4.1 Jumeau numérique

Le jumeau numérique, comprend cinq dimensions depuis les entités physiques, les modèles virtuels, les données, les services et les connexions, peuvent être utilisés pour améliorer des aspects de la production, des opérations et des processus commerciaux. Contrairement à une maquette numérique ou au métavers industriel, le jumeau numérique (JN) reflète l'état dynamique d'une entité physique ou d'un processus en relation avec le monde réel via des mesures physiques.

Un jumeau numérique peut être le modèle d'un composant, d'un système de composants ou d'un système de systèmes. Par exemple : des pompes, des moteurs, des centrales électriques, des chaînes de fabrication ou une flotte de véhicules.

Une des applications du JN est l'utilisation des données et du modèle numérique pour comprendre l'origine d'un dysfonctionnement, émettre des prédictions et éventuellement produire des recommandations ou effectuer des actions (exemple : prédiction de pannes d'un équipement et recommandations de maintenance). Pour cela, il est nécessaire de bâtir un modèle explicatif, prédictif et/ou prescriptif à partir des données en s'appuyant sur des méthodes statistiques ou du machine learning.

Le jumeau numérique est un domaine de recherche interdisciplinaire qui comprend l'ingénierie, l'informatique, l'automatisation et le contrôle, etc. Il touche donc aussi bien à la virtualisation du composant et des machines, à la science des matériaux, à la communication, à la gestion des opérations et à d'autres disciplines. Les défis les plus notables comprennent :

- La réalisation de la perception (capteurs) et de l'interconnexion intelligentes d'entités physiques hétérogènes multi-sources ;
- La collecte de données hétérogènes multi-sources d'entités physiques en temps réel, la transmission efficace (5G) et le traitement complet des données cyber-physiques ;
- La construction d'un modèle haute-fidélité dynamique multidimensionnel et multi-espace-temps ;
- La vérification de la cohérence, de la validité et de la fiabilité des modèles ;
- L'intégration d'un modèle multi-sources, multi-disciplines et multidimensionnel.

### 3.4.2 Ingénierie des Modèles et des Systèmes

La continuité numérique est l'élément clé pour développer des systèmes complexes. Il s'agit de pouvoir garantir et gérer la cohérence de toutes les données, informations, et connaissances d'ingénierie, produites tout au long du cycle de vie d'un système et d'un logiciel et échangés par les différentes parties prenantes impliquées dans ce même cycle de vie. Les approches à base de modèles se substituent aux approches classiques d'ingénierie à base de documents et l'ingénierie dirigée par les modèles des systèmes regroupe l'ensemble des pratiques et outils mis en œuvre pour développer des systèmes et s'appuyant sur des modèles et non plus uniquement sur des documents.

L'ingénierie système permet d'adresser les principaux enjeux que s'est donné la filière : circularité avec les ACV, l'écoconception et la souveraineté à travers des gains de compétitivité grâce à une optimisation globale que permet ces outils. Ajoutons que les gains importants en qualité et sécurité peuvent être obtenus, ce qui va dans le sens également de la souveraineté. Enfin, les systèmes étant largement bâtis sur les capacités informatiques (logicielles et matérielles) l'ingénierie système permet de développer des approches baptisées de « low-code », voire de « no-code », visant à réduire tant se faire que peut la marche pour accéder aux "supers pouvoir" de l'informatique en rendant cette dernière plus accessible.

## 3.5 Intelligence artificielle

L'Intelligence Artificielle (IA) pour l'industrie intègre tous les secteurs opérationnels et d'innovation des systèmes industriels, des couches les plus basses à celles de plus haut niveau d'interaction des installations avec l'environnement extérieur, depuis les capteurs intelligents jusqu'à la logistique en passant par le contrôle des produits et process et la supervision des systèmes de production.

Un élément structurant de l'adoption de l'IA est la clarification du cadre réglementaire permettant de fixer les exigences de développement et conditions d'exploitation des systèmes à base d'IA. La nouvelle réglementation européenne, AI Act, en cours d'adoption devrait clarifier le contexte et faciliter la diffusion dans le domaine industriel.

Grâce au machine learning, il est possible de développer des algorithmes d'IA permettant l'analyse des paramètres qui influencent la performance d'une ligne de production et donc d'optimiser les procédés de production. Par exemple en influant sur la vitesse, la consommation de matière ou l'énergie... l'IA appliquée à l'industrie peut également apporter une réponse concrète à la gestion des pannes par la maintenance prédictive pour éviter des ruptures dans la chaîne de production, autre facteur clé de la compétitivité.

L'IA est un atout pour atteindre les enjeux de décarbonation, circularité que la filière s'est donnée, en permettant en particulier de rationaliser l'utilisation des matières premières et des ressources de l'usine (eau, énergie, etc.). Grâce à l'IA il est possible d'explorer des modèles interdépendants très complexes, de proposer des heuristiques de prédiction, anticipation des comportements ou d'évolution du contexte environnemental.

Dans l'industrie 5.0, l'humain est au centre de l'usine. Il forme avec la machine un couple interactif, acteur de l'évolution de l'entreprise. L'IA permet aux collaborateurs de se concentrer sur des activités à plus haute valeur ajoutée bonifiant ainsi les conditions de vie au travail en rendant ce dernier plus ergonomique et plus attractif.

## 4 L'écosystème des principales filières utilisatrices

Même si la première filière sur laquelle porte les développements de la feuille de route est la filière Solutions pour l'industrie du futur elle-même, cette filière est avant tout au service des autres filières industrielles.

L'étude Accenture menée par l'AIF en 2019 montre que l'offre française pour l'Industrie du futur ne répond que partiellement à la demande de ses clients, c'est-à-dire les autres filières industrielles. Selon cette étude, 3 entreprises sur 10 considèrent que l'offre française en machines et équipements de production est inexistante ou pas du tout adaptée à leurs besoins et seulement 2 sur 10 sont partiellement ou totalement satisfaites par l'offre française.

Il convient donc de soumettre notre vision à la fois des enjeux que veut relever la filière et des grands domaines technologiques que veut développer la filière pour y parvenir à la vision qu'en ont les grandes filières industrielles françaises et de la pertinence de ces choix vis-à-vis de leur propre feuille de route.

Une première analyse a permis de déterminer 11 filières particulièrement importantes pour la filière S-I-F. Pour cela la TaskForce s'est appuyée à la fois sur l'importance de la filière (agroalimentaire : première filière de France en termes de CA), des études telles que *l'Etude des marchés prioritaires à l'horizon 2025-2030* par Roland Berger pour la DGE et les remontées des membres de la filière S-I-F en termes d'identification de leur principaux « clients ».

Un questionnaire a été établi et transmis à ces filières ce qui a donné lieu à une évaluation des 5 socles technologiques mis en avant par la TF. Le résultat est synthétisé dans le tableau ci-dessous.

Filières	Alimentaire	Bois	Chimie et matériaux	Mines & Métallurgie	Industries des Nouveaux Systèmes Énergétiques	Automobile	Aéronautique et aérospatial	Industriels de la mer	Ferroviaires	Nucléaire	Industries et Technologies de Santé
<b>Automatisation</b>	☆☆☆☆ Compétitivité & souveraineté	☆☆☆☆ Compétitivité & souveraineté	☆☆	☆☆☆☆ souveraineté	☆☆☆☆ Compétitivité & souveraineté	☆☆ souveraineté	☆☆ souveraineté	☆☆☆☆	☆☆	☆☆☆☆ Compétitivité & souveraineté	☆☆☆☆ Compétitivité & souveraineté
<b>Fabrication additive</b>	☆☆☆☆	☆	☆	☆☆	☆☆	☆☆ souveraineté	☆☆☆☆ compétitivité, circularité, frugalité	☆☆	☆☆☆☆ compétitivité, circularité, frugalité	☆☆☆☆ ☆	☆☆☆☆
<b>l'usine connectée : données et systèmes distribués</b>	☆☆☆☆ Traçabilité, sobriété	☆☆ Traçabilité, sobriété	☆☆ Traçabilité, sobriété	☆☆☆☆ Souveraineté, Traçabilité, sobriété	☆☆☆☆ Traçabilité, sobriété	☆☆☆☆ ☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆	☆☆ Traçabilité, sobriété	☆☆☆☆ Traçabilité, sobriété
<b>Chaîne numérique</b>	☆☆☆☆ Compétitivité et frugalité	☆ Compétitivité et frugalité	☆☆ Compétitivité et frugalité	☆☆☆☆ compétitivité, circularité	☆☆☆☆ Compétitivité et frugalité	☆☆☆☆ compétitivité, frugalité	☆☆☆☆ compétitivité, frugalité	☆☆	☆☆ compétitivité, frugalité	☆☆ Compétitivité et frugalité	☆☆☆☆ Compétitivité et frugalité
<b>I/A</b>	☆☆☆☆ productivité	☆☆ productivité	☆☆☆☆ productivité	☆☆☆☆ ☆ Souveraineté, sobriété, circularité	☆☆☆☆ productivité	☆☆☆☆ ☆	☆☆☆☆ ☆	☆☆☆☆	☆☆	☆☆☆☆ productivité	☆☆☆☆ productivité

Le résultat montre une grande convergence entre les enjeux et les technologies mis en avant par la filière et la demande des grandes filières clientes. On note une grande convergence de vue entre la vision développée par la filière S-I-F et les filières demandeuses avec des points saillants sur les données et l'intelligence artificielle ou l'automatisation (robotique & machines intelligentes).

Si la fabrication additive intéresse peu les filières bois et chimie, il faut noter que la filière chimie, ainsi que la filière mines sont des partenaires de la filière S-I-F dans le domaine de la FA pour fournir des matériaux innovants. Les outils de traçabilité numérique et de jumeaux numériques sont aussi plébiscités par les filières de la demande. En conclusion, les réponses de ces filières nous confortent dans les choix technologiques qui ont été fait.

## 5 Recommandations & Propositions

La feuille de route a été développée selon 3 axes : les enjeux de la filière, le socle S&T et la demande de solutions. Pour atteindre les grands enjeux que s'est donnée la filière il est nécessaire de maîtriser les technologies clé pour fournir aux industriels un avantage technologique et donc de compétitivité face à leurs concurrents internationaux. Dans ce contexte la filière va s'appuyer sur les initiatives qui ont été lancées dans le cadre de France 2030 et du PIA4 et en particulier les stratégies d'accélération et les PEPR. Elle va donc se concentrer sur l'adaptation de ces initiatives à ses propres problématiques et sur les domaines techniques qui ne sont pas ou peu couverts.

Certaines actions à mener sont transverses à la fois sur les grands enjeux que s'est donné la filière et au développement de certaines technologies.

En premier lieu les enjeux d'économie circulaire, de durabilité, de sobriété énergétique qui nécessitent des développements techniques différents ne peuvent être menés à bien que s'ils s'accompagnent d'une réglementation et de normalisation « contraignantes » au niveau français, mais plus certainement pour soutenir la compétitivité des offreurs de solutions au niveau européen.

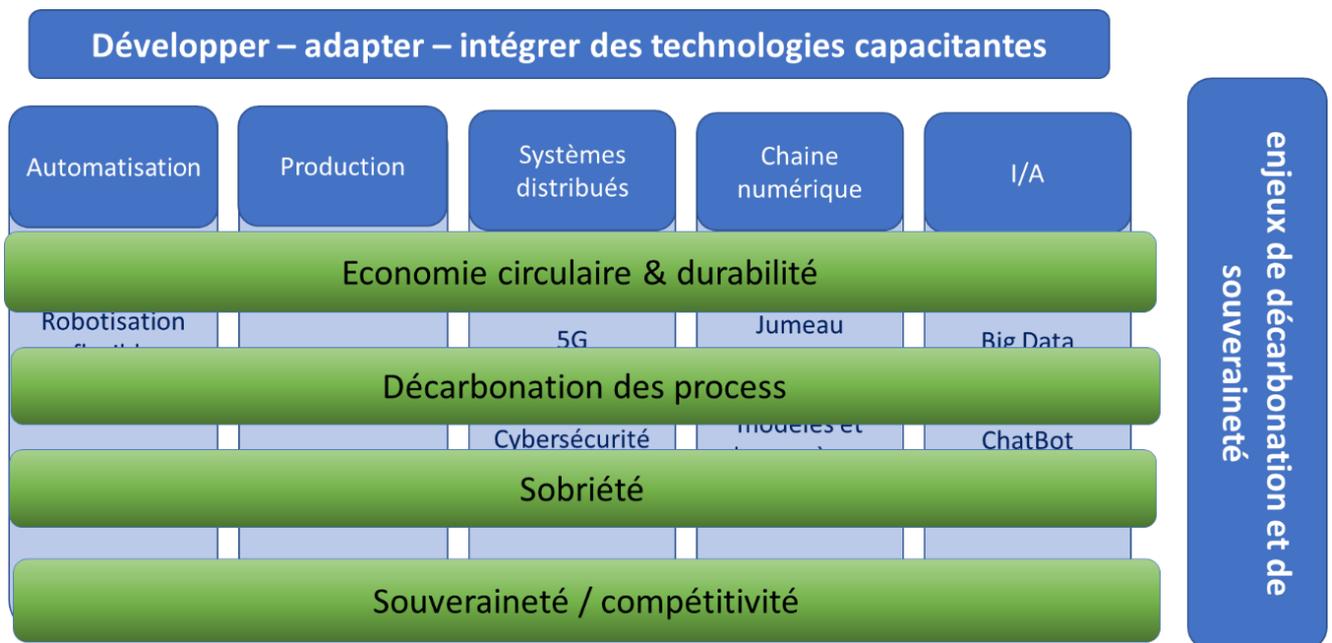
**Recommandation 1 :** Nourrir et développer avec le soutien de la filière S-I-F une réglementation et des normalisations à porter au niveau européen sur les grands enjeux sociétaux de la filière et les briques technologiques capacitanes.

**Recommandation 2 :** Développer des « bacs à sables » dédiées à l'innovation et la recherche collaborative permettant l'expérimentation, la capitalisation des données, l'innovation tout en assurant la sécurité et la protection des informations industrielles sensibles et en s'appuyant sur celles qui existent déjà. L'objectif est d'aller vers un « DARPA » de l'industrie.

**Recommandation 3 :** Prendre en compte l'impact humain de l'introduction de l'usine du futur :

- Accompagner les décideurs et les salariés pour comprendre les enjeux et les mettre en correspondance avec leurs usages.
- Anticiper l'évolution des métiers et la place de l'homme dans l'usine de demain.

## 5.1 Enjeux sociétaux de la filière



### 5.1.1 Economie circulaire & durabilité

**Recommandation 4 :** L'objectif est de contribuer à la construction d'un cadre structurel et technologique favorable à l'économie circulaire. Pour cela il est nécessaire de :

- Adopter des réglementations sur la gestion des déchets et la circularité au niveau européen pour donner aux industriels un écosystème suffisant pour se développer ;
- Etendre l'approche monocritère (limitée à l'impact carbone) à l'ensemble des critères environnementaux calculés en ACV ;
- Définir et développer un système de collecte et d'échanges de données efficaces et respectueux des besoins de confidentialité des acteurs économiques d'une même chaîne de valeur ;
- Automatiser de la collecte de données pour l'analyse en cycle de vie (ACV) le long d'une chaîne d'approvisionnement pour la mise à jour collaborative du jumeau numérique environnemental des produits. Ce jumeau numérique exposera les performances environnementales du produit aux différentes parties prenantes concernées par l'ACV ;
- Mettre en place des processus d'aide à la décision pour les experts ACV lors de la réalisation de l'étude ACV de la chaîne de valeur ;
- Développer des blockchains pour collecter, sécuriser et restituer des informations fiables et infalsifiables et pour définir un « passeport numérique », intégrant des méthodes de monitoring d'impacts au niveau des processus industriels et du monitoring en phase d'usage ;
- Développer des technologies de désassemblage (IA, robotisation, tri...) pour permettre le recyclage/fin de vie des déchets pour exploiter le gisement de déchets à très court terme.
- Développer les outils permettant de caractériser la santé et le vieillissement ainsi que leur suivi (SHM = Structural Health Monitoring) afin d'augmenter la durée de vie des systèmes de production
- Acculturer les acteurs industriels offreurs de solutions et utilisateurs à l'opportunité et à la nécessité que représente l'industrie circulaire.

### 5.1.2 Décarbonation des process

**Recommandation 5 :** Les objectifs de décarbonation, c'est-à-dire la baisse des émissions de CO<sub>2</sub>, s'imposent de plus en plus aux industriels. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de :

- Développer des capteurs numériques, analysant en temps réel les consommations énergétiques, pour-être déployés dans les entreprises ainsi que l'infrastructure IIoT et les outils de traitement et d'optimisation des process ;
- Implémenter des outils d'aide au diagnostic et à la décision, potentiellement basés sur l'intelligence artificielle, pour aller du diagnostic au pronostic. Une fois contextualisées et dotées d'un sens, ces données peuvent alimenter les programmes d'automatisation, y compris l'apprentissage machine et les technologies d'IA plus avancées ;
- Développer des outils d'évaluation du risque que présentent ces environnements pour mettre en œuvre les mesures de sécurité appropriées et prévenir les attaques
- Développer des « blockchains vertes » pour 1) collecter, sécuriser et restituer des informations fiables et infalsifiables 2) assurer la traçabilité intelligente de l'empreinte carbone des matériaux jusqu'au produit retraité ;
- Développer des outils de conception de jumeaux numériques et d'outils d'aide à la décision basés sur des IA pour l'optimisation des flux et la réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- Disposer de technologies support aux énergies décarbonées et à la filière de capture, stockage, transport et utilisation du CO<sub>2</sub>.
- Mettre l'accent sur les technologies d'épuration (filtration, purification) pour le captage du CO<sub>2</sub>.
- Encourager la réutilisation du CO<sub>2</sub> pour l'usinage, le médical, l'alimentaire et les machines thermodynamiques pour absorber le gisement potentiel.

### 5.1.3 Efficacité énergétique

**Recommandation 6 :** Économiser l'énergie ou mieux maîtriser sa dépendance aux énergies fossiles sont une nécessité économique et environnementale qui contribue à la rentabilité des entreprises. Cet enjeu nécessite de développer des outils permettant :

- D'optimiser l'efficacité énergétique et de récupérer l'énergie fatale ;
- De stocker et restituer être utilisée en appoint, ou pour des procédés mobiles ;
- D'améliorer la performance (rendement/maintenabilité) des composants et équipements : des technologies de rupture doivent être mises en avant pour améliorer les performances énergétiques des équipements utilisant de l'énergie (tribologie de nouveaux matériaux, moteurs brushless, traitements de surface innovants...).
- De développer des capteurs numériques, analysant en temps réel les consommations énergétiques, pour-être déployés dans les entreprises ainsi que de développer des composant pour définir l'infrastructure IIoT et les outils de traitement et d'optimisation des process ;
- D'optimiser la conception des produits (optimisation topologique, fluide, éco-conception...) pour ajuster la quantité de matière nécessaire, dans le respect du cahier des charges fonctionnelles ;
- D'optimiser les procédés de fabrication (réduction des intrants et des déchets) ;
- De développer des alternatives s'inspirant du biomimétisme, les biomatériaux et biolubrifiants (matériaux, substances, surfaces) dans une logique d'éco-conception intégrant des matières premières secondaires issues du recyclage

## 5.2 Socle technologique

### 5.2.1 Intelligence artificielle

La filière doit s'appuyer sur les initiatives française (Défi IA de confiance, PEPR, stratégie IA 2 et en particulier sur les plateformes open source DeepGreen et SciKit learn) ainsi qu'Européenne et en particulier la TEF (Testing and Experimentation Facilities) AI-MATTERS pour développer et expérimenter des algorithmes d'IA. En s'appuyant sur ces actions très amont et générique il faut appliquer ces avancées afin de :

- Créer de plateformes d'acculturation et d'expérimentation de l'IA adaptées aux différents secteurs et coordonnées pour développer les transversalités et transferts de compétences.
- Mutualiser des données souveraines et sécurisée des offreurs de solutions pour favoriser l'apprentissage, grâce à une plateforme portée par l'Alliance Industrie du Futur, via une réponse à l'AAP « espace mutualisé de données » en lien avec GAIA-X
- Soutenir des projets de recherche collaboratifs d'envergure regroupant de larges écosystèmes académique et industriels sur les verrous scientifiques clés :
  - o IA et simulation
  - o Gestion des données, apprentissage frugal
  - o Qualification et confiance
  - o IA décentralisée et embarquée.

### 5.2.2 Systèmes distribués

#### 5.2.2.1 5G/IIoT/Edge/Cloud

L'infrastructure numérique (5G, IIoT, cloud..) est la colonne vertébrale de de l'industrie 5.0 permettant aussi bien l'accès aux réseaux mobiles mais des usages depuis la maintenance prédictive jusqu'à la collection des données venant des machines et des différents systèmes d'information de l'usine. Pour cela un certain nombre d'actions ont été lancée via la mission 5G industriel et les stratégie d'accélération 5G et cloud. Il convient de convertir ces résultats dans le domaine de l'industrie ce qui demande de :

- Capitaliser sur les FabLab 5G issus de l'AMI FabLab 5G industriel comme « bac à sable » permettant des expérimentations pour tester des cas d'usage différents dans des conditions proches des conditions réelles ;
- Lancer des démonstrateurs 5G impliquant des acteurs français et européens
- Mutualiser des données souveraines et sécurisée pour favoriser l'apprentissage, grâce à une plateforme portée par l'Alliance Industrie du Futur sur la base de technologies comme celle portée par le projet OTPaaS en lien avec GAIA-X ;
- Développer, en complément des solutions de sécurisation "préventives" traditionnelles du réseau (authentification, contrôle d'accès, chiffrement, ...) définies dans les standards, des solutions complémentaires de sécurisation "réactives et autonomes" des réseaux ;
- Soutenir le développement de solutions 5G souveraines pour les réseaux privés d'entreprises ;
- Intégrer de l'intelligence et de l'apprentissage machine sûr, fiable et explicable dans l'ensemble du réseau (5 et 6G) pour automatiser son fonctionnement et sa gestion ;
- Assurer l'interopérabilité dans les communications et les services de bout en bout à tous les niveaux, en assurant l'alignement et la compatibilité des propriétés, des politiques et des règles d'interconnexion, de protection et de sécurité des systèmes impliqués ;
- Remplacer les traitements des données sur le terrain, organisés en silos, par une plateforme native Gaia-X par construction (portable, interopérable, sécurisée et souveraine ...)

### 5.2.2.2 BlockChain

La blockchain est au cœur des enjeux de la filière sur des perspectives moyen/long terme. Outre le fait que ce soit une technologie cœur du web 3.0, elle apporte des solutions innovantes sur la traçabilité et la certification/réglementation. Avec la démocratisation de l'usage de IIoT (Industrial Internet of Things) et du CPS (Cyber Physical Systems), il est aussi clé que les données puissent être certifiables et traçables afin d'en assurer la fiabilité. Ce point de vue, l'usage de la Blockchain va devenir concomitants à celui de l'IIoT. La blockchain, bien qu'étant partie de la stratégie nationale, n'a pas bénéficié du soutien des AAP de France 2030.

**Recommandation 7** : mise en place d'une blockchain industrielle, verte. Ceci nécessite de

- Lancer une grande action d'innovation sur les sujets de conception, de validation et de benchmarking, avec pour objectif de créer les outils, manquants aujourd'hui, qui faciliteront l'adoption des technologies blockchain par le développement plus simple de solutions fiables et vertes ;
- Amplifier les recherches sur le sujet de la confidentialité et de la gestion des données personnelles ou sensibles (privacy), et de focaliser une partie des compétences en génie logiciel sur les problèmes spécifiques des applications et des infrastructures blockchains ;
- Développer des blockchains scalables et non énergivores.

### 5.2.2.3 Cybersécurité

La cybersécurité a été identifiée comme une technologie prioritaire afin de garantir la sûreté et la sécurité numérique des offres de solutions aux différentes filières industrielles. La filière S-I-F va s'appuyer en particulier sur les membres de la filière « industries de sécurité » ainsi que sur les différents outils à sa disposition tels que le Cyber Campus, le grand défi cyber, le PEPR cyber ainsi que la stratégie d'accélération. Dans le cadre de la filière S-I-F s'il s'agira de porter l'ensemble des briques à notre disposition avec l'objectif de :

- Mettre à disposition une chaîne outillée d'évaluation renforçant la capacité des analystes
- Développer des outils de tests de conformités sécuritaires pour le développement d'objets et services sécurisés
- Développer des outils de protection des données hébergées dans le cloud
- Mettre à disposition une plateforme nationale d'analyse de codes binaires
- Mettre à disposition un bouquet de service innovants de détection, supervision et d'orchestration.

## 5.2.3 Chaîne numérique

### 5.2.3.1 Jumeau numérique

Le jumeau numérique est un domaine de recherche interdisciplinaire qui comprend l'ingénierie, l'informatique, l'automatisation et le contrôle, etc. En raison de cette nature multidisciplinaire, il touche aussi bien à la virtualisation du composant et des machines, à la science des matériaux, à la communication, à la gestion des opérations et à d'autres disciplines. Les défis les plus notables comprennent :

- La réalisation de la perception (capteurs) et de l'interconnexion intelligentes d'entités physiques hétérogènes multi-sources ;
- La collecte de données hétérogènes multi-sources d'entités physiques en temps réel, la transmission efficace (5G) et le traitement complet des données cyber-physiques ;
- La construction d'un modèle haute-fidélité dynamique multidimensionnel et multi-espace-temps ;
- La vérification de la cohérence, de la validité et de la fiabilité des modèles ;
- L'intégration d'un modèle multi-sources, multi-disciplines et multidimensionnel.

**Recommandation 8 :** Le développement d'un jumeau numérique holistique et sécurisé et démocratisation de son usage. Ceci nécessite de :

- Lancer une grande action d'innovation autour de l'intégration des représentations et outils d'exploitation constitutifs des jumeaux numériques, notamment pour implémenter les stratégies d'économie circulaire garantissant la confidentialité, la sécurisation et la fiabilité des échanges ;
- Amplifier les recherches sur la précision, la fiabilité, la rapidité et le caractère incrémental des modèles et outils de simulation et d'exploitation pour garantir la représentativité du jumeau numérique par rapport au système réel, tout au long de son cycle de vie tout en assurant l'accessibilité de la démarche à des non-experts afin de la démocratiser ;
- S'investir dans les comités de normalisation (CEN, ISO) autour du jumeau numérique ;
- Constituer une « bibliothèque dynamique » française autour de regroupements d'industriels constitutifs de la chaîne de la valeur S-I-F.
- Mettre en place des plateformes d'acculturation et de service autour du jumeau numérique adaptées aux différents domaines, aux différents niveaux d'utilisateurs et à différentes applications métier pour démontrer l'efficacité liées, la valeur ajoutée créée et le ROI et ainsi diffuser massivement ses usages auprès des PME françaises.

### 5.2.3.2 Ingénierie dirigée par les modèles

**Recommandation 9 :** Les approches d'ingénierie système sont un facteur clé de performance de l'industrie. Mais les outils doivent être démocratisés pour permettre aux PME/ETI d'accéder à ces approches déjà largement utilisées par les grands groupes. Pour cela, il faut développer de :

- L'assistance à l'ingénierie par l'IA pour faire face à la complexité ;
- L'automatisation des processus pour faire des gains de performance ;
- Technologies formelles pour améliorer la qualité des systèmes ;
- L'ingénierie dirigée par les Modèles naturels pour démocratiser en facilitant l'usage des technologies numériques ; en intégrant à la fois des technologies d'IA et des technologies facilitant le travail collaboratif pour favoriser l'intelligence collective.

## 5.2.4 Automatisation : Robotique & Machines intelligentes

### 5.2.4.1 Robotique

L'usine du futur met l'accent sur la robotique interactive intelligente avec pour objectif d'améliorer et d'accélérer les techniques d'interaction humains-robots afin de créer des robots collaboratifs plus intuitifs dans leurs utilisations et plus autonomes dans leurs mouvements.

Un second thème porte sur la création de robots plus innovants utilisant de nouveaux concepts afin d'avoir de plus grand rayon d'action, une plus grande manipulabilité et une plus grande autonomie énergétique. Les futurs robots devront comprendre, communiquer et se fondre en toute sécurité avec les humains de manière sans précédent.

Le PEPR O2R (Organic Robotics) a pour ambition d'identifier les déterminants de l'adaptation sociale des robots et leurs liens avec le comportement de ces derniers et leur conception, de créer des architectures matérielles et logicielles intégrées pour les robots, permettant une intelligence incarnée et une robustesse face à la complexité de leurs environnements d'exercice et d'usage et de doter les robots de capacités d'interactions fluides avec les humains.

Rendre une machine intelligente nécessite que celle-ci soit connectée à tous les niveaux, pour faire remonter les données nécessaires à l'amélioration du process.

**Recommandation 10 :** En s'appuyant sur ces actions très amont et génériques il s'agit d'appliquer ces avancées dans le domaine de la robotique industrielle et des machines industrielles afin de :

- Mettre à disposition des plateformes physiques où l'ensemble d'acteurs peuvent se retrouver pour développer ensemble les solutions de bout en bout qui donneront un avantage concurrentiel à la France dans la robotique
- Développer le concept de continuité numérique dès la conception des produits robotiques ou machines à leur démontage en fin de vie, la consolidation de jumeaux numériques holistiques qui permettent l'opération de robots apprenants dans des milieux industriels
- Développer la convergence entre actionnement, intelligence artificielle et microélectronique pour ouvrir la voie à de nouveaux paradigmes de robotique industrielle
- Étendre l'usage de l'IA pour les machines intelligentes en s'affranchissant du besoin en données qualifiées massives en développant des approches semi-supervisées et des outils de génération de données physiquement réalistes (GAN, transfert de style, ...) ainsi que la sécurisation de ces données via des registres distribués (blockchain) ;
- Développer un programme de formation initiale et professionnelle de Robotique dans le supérieur (formation initiale et professionnelle) pour la création de compétences et de savoir-faire spécifiques à la robotique pouvant accélérer et alimenter les entreprises innovantes du secteur.

### 5.2.5 Fabrication additive

**Recommandation 11 :** L'objectif de la filière est de soutenir et mettre en œuvre les travaux R&D pour faire progresser l'offre nationale : machines, logiciels, matériaux, post traitements, contrôle. Cette déclinaison devra se faire par typologie de matériaux, car les caractéristiques des pièces obtenues dépendent du triptyque matière-procédé-post traitement. Pour cela il est nécessaire de :

- Développer des matériaux notamment à faible empreintes environnementales comme tel que la substitution de plastiques pétro-sourcés par de nouveaux bio-composites en lien avec les CSF Chimie & Mines ;
- Développer des outils numériques permettant de remplacer les tests physiques par des simulations de l'ensemble de la chaîne de fabrication (jumeau numérique) ;
- Développer des outils de pilotages des machines de FA afin de les rendre plus flexibles et reconfigurables pour permettre de fournir des solutions personnalisées ou de petites séries ;
- Accroître les dimensions des machines pour produire des pièces de grandes dimensions et
- Développer des outils pour accroître la robustesse des procédés et leur productivité (machines et post traitement) ;
- Favoriser les procédés hybrides (couplage des procédés par exemple) ;
- Développer des techniques de monitoring in-process ;
- Développer des outils d'automatisation des étapes de finition ;
- Faciliter la diffusion de l'usage de la FA en particulier dans les PME/ETI et le développement des compétences associées par la création de plateformes dédiées à l'expérimentation et au prototypage ;
- Mettre en place de bases de données sur les matériaux ainsi que d'une « défauthèque » permettant d'aboutir à une meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement permettant un dimensionnement fiable ;
- Minimiser l'impact environnemental : usage de poudres recyclées ou présentant des morphologies moins exigeantes, prise en compte la fin de vie des pièces obtenues par FA et l'obsolescence des procédés.
- Accélérer la normalisation afin de permettre de démocratiser la technologie et proposer des outils et méthodologies pour la certification des produits.

## RECAPITULATIF DES 11 RECOMMANDATIONS

### A/- Recommandations Générales prioritaires

**Recommandation 1 :** Nourrir et développer avec le soutien de la filière S-I-F une réglementation et des normalisations à porter au niveau européen sur les grands enjeux sociétaux de la filière et les briques technologiques capacitantes.

**Recommandation 2 :** Développer des « bacs à sables » dédiées à l'innovation et la recherche collaborative permettant l'expérimentation, la capitalisation des données, l'innovation tout en assurant la sécurité et la protection des informations industrielles sensibles et en s'appuyant sur celles qui existent déjà. L'objectif est d'aller vers un « DARPA » de l'industrie.

**Recommandation 3 :** Prendre en compte l'impact humain de l'introduction de l'usine du futur :

- Accompagner les décideurs et les salariés pour comprendre les enjeux et les mettre en correspondance avec leurs usages.
- Anticiper l'évolution des métiers et la place de l'homme dans l'usine de demain.

### B/- Recommandations sur les Enjeux prioritaires

**Recommandation 4 - Economie circulaire & durabilité :** L'objectif est de contribuer à la construction d'un cadre structurel et technologique favorable à l'économie circulaire. Pour cela il est nécessaire de :

- Adopter des réglementations sur la gestion des déchets et la circularité au niveau européen pour donner aux industriels un écosystème suffisant pour se développer ;
- Etendre l'approche monocritère (limitée à l'impact carbone) à l'ensemble des critères environnementaux calculés en ACV ;
- Définir et développer un système de collecte et d'échanges de données efficaces et respectueux des besoins de confidentialité des acteurs économiques d'une même chaîne de valeur ;
- Automatiser de la collecte de données pour l'analyse en cycle de vie (ACV) le long d'une chaîne d'approvisionnement pour la mise à jour collaborative du jumeau numérique environnemental des produits. Ce jumeau numérique exposera les performances environnementales du produit aux différentes parties prenantes concernées par l'ACV ;
- Mettre en place des processus d'aide à la décision pour les experts ACV lors de la réalisation de l'étude ACV de la chaîne de valeur ;
- Développer des blockchains pour collecter, sécuriser et restituer des informations fiables et infalsifiables et pour définir un « passeport numérique », intégrant des méthodes de monitoring d'impacts au niveau des processus industriels et du monitoring en phase d'usage ;
- Développer des technologies de désassemblage (IA, robotisation, tri...) pour permettre le recyclage/fin de vie des déchets pour exploiter le gisement de déchets à très court terme.
- Développer les outils permettant de caractériser la santé et le vieillissement ainsi que leur suivi (SHM = Structural Health Monitoring) afin d'augmenter la durée de vie des systèmes de production
- Acculturer les acteurs industriels offreurs de solutions et utilisateurs à l'opportunité et à la nécessité que représente l'industrie circulaire.

**Recommandation 5 - Décarbonation des process :** Les objectifs de décarbonation, c'est-à-dire la baisse des émissions de CO<sub>2</sub>, s'imposent de plus en plus aux industriels. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de :

- Développer des capteurs numériques, analysant en temps réel les consommations énergétiques, pour-être déployés dans les entreprises ainsi que l'infrastructure IIoT et les outils de traitement et d'optimisation des process ;
- Implémenter des outils d'aide au diagnostic et à la décision, potentiellement basés sur l'intelligence artificielle, pour aller du diagnostic au pronostic. Une fois contextualisées et dotées d'un sens, ces données peuvent alimenter les programmes d'automatisation, y compris l'apprentissage machine et les technologies d'IA plus avancées ;
- Développer des outils d'évaluation du risque que présentent ces environnements pour mettre en œuvre les mesures de sécurité appropriées et prévenir les attaques
- Développer des « blockchains vertes » pour 1) collecter, sécuriser et restituer des informations fiables et infalsifiables 2) assurer la traçabilité intelligente de l'empreinte carbone des matériaux jusqu'au produit retraité ;
- Développer des outils de conception de jumeaux numériques et d'outils d'aide à la décision basés sur des IA pour l'optimisation des flux et la réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- Disposer de technologies support aux énergies décarbonées et à la filière de capture, stockage, transport et utilisation du CO<sub>2</sub>.
- Mettre l'accent sur les technologies d'épuration (filtration, purification) pour le captage du CO<sub>2</sub>.
- Encourager la réutilisation du CO<sub>2</sub> pour l'usinage, le médical, l'alimentaire et les machines thermodynamiques pour absorber le gisement potentiel.

**Recommandation 6 - Efficacité énergétique :** Économiser l'énergie ou mieux maîtriser sa dépendance aux énergies fossiles sont une nécessité économique et environnementale qui contribue à la rentabilité des entreprises. Cet enjeu nécessite de développer des outils permettant :

- D'optimiser l'efficacité énergétique et de récupérer l'énergie fatale ;
- De stocker et restituer être utilisée en appoint, ou pour des procédés mobiles ;
- D'améliorer la performance (rendement/maintenabilité) des composants et équipements : des technologies de rupture doivent être mises en avant pour améliorer les performances énergétiques des équipements utilisant de l'énergie (tribologie de nouveaux matériaux, moteurs brushless, traitements de surface innovants...).
- De développer des capteurs numériques, analysant en temps réel les consommations énergétiques, pour-être déployés dans les entreprises ainsi que de développer des composants pour définir l'infrastructure IIoT et les outils de traitement et d'optimisation des process ;
- D'optimiser la conception des produits (optimisation topologique, fluïdique, éco-conception...) pour ajuster la quantité de matière nécessaire, dans le respect du cahier des charges fonctionnelles ;
- D'optimiser les procédés de fabrication (réduction des intrants et des déchets) ;
- De développer des alternatives s'inspirant du biomimétisme, les biomatériaux et biolubrifiants (matériaux, substances, surfaces) dans une logique d'éco-conception intégrant des matières premières secondaires issues du recyclage

### C/- Recommandations Technologiques prioritaires

**Recommandation 7 - BlockChain :** mise en place d'une blockchain industrielle, verte. Ceci nécessite de

- Lancer une grande action d'innovation sur les sujets de conception, de validation et de benchmarking, avec pour objectif de créer les outils, manquants aujourd'hui, qui faciliteront l'adoption des technologies blockchain par le développement plus simple de solutions fiables et vertes ;
- Amplifier les recherches sur le sujet de la confidentialité et de la gestion des données personnelles ou sensibles (privacy), et de focaliser une partie des compétences en génie logiciel sur les problèmes spécifiques des applications et des infrastructures blockchains ;
- Développer des blockchains scalables et non énergivores.

**Recommandation 8 - Jumeau numérique :** Le développement d'un jumeau numérique holistique et sécurisé et démocratisation de son usage. Ceci nécessite de :

- Lancer une grande action d'innovation autour de l'intégration des représentations et outils d'exploitation constitutifs des jumeaux numériques, notamment pour implémenter les stratégies d'économie circulaire garantissant la confidentialité, la sécurisation et la fiabilité des échanges ;
- Amplifier les recherches sur la précision, la fiabilité, la rapidité et le caractère incrémental des modèles et outils de simulation et d'exploitation pour garantir la représentativité du jumeau numérique par rapport au système réel, tout au long de son cycle de vie tout en assurant l'accessibilité de la démarche à des non-experts afin de la démocratiser ;
- S'investir dans les comités de normalisation (CEN, ISO) autour du jumeau numérique ;
- Constituer une « bibliothèque dynamique » française autour de regroupements d'industriels constitutifs de la chaîne de la valeur S-I-F.
- Mettre en place des plateformes d'acculturation et de service autour du jumeau numérique adaptées aux différents domaines, aux différents niveaux d'utilisateurs et à différentes applications métier pour démontrer l'efficacité liées, la valeur ajoutée créée et le ROI et ainsi diffuser massivement ses usages auprès des PME françaises.

**Recommandation 9 - Ingénierie dirigée par les modèles :** Les approches d'ingénierie système sont un facteur clé de performance de l'industrie. Mais les outils doivent être démocratisés pour permettre aux PME/ETI d'accéder à ces approches déjà largement utilisées par les grands groupes. Pour cela, il faut développer de :

- L'assistance à l'ingénierie par l'IA pour faire face à la complexité ;
- L'automatisation des processus pour faire des gains de performance ;
- Technologies formelles pour améliorer la qualité des systèmes ;
- L'ingénierie dirigée par les Modèles naturelle pour démocratiser en facilitant l'usage des technologies numériques ; en intégrant à la fois des technologies d'IA et des technologies facilitant le travail collaboratif pour favoriser l'intelligence collective.

**Recommandation 10 - Automatisation : Robotique & Machines intelligentes :** En s'appuyant sur ces actions très amont et génériques il s'agit d'appliquer ces avancées dans le domaine de la robotique industrielle et des machines intelligentes afin de :

- Mettre à disposition des plateformes physiques où l'ensemble d'acteurs peuvent se retrouver pour développer ensemble les solutions de bout en bout qui donneront un avantage concurrentiel à la France dans la robotique
- Développer le concept de continuité numérique dès la conception des produits robotiques ou machines à leur démontage en fin de vie, la consolidation de jumeaux numériques holistiques qui permettent l'opération de robots apprenants dans des milieux industriels
- Développer la convergence entre actionnement, intelligence artificielle et microélectronique pour ouvrir la voie à de nouveaux paradigmes de robotique industrielle
- Étendre l'usage de l'IA pour les machines intelligentes en s'affranchissant du besoin en données qualifiées massives en développant des approches semi-supervisées et des outils de génération de données physiquement réalistes (GAN, transfert de style, ...) ainsi que la sécurisation de ces données via des registres distribués (blockchain) ;
- Développer un programme de formation initiale et professionnelle de Robotique dans le supérieur (formation initiale et professionnelle) pour la création de compétences et de savoir-faire spécifiques à la robotique pouvant accélérer et alimenter les entreprises innovantes du secteur.

**Recommandation 11 - Fabrication additive :** L'objectif de la filière est de soutenir et mettre en œuvre les travaux R&D pour faire progresser l'offre nationale : machines, logiciels, matériaux, post traitements, contrôle. Cette déclinaison devra se faire par typologie de matériaux, car les caractéristiques des pièces obtenues dépendent du triptyque matière-procédé-post traitement. Pour cela il est nécessaire de :

- Développer des matériaux notamment à faible empreintes environnementales comme tel que la substitution de plastiques pétro-sourcés par de nouveaux bio-composites en lien avec les CSF Chimie & Mines ;
- Développer des outils numériques permettant de remplacer les tests physiques par des simulations de l'ensemble de la chaîne de fabrication (jumeau numérique) ;
- Développer des outils de pilotages des machines de FA afin de les rendre plus flexibles et reconfigurables pour permettre de fournir des solutions personnalisées ou de petites séries ;
- Accroître les dimensions des machines pour produire des pièces de grandes dimensions et
- Développer des outils pour accroître la robustesse des procédés et leur productivité (machines et post traitement) ;
- Favoriser les procédés hybrides (couplage des procédés par exemple) ;
- Développer des techniques de monitoring in-process ;
- Développer des outils d'automatisation des étapes de finition ;
- Faciliter la diffusion de l'usage de la FA en particulier dans les PME/ETI et le développement des compétences associées par la création de plateformes dédiées à l'expérimentation et au prototypage ;
- Mettre en place de bases de données sur les matériaux ainsi que d'une « défauthèque » permettant d'aboutir à une meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement permettant un dimensionnement fiable ;
- Minimiser l'impact environnemental : usage de poudres recyclées ou présentant des morphologies moins exigeantes, prise en compte la fin de vie des pièces obtenues par FA et l'obsolescence des procédés.
- Accélérer la normalisation afin de permettre de démocratiser la technologie et proposer des outils et méthodologies pour la certification des produits.

## Annexes

6	Les enjeux de la filière .....	24
6.1	Enjeu de l'industrie du futur : Economie circulaire .....	24
6.1.1	Périmètre de l'économie circulaire pour l'industrie du futur .....	24
6.1.2	Les technologies pour faciliter l'essor de l'économie circulaire .....	27
6.1.3	Recommandations.....	28
6.2	Enjeu de l'industrie du futur : Décarbonation.....	28
6.2.1	Périmètre de la décarbonation pour l'industrie du futur.....	28
6.2.2	Les technologies pour faciliter l'essor de la décarbonation dans l'industrie .....	30
6.2.3	Recommandations.....	31
7	Les technologies capacitanes.....	32
7.1	Automatisation.....	32
7.2	Fabrication additive.....	43
7.3	Continuité numérique .....	53
7.3.1	Jumeau Numérique .....	53
7.3.2	Ingénierie dirigée par les modèles des systèmes (réingénierie des méthodes et outils de travail).....	60
7.4	La numérisation de l'industrie : Données et systèmes distribués.....	64
7.4.1	L'usine connecté (Ilot Internet des objets industriel) /5G /Edge/Cloud).....	66
7.4.2	Blockchain.....	70
7.4.3	Cybersécurité.....	74
7.5	Intelligence artificielle pour l'industrie 5.0 .....	77
8	L'écosystème des principales filières utilisatrices.....	83
9	Liste des membres de la Taskforce Feuille de Route de la filière Solutions pour l'Industrie du Futur.....	83

## 6 Les enjeux de la filière

### 6.1 Enjeu de l'industrie du futur : Economie circulaire

#### 6.1.1 Périmètre de l'économie circulaire pour l'industrie du futur

L'ambition de la filière est non seulement d'assurer la souveraineté et la compétitivité de l'industrie mais aussi de contribuer à la transformation écologique de notre société en créant une industrie plus résiliente et moins carbonée. Pour répondre à cette ambition, l'économie circulaire permet de d'optimiser l'usage des ressources dans la conception et la fabrication des produits.

Intensifier l'usage des matériaux, des actifs matériels et des produits, en réutiliser les matières premières plusieurs fois au lieu de les entasser dans des décharges, conduit à économiser des ressources, à ménager l'environnement et relocaliser certains emplois. La commission européenne place également l'environnement et le social au cœur de l'industrie 5.0 : « *Pour rester le moteur de la prospérité, l'industrie doit mener les transitions numérique et verte. L'industrie 5.0 offre une vision de l'industrie qui vise au-delà de l'efficacité et de la productivité comme seuls objectifs, et renforce le rôle et la contribution de l'industrie à la société. Elle place le bien-être du travailleur au centre du processus de production et utilise les nouvelles technologies pour assurer la prospérité au-delà des emplois et de la croissance tout en respectant les limites de production de la planète* »

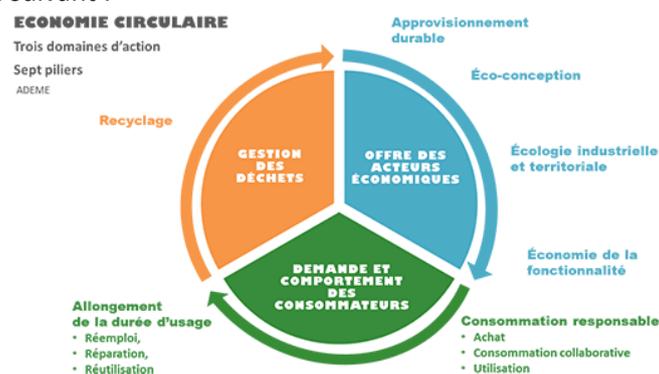
Suivant la définition de l'ADEME, l'économie circulaire désigne un modèle économique dont l'objectif est de produire des biens et des services de manière durable, en limitant la consommation et les gaspillages de ressources (matières premières, eau, énergie) ainsi que la production de déchets. Elle se différencie des processus de production linéaires. Dans ces derniers, les matières premières sont extraites pour être transformées en produits, qui sont vendus, consommés puis jetés (cf. schéma ci-dessous).



L'ADEME structure l'économie circulaire en trois domaines d'action auxquels il associe 7 piliers :

- Offre des acteurs économiques : extraction/exploitation et achats durables, éco-conception (produits et procédés), écologie industrielle et territoriale, économie de la fonctionnalité ;
- Demande et comportement des consommateurs : consommation responsable (achat, consommation collaborative, utilisation), allongement de la durée d'usage (réemploi, réparation, réutilisation) ;
- Gestion des déchets : recyclage (matière et organique).

L'ensemble de ces domaines d'action forment un cycle, où chaque étape entraîne la suivante tel que décrite dans le schéma suivant :



Les offreurs de solutions pour l'industrie du futur sont impliqués à la fois pour offrir des solutions pour l'économie circulaire, mais en étant eux-mêmes écoresponsables en proposant des solutions qui respectent les concepts de l'économie circulaire.

La première étape consiste à établir une analyse du cycle de vie (ACV) des produits. L'ACV est aujourd'hui un processus long et coûteux qui nécessite l'apport de spécialistes. Il s'agit d'abord de démocratiser l'ACV afin de faire passer cette démarche à l'échelle en la simplifiant, en permettant la comparaison de ses résultats et en facilitant l'exploitation de données ajustées et représentatives des efforts réalisés le long de la filière par les fournisseurs.

Il n'existe aujourd'hui aucune façon automatique et sécurisée de partager les données ACV spécifiques à un produit de façon transparente, ni de vérifier la cohérence entre les données, ni d'automatiser l'exploitation des résultats de l'étude. L'opportunité offerte par la standardisation en cours des passeports produits numériques permet de penser que des structures d'échange d'information interopérables et standardisées permettront de bénéficier de données de confiance transmises par des acteurs fournissant les intrants d'un produit. Il semble dès lors intéressant d'envisager l'exploitation des données ACV issues de ces passeports pour aller vers des approches plus collaboratives d'ACV, exploitant au mieux les compétences sur les connaissances clés et spécifiques d'étapes métier bien maîtrisées de chaque acteur de la chaîne de valeur.

L'écoconception vise à réduire les impacts environnementaux des produits dès leur conception. L'impact du produit ou du procédé durant l'ensemble de son cycle de vie est pris en compte. L'écoconception prend dès lors en compte les externalités du produit, depuis l'extraction des matières premières jusqu'aux déchets issus de la fabrication, ainsi que leur transport et leur utilisation. L'objectif final est d'aboutir à un produit ayant la meilleure éco-efficience

La conception de produits et de matériaux plus durables, réutilisables et facilement démontables, améliorés et/ou recyclés est essentielle pour l'économie circulaire. Or, bien qu'il reste beaucoup à faire, des approches innovantes comme l'utilisation de l'IA dans les processus de conception sont prometteuses. L'IA peut être utilisée pour améliorer les processus, car elle permet aux concepteurs de jouer avec de nombreux matériaux et structures et de tester et d'affiner les suggestions de conception. Elle peut aider à gérer la complexité qui accompagne les produits chimiques et les matériaux nocifs et être utilisée pour suggérer de nouveaux matériaux et procédés sur la base d'analyse du cycle de vie du produit

L'écoconception touche l'entièreté du processus de production d'un produit (matériel comme service). Que ce soit lors de :

- L'extraction et l'approvisionnement des matières premières ;
- La production ;
- La distribution du produit ;
- L'utilisation ;
- Sa fin de vie.

L'écoconception permet de **réduire les coûts de production** notamment de matières premières, d'énergie et de logistique. En revoyant son **processus de fabrication**, les entreprises maîtrisent mieux les coûts engrangés dans la production des produits.

Pour l'économie circulaire, la chaîne d'approvisionnement (et de valeur) n'est plus linéaire, avec une destination finale, mais en boucle. La logistique, pilotage des flux physiques et financiers par les flux d'information, en est un des principaux leviers de mise en place. La notion de boucle inclut celle de « retour, ce qui implique de nouveaux services de logistique, notamment de pièces détachées pour la réparation, de produits en fin d'usage pour le réemploi, ou en fin de vie pour la réutilisation / le ré-usinage. Il faut également faire face à une collecte de déchets / matière de plus en plus segmentée, donc plus complexe.

Le développement de la traçabilité des objets (origine, localisation, état, disponibilité) permet d'envisager leur maintenance préventive et curative et leur récupération en fin d'usage pour être réutilisée, en fin de vie pour être remanufacturé ou recyclé.

Le recyclage et le tri reboucle l'économie circulaire ce qui implique de constituer des flux de matière homogènes à partir de produits en fin de vie. Ils contiennent souvent différentes matières, et peuvent eux-mêmes faire partie de flux contenant divers déchets. Toute action commence donc par un processus de séparation des matières en présence, suivi du processus de tri. De nombreuses problématiques techniques se posent alors, en vue de mettre en place des technologies efficaces dans des contextes industriels où les flux de déchets sont en général massifiés.

En permettant de coupler les objectifs économiques de l'entreprise à la production d'impacts socio-environnementaux positifs, l'économie circulaire permet de se différencier sur le marché. La sensibilité croissante à la fois des collaborateurs et des clients à l'économie circulaire est un moteur efficace.

Une stratégie d'économie circulaire peut également être un vecteur d'innovation et de croissance. L'économie circulaire fournit des outils, par exemple l'approche par l'usage ou l'efficacité des ressources, pour imaginer de nouveaux services et trouver de nouvelles sources de revenus.

## 6.1.2 Les technologies pour faciliter l'essor de l'économie circulaire

### 6.1.2.1 L'analyse du cycle de vie (ACV)

La première étape de l'économie circulaire comme mentionné précédemment est l'ACV. Actuellement, bien qu'étant la méthode d'évaluation des impacts environnementaux la plus utilisée, l'ACV fait face à de nombreuses difficultés. Premièrement, la réalisation d'une seule étude ACV est très coûteuse car réalisée par des spécialistes ACV pour un coût élevé et une durée de plusieurs mois. Ceci la rend difficilement généralisable et accessible à des non spécialistes comme les PME/ETI.

Aujourd'hui, la collecte de données en ACV est souvent réalisée manuellement, par une seule personne qui détient l'expertise ACV et qui n'a pas forcément connaissance de toutes les données techniques de l'ensemble d'une chaîne de valeur. La concaténation d'ACV en cascade le long d'une chaîne de valeur est très complexe car elle nécessite la vérification de la cohérence des données utilisées à chaque étape et des hypothèses associées à chaque analyse. Il n'existe aujourd'hui pas d'outillage pour assister cette démarche. Des outils issus de **l'ingénierie dirigée par les modèles** doivent permettre d'atteindre cet objectif.

### 6.1.2.2 Le traitement des déchets incluant le tri & le recyclage

**L'intelligence artificielle** intégrée aux infrastructures de recyclage permet d'optimiser le tri et donc d'améliorer la qualité des matières recyclées. En intégrant avec des capteurs (essentiellement des **capteurs optiques**) à un **robot**, cela lui permettra d'interpréter des images des déchets prises et d'assumer ainsi des décisions autonomes concernant le tri. La **robotisation** devra permettre de soulager certaines étapes manuelles de tri des lignes de traitement. L'intégration de **l'IA** dans la cellule robotique capable d'apprentissage, la polyvalence des mécanismes de préhension adaptés à de multiples matières et formes d'objets, la complémentarité des systèmes de détection et de vision permettront de concevoir des processus capables de s'adapter à des flux et situations très différents.

### 6.1.2.3 La traçabilité

Les outils numériques permettent ce suivi, notamment l'internet des objets, RFID, capteurs, passeports produit... Ces technologies sont facilitatrices mais l'aspect organisationnel est clé : il faut un accès multi-acteurs à l'information tracée et à sa modification (producteur, utilisateur, réparateur, racheteur / recycleur).

En utilisant un système de registre numérique décentralisé et infalsifiable, la **blockchain** valide et enregistre des transactions ou d'autres événements. Il y a déjà des applications dans les chaînes d'approvisionnement, permettant de nouveaux systèmes de traçabilité et de certification. La **blockchain** permet de faciliter de nouveaux échanges, des contractualisations directes entre acteurs, des registres des échanges, le tout sans passer par un système central.

### 6.1.2.4 Collecte et traitement des données

**L'IIoT** intégrant **l'edge computing** et le **cloud computing** ainsi que **l'intelligence artificielle** permet une analyse des processus d'entreprises, l'identification des inefficiences et les pistes d'optimisations. Il permet également d'anticiper et gérer les consommations (en matières, biens, services, énergie) pour produire au plus juste et éviter les pertes.

L'enjeu de la mutualisation des données est multiple. L'accès à ces données permettent d'identifier des potentiels de synergies inter-entreprises. Comme pour les questions de traçabilité, l'enjeu du partage et de la gouvernance des données est clé.

### 6.1.3 Recommandations

L'objectif est de contribuer à la construction d'un cadre structurel et technologique favorable à l'économie circulaire. Pour cela il est nécessaire de :

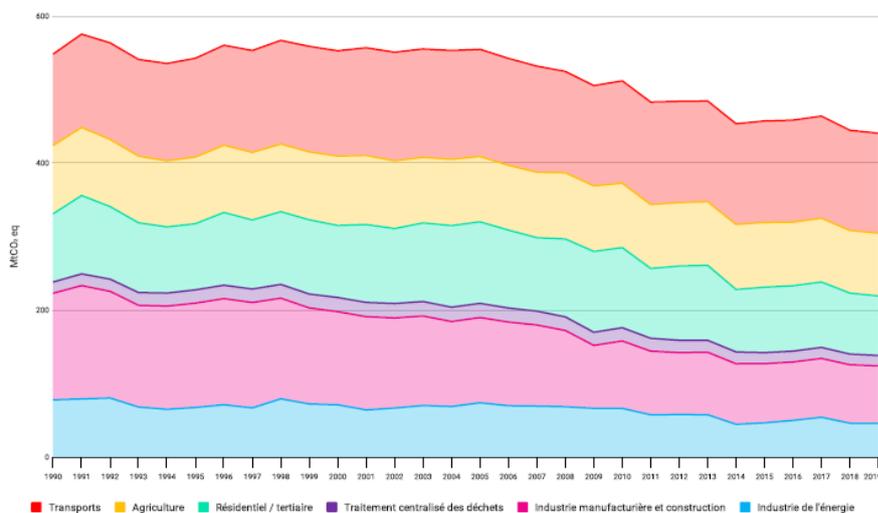
- Adopter des réglementations sur la gestion des déchets et la circularité au niveau européen pour donner aux industriels un écosystème suffisant pour se développer ;
- Etendre l'approche monocritère (limitée à l'impact carbone) à l'ensemble des critères environnementaux calculés en ACV ;
- Définir et développer un système de collecte et d'échanges de données efficaces et respectueux des besoins de confidentialité des acteurs économiques d'une même chaîne de valeur ;
- Automatiser de la collecte de données pour l'analyse en cycle de vie (ACV) le long d'une chaîne d'approvisionnement pour la mise à jour collaborative du jumeau numérique environnemental des produits. Ce jumeau numérique exposera les performances environnementales du produit aux différentes parties prenantes concernées par l'ACV ;
- Mettre en place des processus d'aide à la décision pour les experts ACV lors de la réalisation de l'étude ACV de la chaîne de valeur ;
- Développer des blockchains pour collecter, sécuriser et restituer des informations fiables et infalsifiables et pour définir un « passeport numérique », intégrant des méthodes de monitoring d'impacts au niveau des processus industriels et du monitoring en phase d'usage ;
- Développer des technologies de désassemblage (IA, robotisation, tri...) pour permettre le recyclage/fin de vie des déchets pour exploiter le gisement de déchets à très court terme.
- Développer les outils permettant de caractériser la santé et le vieillissement ainsi que leur suivi (SHM = Structural Health Monitoring) afin d'augmenter la durée de vie des systèmes de production
- Acculturer les acteurs industriels offreurs de solutions et utilisateurs à l'opportunité et à la nécessité que représente l'industrie circulaire.

## 6.2 Enjeu de l'industrie du futur : Décarbonation

### 6.2.1 Périmètre de la décarbonation pour l'industrie du futur

La **décarbonation** est aujourd'hui un enjeu majeur dans l'industrie. Il est nécessaire pour les entreprises de définir une **stratégie claire pour décarboner**, que cela concerne les émissions liées à la fabrication des produits, et bien sûr **aux consommations directes d'énergies fossiles dans les usines**.

La Stratégie Nationale Bas Carbone place l'efficacité énergétique comme l'un des premiers leviers activables pour réduire l'empreinte carbone industrielle. Moins consommer d'énergies pour le même rendement industriel, c'est déjà moins émettre de CO<sub>2</sub> et moins de gaz à effet de serre (GES) plus généralement. En 2018, l'industrie est le 4<sup>ième</sup> secteur d'émission de GES en France soit 18% des émissions (79,5 sur 445MT CO<sub>2</sub> eq).



2

L'analyse par filière industrielle montre que les émissions de GES proviennent de filières de production intensifs en énergie tels que la métallurgie, la chimie ou la fabrication de minéraux non métalliques (ciment, chaux, verre...). Ces trois filières représentent à elles seules près de 70% des émissions en 2018.

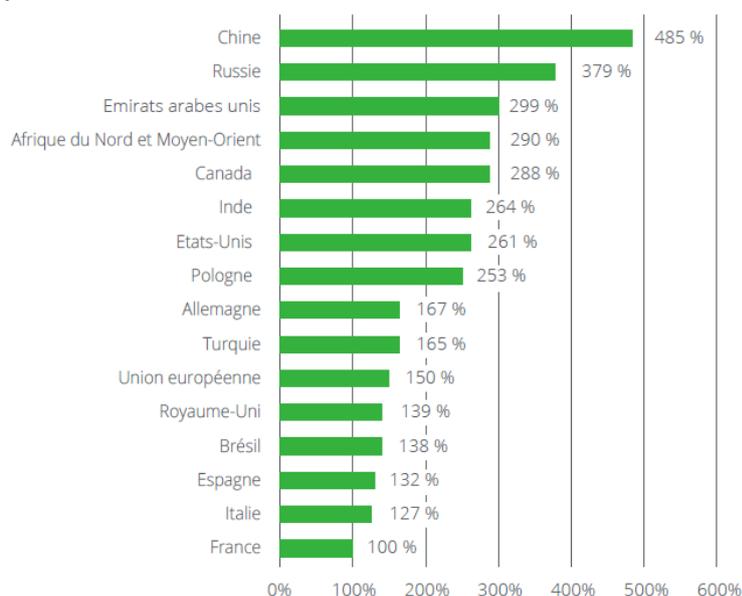
Plus précisément concernant les émissions de CO<sub>2</sub> l'industrie est également le 4<sup>ème</sup> secteur contribuant pour 15% des émissions directes de CO<sub>2</sub>. En 2018 les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'industrie sont de 332 Mt CO<sub>2</sub> qui sont consommé pour 92% par la combustion d'énergie, le resté étant lié au process industriel.

Une étude de Deloitte publiée en janvier 2011<sup>3</sup> présente une évaluation quantitative des impacts de la désindustrialisation et de l'augmentation des importations, ainsi que de l'impact potentiel d'un mouvement de redéploiement industriel, sur l'économie, l'emploi et les émissions de GES. L'analyse est menée sur des filières intensives en énergie montre que la France a subi un mouvement de désindustrialisation durant ces 20 dernières années que la crise du COVID a mis en exergue. Si cette désindustrialisation a engendré une baisse des émissions de carbone de l'industrie française, l'augmentation des importations qui pèse négativement sur l'empreinte carbone de la France. La figure ci-dessous montre le différentiel d'intensité d'émission entre la France et ses principaux partenaires économiques.

<sup>2</sup> Source : livre blanc « Les enjeux de la décarbonation pour l'industrie dans le monde et en France », Energiency (Energie Intelligence for Manufacturing)

<sup>3</sup> Le redéploiement industriel, un enjeu social, économique et un instrument de maîtrise de notre empreinte carbone, étude d'impact de la désindustrialisation sur l'empreinte carbone de la France, Deloitte, Janvier 2021

**Figure 61. Différentiels d'intensités d'émissions entre la France et quelques pays partenaires**

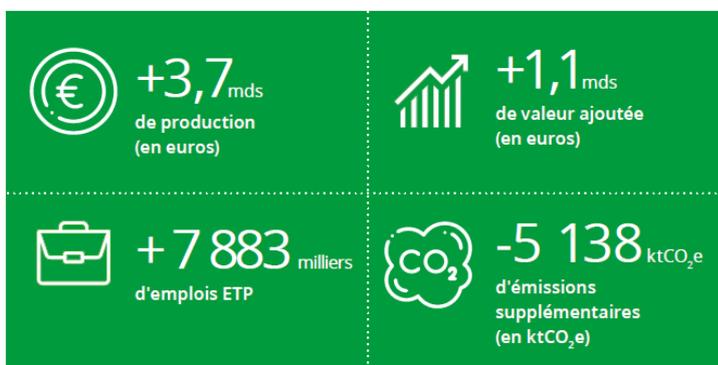


Source : World Development Indicators

La désindustrialisation de la France, par la substitution de la production domestique par des productions importées qui sont plus émettrices en CO<sub>2</sub>, sans inclure le transport, a donc eu pour conséquence une augmentation significative de l’empreinte carbone. Sur le seul périmètre des filières étudiées, cet alourdissement de l’empreinte carbone peut être estimé 2 263 ktCO<sub>2</sub>e d’émissions supplémentaires. Cela représente une augmentation de plus 50 % des émissions associés à ces productions substituées.

L’étude conclut que la réindustrialisation, en particulier des filières les plus intensives en consommation de CO<sub>2</sub> aura non seulement des conséquences économiques positives mais pourra contribuer à diminuer l’empreinte carbone de la France, quand bien même elle engendrerait une augmentation des émissions de l’industrie, et ce sans considérer un effort particulier pour rendre l’industrie plus performante en termes d’émission. La figure ci-dessous résume les estimations de l’étude que ce soit en terme économique (croissance de la production et des emplois) ou environnemental avec un impact positif sur l’empreinte environnementale.

**Figure 70. Résumé des impacts de la relocalisation des activités de la France**



Sources : Deloitte

## 6.2.2 Les technologies pour faciliter l'essor de la décarbonation dans l'industrie

L'ambition de la filière S-I-F est alignée avec les objectifs de la stratégie d'accélération « décarbonation de l'industrie ». Dans ce cadre on peut se référer aux objectifs prioritaires de la stratégie afin d'en extraire les points concernant la filière S-I-F. En particulier, concernant les objectifs :

- Assurer l'émergence d'une offre française, compétitive de solutions pour la décarbonation de l'industrie
- Préparer les technologies de rupture de décarbonation de demain pour atteindre la neutralité carbone en 2050.
- Inciter et valoriser la décarbonation de l'industrie [...], en créant des normes et labels valorisant les technologies françaises, et en explorant les verrous réglementaires potentiels s'opposant à l'émergence de solutions nouvelles.

Concernant ce dernier objectif, afin d'assurer que les normes et réglementations soit appliqué, il est nécessaire d'assurer la traçabilité des composants « bas carbone ». Les outils numériques permettent ce suivi, notamment l'internet des objets, RFID, capteurs, passeports produit... En utilisant un système de registre numérique décentralisé et infalsifiable, la blockchain valide et enregistre tous les événements. Il y a déjà des applications dans les chaînes d'approvisionnement, permettant de nouveaux systèmes de traçabilité et de certification. La blockchain permet de faciliter les échanges, la contractualisation directe entre acteurs, d'enregistrer des échanges, le tout sans passer par un système central.

Selon le GIEC, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est, avec le protoxyde d'azote et le méthane, l'un des principaux gaz responsables de l'effet de serre additionnel. En particulier, certains procédés industriels, comme chez les cimentiers ou sidérurgistes, restent intrinsèquement émetteurs de CO<sub>2</sub>. La solution est alors de récupérer ce CO<sub>2</sub> résiduel en le captant pour le stocker de manière durable ou pour le réutiliser en matière première, par exemple des carburants de synthèse pour le secteur maritime ou aérien.

Les technologies de captage, stockage et valorisation du CO<sub>2</sub> (*CCUS-Carbon Capture, Use and Storage*) consistant à capter le CO<sub>2</sub> dès sa source de production, à le stocker et à le valoriser permettraient de réduire massivement leurs émissions de CO<sub>2</sub>. L'étape de captation constitue un enjeu technologique et économique majeur. La filière se doit de proposer des solutions françaises dans le domaine en lien avec la filière Chimie & Matériaux. Par exemple le stockage du CO<sub>2</sub> avec des équipements pour l'injection dans le sous-sol du gaz. Également l'usage du CO<sub>2</sub> supercritique pour assister l'usinage ce qui réduit la pression d'usinage sur les pièces produisant un effet de refroidissement et assurant une lubrification sèche.

Parmi les technologies de transformation, les électrolyseurs haute température sont les plus prometteurs pour transformer l'hydrogène ou le CO<sub>2</sub> en étant le plus neutre possible en carbone. La filière se doit de développer des solutions bas carbone et basse température. Enfin, la coconversion de l'hydrogène et du dioxyde de carbone en carburants et molécules d'intérêt mise sur des technologies de rupture, telles que la biologie synthétique, la photocatalyse ou encore l'électrosynthèse. En lien avec les industries de la filière Chimie & Matériaux, la filière S-I-F doit proposer des solutions innovantes intégrant nouveaux procédés de fabrication des matériaux et membranes, suivi des matières (IIoT), ingénierie pour mieux gérer les procédés, etc...

## 6.2.3 Recommandations

Les objectifs de décarbonation, c'est-à-dire la baisse des émissions de CO<sub>2</sub> et par extension de l'ensembles des GES, s'imposent de plus en plus aux industriels. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de :

- Développer des **capteurs numériques**, analysant en temps réel les consommations énergétiques, pour-être déployés dans les entreprises ainsi que l'infrastructure IIoT et les outils de traitement et d'optimisation des process ;
- Implémenter des outils d'aide au diagnostic et à la décision, potentiellement basés sur l'intelligence artificielle, pour aller du diagnostic au pronostic. Une fois contextualisées et dotées d'un sens, ces données peuvent alimenter les programmes d'automatisation, y compris l'apprentissage machine et les technologies d'IA plus avancées ;
- Développer des outils d'évaluation du risque que présentent ces environnements pour mettre en œuvre les mesures de sécurité appropriées et prévenir les attaques ;
- Développer des « blockchains vertes » pour 1) collecter, sécuriser et restituer des informations fiables et infalsifiables 2) assurer la traçabilité intelligente de l'empreinte carbone des matériaux jusqu'au produit retraité ;
- Développer des outils de conception de jumeaux numériques et d'outils d'aide à la décision basés sur des IAs pour l'optimisation des flux et la réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- Disposer de technologies support aux énergies décarbonées et à la filière de capture, stockage, transport et utilisation du CO2.
- Mettre l'accent sur les technologies d'épuration (filtration, purification) pour le captage du CO2.
- Encourager la réutilisation du CO2 pour l'usinage, le médical, l'alimentaire et les machines thermodynamiques pour absorber le gisement potentiel.

73% des GES proviennent des usages énergétiques. Il importe donc d'avoir des recommandations spécifiques à l'efficacité énergétique. Économiser l'énergie ou mieux maîtriser sa dépendance aux énergies fossiles sont donc à la fois une nécessité économique et une nécessité environnementale et sociétale qui contribue à la rentabilité des entreprises. Cet objectif nécessite de développer des outils permettant :

- D'optimiser l'efficacité énergétique et de récupérer l'énergie fatale ;
- De stocker et restituer être utilisée en appoint, ou pour des procédés mobiles ;
- D'améliorer la performance (rendement/maintenabilité) des composants et équipements : des technologies de rupture doivent être mises en avant pour améliorer les performances énergétiques des équipements utilisant de l'énergie (tribologie de nouveaux matériaux, moteurs brushless, traitements de surface innovants...).
- De développer des **capteurs numériques**, analysant en temps réel les consommations énergétiques, pour-être déployés dans les entreprises ainsi que de développer des composant pour définir l'infrastructure IIoT et les outils de traitement et d'optimisation des process ;
- D'optimiser la conception des produits (optimisation topologique, fluïdique, éco-conception...) pour ajuster la quantité de matière nécessaire, dans le respect du cahier des charges fonctionnelles ;
- D'optimiser les procédés de fabrication (réduction des intrants et des déchets) ;

## 7 Les technologies capacitanes

### 7.1 Automatisation

#### 7.1.1.1 Définition du périmètre S&T

##### 7.1.1.1.1 Robotique

Un robot est une machine soumise aux lois de la physique qui produit un mouvement qu'il s'agit de réguler en fonction de la tâche à effectuer. Mécanisme actionné, programmable, sur base fixe ou mobile (roulante, volante), sur deux ou plusieurs axes, avec un certain degré d'autonomie, il se déplace dans son environnement pour effectuer les tâches prévues. Dans ce contexte, l'autonomie signifie la capacité d'exécuter les tâches prévues en fonction de l'état actuel et de la détection, sans intervention humaine.

Un système de robot est un système comprenant des robots, des effecteurs terminaux et toute machine, équipement, dispositif ou capteur supportant le robot dans l'accomplissement de sa tâche. Les systèmes robotiques et machines automatisées sont capables d'adaptation : le système de régulation mécanique ou numérique repose sur une boucle de rétroaction couplant un capteur (signal d'entrée) avec un actionneur (signal de sortie).

La classification d'un robot / système robotique se fait notamment en fonction de l'application pour laquelle il a été conçu. Dans le cadre de la filière Solutions pour l'Industrie du Futur, on distingue deux types de robots :

- Un robot industriel (cartésien, scara, polyarticulé, parallèle etc.) est utilisé pour des activités de production industrielle ou activités liées à celles-ci : soudure, peinture, manipulation, chargement, déchargement, palettisation, dévissage, transport de pièces, logistique, expédition, découpage, assemblage, ébavurage, etc.
- Un robot de service professionnel ou un robot de service à usage professionnel est un robot de service utilisé pour une tâche « commerciale », généralement exploité par un opérateur correctement formé : robot de nettoyage, robot de livraison, AGV, robot de lutte incendie, robot de rééducation ou de chirurgie. Dans ce contexte, un opérateur est une personne désignée pour démarrer, surveiller et arrêter le fonctionnement prévu du robot / système robot.

Le périmètre couvert par l'automatisation et la robotique se décompose comme suit :

- Outils et méthodes de **conception mécatronique**
  - Architectures, systèmes, supervision
- **Contrôle et commande** sensori-moteurs,
  - Perception (capteurs), action (insertion, préhension), mouvement et calcul
  - Contrôle hybride force / position, vision / position
- Cognition, décision, autonomie et apprentissage
  - Modélisation et algorithmes d'optimisation (IA)
  - Apprentissage de nouvelles tâches, réalisation en autonomie
- **Interaction et coopération**, gestion de la sécurité
  - Interfaces Homme Machine, cobotique
  - Programmation intuitive (motion capture, hand-guiding, réalité virtuelle...)
- **Gestion de l'énergie embarquée**
  - Recharge, biberonnage, régénération

Ces technologies, combinées, permettent le développement de systèmes robotiques complexes pour adresser des besoins dans des domaines variés comme le nettoyage industriel (piscine de centrale nucléaire) ou des îlots de robotique pour le conditionnement ou le tri sur des lignes de production agroalimentaire.

#### 7.1.1.1.2 Machines Intelligentes

Sous l'appellation « Machine intelligente », on désigne les machines capables de générer et d'interpréter des données de fabrication à des fins de :

- De management de la qualité en temps réel : par détection et correction des dérives pour limiter la production de pièces non conformes
- D'adaptation rapide au changement de production et de supervision de production (jusqu'au jumeau numérique de la machine)
- -De disponibilité accrue des machines et mise en œuvre de maintenance préventive et prédictive
- -De capacité de la machine à apprendre par elle-même
- -De reporting étendues, notamment d'une analyse statistique avancée des performances, de la qualité et des rendements.

La mise en œuvre de machines intelligentes implique d'imbriquer les briques technologiques suivantes :

- Contrôle commande sensori moteurs (Besoin de passer des systèmes de commande rigides et hiérarchisés à des systèmes multi-agents à commande répartie, avec interactions entre les agents) ;
- Capteurs et stratégies d'instrumentation (notamment en environnement sévère et au plus proche de l'outil) ;
- Protocole de connexion des machines à leur environnement ;
- Interaction, perception, coopération et gestion de la sécurité ;
- Gestion de l'énergie embarquée ;
- Cybersécurité.
- Algorithmie métiers : techniques d'interprétation des données et de prises de décision qui permettent une action en (quasi) temps réel sur les paramètres process ou toutes autres commandes de la machine-outil. (cf. *fiches force capacitante « Jumeau numérique » et « Algorithmie »*)

### 7.1.1.2 Etat de l'art scientifique et technique

#### 7.1.1.2.1 Robotique

La robotique industrielle classique est généralement représentée par des bras robotiques, imposants et protégés par des barrières de sécurité, réalisant des tâches techniques répétibles, en continu, avec une grande vitesse et précision. Ces dernières années, les robots collaboratifs pensés pour agir à proximité et/ou en interaction avec des opérateurs humains, en dehors de toute zone protégée ont commencé à s'imposer comme une alternative moins coûteuse et plus flexible qui pourrait séduire en particulier les petites entreprises pour robotiser des productions plus petites et agiles. Avec l'émergence de cette nouvelle robotique, les challenges actuels évoluent pour rendre les robots plus sûrs, plus adaptables - à de nouvelles tâches mais également à leur environnement - et enfin utilisables par des opérateurs non experts.

- Des **systèmes de sécurité** sont essentiels pour permettre aux robots d'intervenir à proximité des opérateurs. On distingue en particulier les systèmes passifs qui s'activent lors de la collision avec un opérateur et les systèmes actifs qui détectent l'opérateur avant la collision grâce à des capteurs (peau capacitive entourant le robot ou barrières optiques permettant de limiter la vitesse du robot lorsque l'opérateur est à proximité). Pour assurer des collisions sans danger avec l'humain, ce type de stratégie impose des vitesses réduites et des charges réduites pour les robots collaboratifs.
- La **compliance**, c'est-à-dire la capacité du robot à avoir un comportement souple, à s'adapter à son environnement pour la tâche qu'il réalise est permise grâce à des capteurs de couple intégrés au bras robotique et assure des capacités d'interaction améliorées, essentielles pour la gestion des collisions mais aussi pour la réalisation de tâches complexes au contact.
- La **préhension** robotique est considérée encore comme un challenge majeur et reste loin des capacités humaines. Les avancées récentes intègrent des approches deep learning permettant de définir la prise optimale pour des objets nouveaux, l'émergence de capteurs plus robustes, le développement de préhenseurs reconfigurables ou des stratégies consistant à imprimer en 3D des mors sur mesure à faible coût.
- La **perception** et en particulier la perception visuelle couplée à une algorithmie efficace donne de très bons résultats en navigation autonome dans les environnements d'usine. Elle montre encore ses limites pour des applications de saisie robotique (dévracage) en raison d'un manque de robustesse ou de cadence.
- La **programmation intuitive** doit permettre à des opérateurs non experts d'utiliser des robots pour réaliser des tâches variées. L'enjeu d'une programmation intuitive est immense quand on sait que le coût d'installation et programmation d'un système robotique est bien plus

important que le coût du robot lui-même. Une vingtaine de langages de programmation différents sont recensés sur les différents robots industriels et même si les robots collaboratifs récents s'accompagnent généralement d'une IHM graphique facilitant la programmation de leur système, des développements sont encore nécessaires pour gérer des tâches plus complexes que du 'pick and place' et s'interfacer avec tout type de langage.

- La **simulation numérique** enfin est un outil intéressant pour l'intégration de robot dans la ligne de production, notamment avec la notion de jumeau numérique qui permet de représenter complètement l'environnement de l'usine et peut être utilisé pour valider la performance de la ligne de production et comparer rapidement différentes solutions d'intégration, réduisant parfois le temps d'intégration de plusieurs semaines à quelques jours.

#### 7.1.1.2.2 Machines Intelligentes

L'état de l'art scientifique et technique des briques préalablement cités est déjà établi dans les fiches « force capacitante » préalablement listées.

Plus spécifiquement appliqués à la Machine intelligente, on peut lister des travaux en cours sur :

- Le développement d'outils et de méthodologies pour la conception de systèmes reconfigurables, avec réglage continu des paramètres de process
- Le développement de méthodes et de connaissances sur les méthodes d'analyse et d'optimisation en temps réel des paramètres sur process (par exemple, adaptation aux matériaux)
- Les travaux sur les protocoles de connexion des machines à leur environnement (MT Connect ou OPCU)
- Le développement d'outils de simulation mécatronique intégrant permettant de configurer des systèmes de production intégrés et optimisés
- Le développement de systèmes de pilotage « closed door machining »
- Les travaux sur l'unification de la chaîne numérique
- Les travaux sur la programmation des machines en langage humain
- L'apparition de composants adaptatifs fondés sur des matériaux intelligents (adaptronique)

#### 7.1.1.3 Etat de l'art industriel (il s'agit là des industriels « offreurs de solutions »)

##### 7.1.1.3.1 Robotique

La France a été l'un des premiers pays européens à mettre sur le marché des robots pour l'industrie manufacturière. Dans le milieu des années 1980s, la France comptait plus d'une centaine d'entreprises de robotique. Les technologies développées par ces sociétés ont toutefois pour la plupart été rachetées par des groupes étrangers.

A la fin des années 1990s, la France ne comptait plus qu'un fabricant de robots poly articulés industriels. Aujourd'hui, seules les entreprises intervenant sur des marchés de niche ou très spécifiques (ex : SEPRO, automation de presses d'injection plastique) ont une offre de robots industriels, mais sont souvent loin du top 10 des fabricants internationaux (Allemagne, Suède, Italie, Japon, et maintenant Chine). On ne compte pas moins de **200 entreprises de type ETI et PME**, actives en particulier dans le domaine de la robotique mobile (véhicules ou drones) et de la robotique de service, notamment pour la santé.

Par ailleurs, plus d'une centaine d'entreprises de type TPE et PME se définissent comme des **intégrateurs robotique**. Le métier de l'intégrateur est de réaliser des équipements clé en main sur une demande client spécifique et de choisir les bonnes technologies pour répondre de façon performante à une fonction, en en garantissant la sécurité. Il co-définit les besoins avec l'utilisateur/client final, conçoit techniquement (ingénierie) les solutions robotiques (conception de cellule / mise en œuvre de robot), assemble, construit, implémente, maintient ces solutions et, enfin, forme et assiste l'utilisateur final. Les intégrateurs assurent donc une fonction essentielle entre le besoin et l'offre technologique,

une fonction globale d'audit, d'assistance technique, de maintenance et de formation. Leur activité technique porte le plus souvent sur la **conception de cellules robotisées** et la **mise en œuvre de robots** (essentiellement des bras manipulateurs et AGV) dans un système de production. Cette fonction vient souvent en complément d'activités dans le domaine des machines spéciales et mobilise des expertises en : informatique industrielle, mécanique, l'ingénierie système, programmation de trajectoires, vision par ordinateur, sécurité et interface homme machine. Les intégrateurs sont généralement spécialisés sur des secteurs particuliers en raison de la nécessaire connaissance du domaine industriel. Il s'agit le plus souvent d'une fonction de proximité géographique.

L'offre en robotique est large et dynamique. On peut citer notamment les acteurs dans les domaines suivants :

- L'industrie: FIVES, CLEMESY, ACTEMIUM, LATSYS, SEPRO, STÄUBLI, ABB, KUKA, FANUC, Universal Robot, YASKAWA, DENSO, SCHUNK, BOSCH REXROTH...
- La logistique : ALFI, SAVOYE, EXOTEC, SCALLOG, ALSTEF
- L'agriculture : SITIA, NAI0, VITIBOT, VITIROVER, KUHN, Manitou
- Le portuaire : GAUSSIN, ECA, BALYO
- Le nucléaire et la construction : BOUYGUES, BARRAKARST, SHARK
- Le service industriel : Alstom (nettoyage), BENE Solution (usinage), ISYBOT (ponçage), CLID (peinture)
- La santé : BA healthcare, Wandercraft, ROBOTCATH, Quantum Surgical
- La défense : ECA Group, AKEO plus, Dassault Aviation
- ...

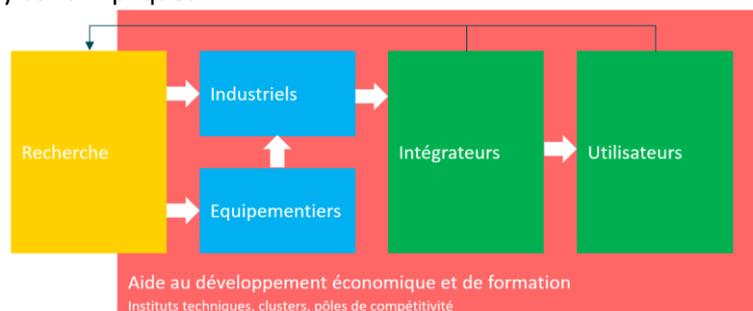
NB : Il est fréquent que des acteurs clés de la robotique française travaillant avec nos grands donneurs d'ordres ne soient pas directement identifiés comme offreurs de solutions robotiques, 'victimes' d'une compréhension restreinte de ce que recouvre ce périmètre technologique qui ne se limite pas aux robots polyarticulés :

			
<b>Europe Technologies</b>	<b>EXOTEC</b>	<b>ECA</b>	<b>BA Healthcare</b>
Robots de soudage robotisé	Robotique pour la logistique	Robotique de défense	Robotique médicale
Naval Group	Décathlon, Uniqlo...	-	General Electric

Cette liste, non exhaustive permet d'illustrer la diversité des domaines de l'automatisation et de la robotique et permet de saisir le caractère transversal de ces technologies, qui s'inscrivent en conséquence dans de nombreuses filières.

#### 7.1.1.3.1.1 Description de la chaîne de valeur constituant l'offre de solutions, état des lieux français

Le schéma ci-dessous décrit une chaîne de valeur de la robotique et présente les différents acteurs qui y sont impliqués :



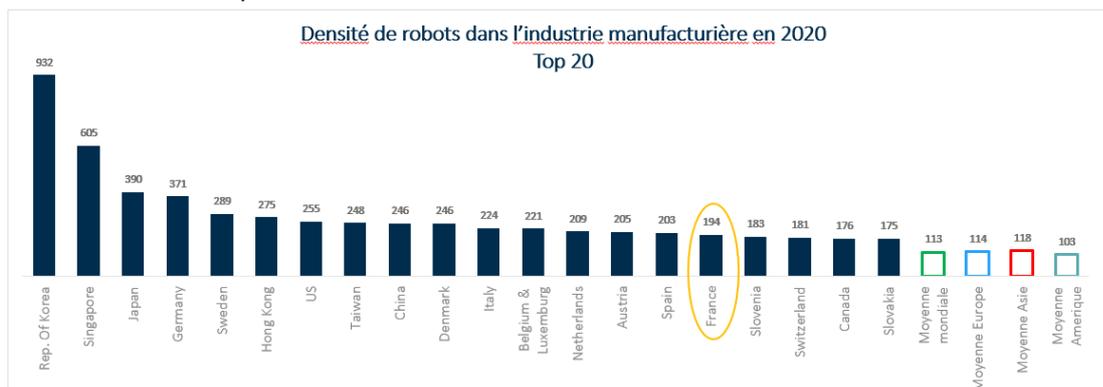
Dans cette chaîne de valeur :

- Les **utilisateurs** améliorent la performance de leur processus de production par la mise en œuvre de systèmes robotiques. *Par exemple, Naval Group, en assurant la soudure par des robots, améliore la qualité de production de ses sous-marins et la qualité d'assemblage de certains modules.*
- Les **intégrateurs** (qui peuvent être concessionnaires) assurent la conception et la mise en œuvre des solutions robotiques. Leur rôle est crucial dans le domaine de la robotique car ce sont eux qui intègrent la solution technique dans un environnement d'utilisation. *Par exemple, Bouygues services (division robotique) intègre des robots d'assemblage et un ensemble d'équipement industriel en Roumanie pour le compte de Dacia.*
- Les **industriels** de la robotique, dits « **fabricants roboticiens** », produisent des robots « élémentaires » destinés à être mis en œuvre sur des lignes de production. *Par exemple, Stäubli fournit des robots polyarticulés pour les domaines de l'agroalimentaire, de l'industrie ou de la santé. Ces robots sont mis en œuvre par des intégrateurs.*
- Les **équipementiers**, ou **fournisseurs péri-robotiques**, fournissent des « briques technologiques » pour la robotique. Ces briques peuvent être des systèmes complets de mobilité, de sécurité ou d'énergie, ou encore des équipements fonctionnels spécifiques (« end of arm tools ») permettant au robot d'effectuer une tâche particulière. *Ainsi BA Healthcare fournit à General Electric un robot mobile pour déplacer des appareils de radiographie dans les blocs opératoires. Ils apportent un processus (peinture, manutention, ...) au robot. Ce sont aussi des fournisseurs de périphériques, constituant des solutions robotisées (vision, sécurité, automatisme, convoyage...)*
- La **recherche** apporte quant à elle des connaissances et savoir-faire nouveaux qui pourront être transférés à des industriels ou équipementiers, parfois à des intégrateurs ou utilisateurs. Ces transferts permettront aux domaines industriels d'être plus performants ou de tenir une position favorable en leur offrant la maîtrise exclusive d'une technologie. *Par exemple, Fives, en exploitant le résultat de projets de recherche, peut proposer des robots de fabrication de pièces composites de grandes dimensions sur le marché international.*

#### 7.1.1.3.1.2 Intensité/volumétrie de la concurrence internationale

Malgré le dynamisme du marché français de la robotique industrielle ces dernières années, la France continue de souffrir de la concurrence internationale.

8<sup>ème</sup> marché mondial et 3<sup>ème</sup> marché européen en termes de robots vendus en 2020, le degré de robotisation de la France est encore loin derrière celui de ses principaux concurrents. En particulier, en termes de densité de robots, soit le nombre de robots opérationnels pour 10 000 salariés dans l'industrie manufacturière, la France se situe au 16<sup>ème</sup> rang mondial avec 194 robots installés pour 10 000 salariés en 2020. Il s'agit de presque la moitié du degré de robotisation allemand, qui compte 371 robots installés pour 10 000 salariés :



Source : IFR

La dépendance vis-à-vis des secteurs clients traditionnels tels que l'automobile et l'aéronautique, qui peinent à sortir pleinement de la crise pandémique, limite quelque peu la croissance du marché de la robotique. Les installations de robots dans l'automobile ont reculé de -13% en 2021 (après -38% en 2020), et les ventes de robots dans les autres secteurs du transport ont affiché une chute de -15%. Cependant, l'année 2021 a été marquée par la progression de secteurs clients « moins traditionnels » de la robotique, tels que les secteurs des machines et équipements industriels, du médical et de la construction immobilière, ce qui montre que le potentiel de croissance du marché reste fort.

#### 7.1.1.3.2 Machines Intelligentes

Les principaux acteurs de la filière l'offre de solution « Machines intelligentes » sont :

- Les fabricants de machines tels que cartographiés par le GT OEM du S-I-F :

Process Continu	Batch/Semi Continu/Hybride				Manufacturier/Discret							Infrastructures		
Transformation de matières premières brutes	Dosage et Mélange des produits et fluides	Equipements mobiles	Gestion des utilités industrielles	Gestion de l'énergie	Fabrication et transformation des produits	Assemblage et finition des produits	Robotisation Cobotisation	Levage Convoyage Stockage	Emballage Conditionnement	Qualité et sécurité des produits et des process	Respect des exigences énergétiques et environnementales	HVAC	Contrôle d'accès fermeture à usage industriel	Usage général pour le grand public
28.21 ; 28.92	28.29B	28.30	28.13		28.41 ; 28.91 ; 28.93 ; 28.94 ; 28.95 ; 28.99	28.49	28.99	28.22	28.29A	28.51B		28.25	28.99B	28.23 ; 32.5

**De l'extraction de la matière première au produit final contrôlé et écoresponsable**

- Leurs fournisseurs :
  - o Offreurs de composants élémentaires : Engrenages et organes de transmission, Roulement à bille, éléments de commande
  - o Offreurs de composants complexes : Capteur intelligent, Moteurs, Instrumentation, Réducteurs
  - o Offreurs d'équipements et systèmes : Roulements, Automatismes, Motion control

#### 7.1.1.4 Objectifs scientifiques 2030

**Considération stratégique : renforcer la Recherche sur les nouvelles robotiques**

- Accélérer les travaux sur la **robotique collaborative** (développer des interfaces de programmation intuitive permettant de pallier le manque d'homogénéité des langages de programmation robotique, augmentation de l'acceptabilité via la conception et le déploiement de programmes de sensibilisation des personnels par application métier, mener et suivre des enquêtes annuelles de retours d'expérience)
- Développer les **systèmes autonomes et mobiles** (favoriser les échanges indoor/outdoor en temps réel, sécuriser les systèmes autonomes portant une fonctionnalité opérative)
- Développer la **préhension d'objets souples, de formes complexes ou de grandes dimensions** (développer la chaîne de conception/production de préhenseurs adaptés)

#### 7.1.1.5 Objectifs industriels à 5 ans

##### 7.1.1.5.1 Robotique

**Considération stratégique : créer les conditions d'un tremplin à l'industrialisation pour éviter la « Vallée de la Mort » aux projets innovants**

- **Dérisquer et éprouver** : disposer de centres / plateformes qui offrent des environnements aux normes et contraintes industrielles pour éprouver les solutions innovantes au contact du Marché, et proposer aux start-ups ce service de 'mise en condition'
- **Favoriser l'accès au Marché** des solutions innovantes : commandes d'état, engagements des donneurs d'ordres (création d'une Chaire centrée sur le lien entre donneurs d'ordres et intégrateurs ?)
- **Protéger nos pépites technologiques des « appétits étrangers »** pour constituer une offre française souveraine, par exemple à travers des incitations fiscales pour les grands groupes à 'adopter' ces structures innovantes et les développer en leur sein (financement, garanties, accès à des marchés d'envergure)

#### **Considération stratégique : accélérer les développements et pousser à la réutilisation des briques technologiques**

- Organiser les tests et expérimentations auprès des organismes habilités et neutres afin de publier les performances sur des **cas d'usages industriels**
- Favoriser les **transferts d'applications** entre filières utilisatrices (identifier des **socles technologiques génériques duplicables** et caractériser les spécificités techniques)
- **Accélérer les analyses d'opportunité** à travers des moyens de mise en service virtuelle (intégration des systèmes robotiques dans des environnements digitaux RA / RV / jumeaux numériques)
- Favoriser l'usage de **briques logicielles développées OpenSource** (ROS, ...); les durcir et les maintenir pour qu'elles puissent être incorporées dans les applications industrielles (acquisition de données, traitement des données, analyse et outils de décision)

##### 7.1.1.5.2 Machines intelligentes

Les enjeux pour le développement de l'offre de machines intelligentes sont de trois ordres :

1. Pour la montée en gamme du parc machine ancien : Capturer et traiter l'information : accès à des données nouvelles et aussi présentes dans la machine : instrumentation de la machine)
2. Pour la nouvelle offre de machines : savoir injecter l'analyse métier dans les techniques d'interprétation des données et de prises de décision qui permettent une action en (quasi) temps réel sur les paramètres d'usinage ou toutes autres commandes de la machine-outil.
3. Pour tous : développement du concept de « Machine as a service » : le fabricant utilisateur n'achète plus sa machine, mais paie le fournisseur par un système d'abonnement en fonction de l'usage

##### 7.1.1.6 Stratégie (enjeux/usage) (concerne les industriels ou filières industrielles utilisatrices).

###### 7.1.1.6.1 Robotique

Les enjeux de compétitivité de l'automatisation et de la robotique portent sur :

- Le passage du cap de **l'industrialisation** des systèmes mécatroniques et logiciels pour assurer la continuité entre la sortie du laboratoire et la mise en œuvre industrielle. Cela vaut pour des systèmes mécatroniques mais aussi pour des logiciels de contrôle et de commande.
- **L'émergence de nouvelles machines automatisées** et d'entreprise porteuse de ces innovations est l'un des éléments clés pour dynamiser la compétitivité de notre pays. De nombreuses entreprises démarrent en France puis sont obligées de quitter le territoire pour se développer.

- La maîtrise des logiciels : les installations robotiques sont gérées par des logiciels de supervision. Ces logiciels destinés à concevoir, dimensionner, simuler, émuler, exploiter des solutions robotiques sont déterminants pour leur déploiement industriel.
- **L'acceptabilité des systèmes robotiques** : apportant plus de performance, l'automatisation fait parfois émerger des craintes de suppression d'emplois, notamment pour les emplois dits mono-tâches. L'enjeu est de favoriser la diffusion des technologies d'automatisation et de robotique sur le territoire français en levant les verrous d'ordre psychologique et sociétal : permettre une meilleure familiarisation / appropriation technologique, accompagner l'intégration par une meilleure gestion des impacts de ces technologies sur la mutation des emplois et des compétences (vers une plus forte qualification/valeur ajoutée pour l'Humain vs. Prise en charge de la répétitivité et de la pénibilité des tâches par le robot) et les changements organisationnels induits, offrir de nouveaux métiers en lien avec de nouveaux usages.

Les enjeux de compétitivité de l'automatisation et de la robotique portent sur :

- **Le développement de produits au moins à l'état de l'art** permettent aux offreurs de solutions (en l'occurrence les entreprises de robotiques) de proposer des produits concurrentiels avec les solutions que peuvent proposer des entreprises concurrentes (non européennes). Pour cela les développeurs de solutions et les intégrateurs robotiques devront intégrer des technologies telles que :
  - Des technologies de capteurs multi-sens et en particulier des capteurs de visions 3D
  - L'intelligence artificielle pour permettre une plus grande adaptabilité et résilience des systèmes robotiques à des variations de l'environnement
  - Des technologies d'interaction intuitive permettant une redéfinition plus facile des tâches à réaliser sans faire appel à un intégrateur
- **Produits durables et réparables, réemploi** : Augmentation de la **durée de vie** de systèmes industriels de production ou de logistique.
  - Favoriser, auprès des utilisateurs finaux, le réflexe d'augmenter la durée de vie des produits en sollicitant les offreurs de solutions,
  - Favoriser l'émergence d'entreprises innovantes, des offreurs, dans le domaine du recyclage ou de l'évolution de systèmes de production,
  - Aider les intégrateurs existants et les fabricants au développement de leurs activités de services techniques auprès de leurs clients (maintenance, évolution, retrofit...).
  - Apporter des solutions permettant de prolonger la durée de vie des installations robotisées. En particulier en traitant l'obsolescence technologique.
- **Sobriété et efficacité énergétique** : développement de solutions techniques innovantes pour caractériser la santé et le vieillissement des éoliennes et autres unités de production d'énergie.
  - Utilisation de technologies de contrôle robotisées pour qualifier le vieillissement des pâles d'éoliennes afin d'augmenter la durée de vie des systèmes de production d'énergie vélique.
  - Utilisation de machines spéciales automatisées pour produire des composants de meilleure qualité (pales, aubes...) en consommant moins de matériaux et des matériaux plus recyclables.

La robotique et l'automatisation s'adressent à l'ensemble des filières. La filière utilisatrice traditionnelle de ces technologies est l'**industrie manufacturière** (agroalimentaire, biens d'équipements, pharmacie/cosmétique, électronique...).

Au-delà de ces usages historiques, l'automatisation et la robotique se diffusent désormais dans les domaines de la logistique, de la santé, de la défense, de l'agriculture. Plusieurs « pépites » françaises dynamiques tracent leur chemin au sein de ces applications émergentes, telle Exotec, à Lille, valorisée à plus de 2 milliards d'Euros dans la robotique pour la logistique, ou encore Europe Technologie, à Nantes, dans le domaine de la soudure robotisée.

#### 7.1.1.6.2 Machines Intelligentes

L'usage des machines intelligentes adresse l'ensemble des filières CNI.

En termes de compétitivité/souveraineté :

- Capacité à faire des séries plus petites voire des produits personnalisés avec la rapidité de la production de masse ;
- Management de la qualité en temps réel par détection et correction des dérives ;
- Adaptation rapide au changement de production.

En terme de frugalité/circularité :

- Pilotage de la consommation énergétique et réduction du talon énergétique ;
- Réduction des intrants (ex : lubrification raisonnée en usinage) ;
- Mise en place de maintenance prédictive ;
- Réduction des non-conformités.
- 

#### 7.1.1.7 *Recommandations*

##### 7.1.1.7.1 *Enjeux techniques à relever :*

Les enjeux de l'automatisation portent sur la dynamisation des activités de développement des systèmes robotiques, leur maintien dans le temps lié à la volonté des industriels de faire durer les moyens de production. On peut citer les thématiques clés suivantes :

- (i) La conception mécatronique,
- (ii) La programmation intuitive,
- (iii) La production et l'édition de logiciels pour l'automatisation et la robotique,
- (iv) L'intégration des sciences humaines pour faciliter l'acceptabilité des systèmes robotiques.

L'usine du futur mets l'accent sur la robotique interactive intelligente avec pour objectif d'améliorer et d'accélérer les techniques d'interaction humains-robots afin de créer des robots collaboratifs plus intuitifs dans leurs utilisations et plus autonomes dans leurs mouvements.

Un second thème porte sur la création de robots plus innovants utilisant de nouveaux concepts afin d'avoir de plus grand rayon d'action, une plus grande manipulabilité et une plus grande autonomie énergétique. Les futurs robots devront comprendre, communiquer et se fondre en toute sécurité avec les humains de manière sans précédent.

Le PEPR O2R (Organic Robotics) a pour ambition d'Identifier les déterminants de l'adaptation sociale des robots et leurs liens avec le comportement de ces derniers et leur conception, de créer des architectures matérielles et logicielles intégrées pour les robots, permettant une intelligence incarnée et une robustesse face à la complexité de leurs environnements d'exercice et d'usage et de doter les robots de capacités d'interactions fluides avec les humains.

En s'appuyant sur ces enjeux et ces actions il s'agit d'appliquer ces avancées dans le domaine de la robotique industrielle afin de :

- Mettre à disposition des plateformes physiques où l'ensemble d'acteurs peuvent se retrouver pour développer ensemble les solutions de bout en bout qui donneront un avantage concurrentiel à la France dans la robotique
- Développer le concept de continuité numérique dès la conception des produits robotiques à leur démontage en fin de vie, la consolidation de jumeaux numériques holistiques qui permettent l'opération de robots apprenants dans des milieux industriels
- Développer la convergence entre actionnement, intelligence artificielle et microélectronique pour ouvrir la voie à de nouveaux paradigmes de robotique industrielle
- Développer un programme de formation initiale et professionnelle de Robotique dans le supérieur (formation initiale et professionnelle) pour la création de compétences et de savoir-faire spécifiques à la robotique pouvant accélérer et alimenter les entreprises innovantes du secteur.

Au-delà des recommandations scientifiques et techniques :

##### 7.1.1.7.2 *Recommandation en termes d'objectifs de progrès économique et durable*

Afin de répondre à la demande de l'industrie de faire durer les moyens de production, nous recommandons de :

- Améliorer la **maintenance** et le **maintien des conditions opérationnelles** des systèmes robotiques :
  - Business de rétrofit d'installations (allongement des durées de vie)
  - Revalorisation des métiers et intégration du numérique
  - Intégration de technologies IoT, 5G, cybersécurité
- Permettre le **redéploiement** des systèmes robotiques à moindre coût:
  - Intégration de technologies de programmation intuitive permettant à l'opérateur de modifier la séquence du robot
  - Intégration de capteurs et solutions d'IA pour des systèmes plus adaptables

#### 7.1.1.7.3 Recommandation en termes en marchés

Les trois propositions suivantes sont proposées pour dynamiser l'activité des intégrateurs et fournisseurs de technologies du domaine de la robotique :

- Aide aux entreprises à **l'export**
  - Représentation de la robotique par Business France et EVOLIS
  - Soutien à la structuration d'offre commune à l'export
  - Promotion et faire valoir de cas d'exemples (EXOTEC)
- Aider les acheteurs de **primo-technologie**
  - Achats publics à favoriser sur le territoire
  - Réduction fiscale pour les acheteurs de nouvelles solutions
  - Référence au Modèle américain du Business Act (Serge Soudoplatoff)
- **Représentation nationale** de la robotique
  - Représentation à l'extérieur : Europe, IFR, JARA...
  - Profiter des vecteurs existants (EVOLIS, CNRS, IRT, CEA)
  - Animation unique à l'intérieur du pays

#### 7.1.1.7.4 Recommandation en termes d'outils pour faciliter le travail de fabricants de systèmes robotiques :

- Faciliter **l'intégration** des robots et des systèmes robotiques complexes :
  - Formation de techniciens et d'ingénieurs en robotique
  - Méthode et outils pour la mise en place de systèmes robotiques
  - Déployer une interface de programmation accessible aux non experts permettant de pallier l'absence de standard (trop de langage de programmation robotique différents)
  - Etudes technico-économiques simples et exploitables
- Regrouper les **informations techniques et scientifiques** par un guichet des projets R&D
  - Recensement des résultats disponibles et exploitables (ROBOTEX, IRT, CEA...)
  - Aide à la maturation de résultats de recherche (appuis techniques)
  - Mutualisation des achats et développements entre les entreprises (PME)

#### 7.1.1.7.5 Recommandations en termes de formation

**Il s'agit de soutenir la montée en compétences nécessaire à la diffusion des technologies robotiques**

- Renforcer la **formation à tous niveaux** (par exemple, dans le secteur de la santé, introduire des enseignements technologiques et favoriser le recrutement d'ingénieurs dans les hôpitaux, à des niveaux de salaire comparables à ceux du privé)
- Attirer les talents pour répondre aux besoins de compétences : favoriser en particulier l'émergence d'**intégrateurs robotiques 4.0** capables d'appréhender toutes les dimensions de la transformation numérique (via des programmes d'accélération ciblés)
- **Sensibiliser** les utilisateurs sur les implications sociétales de la transformation robotique

#### 7.1.1.8 Recommandation finale

L'usine du futur mets l'accent sur la robotique interactive intelligente avec pour objectif d'améliorer et d'accélérer les techniques d'interaction humains-robots afin de créer des robots collaboratifs plus intuitifs dans leurs utilisations et plus autonomes dans leurs mouvements.

Un second thème porte sur la création de robots plus innovants utilisant de nouveaux concepts afin d'avoir de plus grand rayon d'action, une plus grande manipulabilité et une plus grande autonomie énergétique. Les futurs robots devront comprendre, communiquer et se fondre en toute sécurité avec les humains de manière sans précédent.

Le PEPR O2R (Organic Robotics) a pour ambition d'Identifier les déterminants de l'adaptation sociale des robots et leurs liens avec le comportement de ces derniers et leur conception, de créer des architectures matérielles et logicielles intégrées pour les robots, permettant une intelligence incarnée et une robustesse face à la complexité de leurs environnements d'exercice et d'usage et de doter les robots de capacités d'interactions fluides avec les humains.

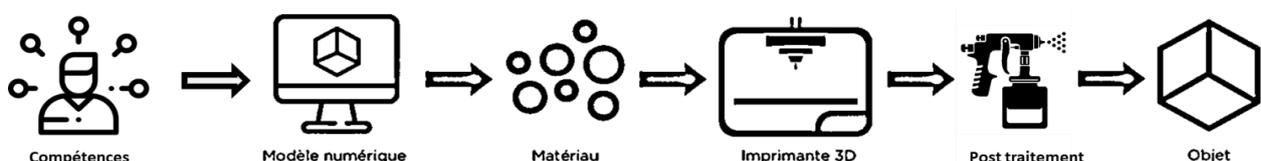
**Recommandation :** En s'appuyant sur ces actions très amont et génériques il s'agit d'appliquer ces avancées dans le domaine de la robotique industrielle afin de :

- Mettre à disposition des plateformes physiques où l'ensemble d'acteurs peuvent se retrouver pour développer ensemble les solutions de bout en bout qui donneront un avantage concurrentiel à la France dans la robotique ;
- Développer le concept de continuité numérique dès la conception des produits robotiques à leur démontage en fin de vie, la consolidation de jumeaux numériques holistiques qui permettent l'opération de robots apprenants dans des milieux industriels ;
- Développer la convergence entre actionnement, intelligence artificielle et microélectronique pour ouvrir la voie à de nouveaux paradigmes de robotique industrielle ;
- Étendre l'usage de l'IA en s'affranchissant du besoin en données qualifiées massives en développant des approches semi-supervisées et des outils de génération de données physiquement réalistes (GAN, transfert de style,...) ainsi que l'IA distribuée ainsi que la sécurisation des données via des registres distribués (blockchain) ;
- Mutualiser des données souveraines et sécurisée pour favoriser l'apprentissage, grâce à une plateforme portée par l'Alliance Industrie du Futur sur la base de technologies comme celle portée par le projet OTPaaS en lien avec GAIA-X ;
- Développer des outils de protection des logiciels et des données produites par les machines ;
- Informer, conseiller, accompagner les utilisateurs (industriels) dans leur transformation digitale.
- Développer un programme de formation initiale et professionnelle de Robotique dans le supérieur (formation initiale et professionnelle) pour la création de compétences et de savoir-faire spécifiques à la robotique pouvant accélérer et alimenter les entreprises innovantes du secteur.

## 7.2 Fabrication additive

### 7.2.1.1 Définition du périmètre S&T

La fabrication additive désigne un ensemble de procédés qui prend en compte une chaîne de valeur complète, du besoin à l'objet :



#### 7.2.1.1.1 Définition

Procédés de fabrication qui permettent de réaliser, sans outillage préalable, des pièces fonctionnelles directement à partir d'un modèle CAO, par addition de matière (polymère, métal, céramique...) sous forme de poudres, fils ou plaques, soumis à l'effet d'un rayonnement UV, d'une buse chauffante, d'un laser, d'un faisceau d'électrons, d'un arc électrique, d'ultrasons, de frottements, etc. La fabrication additive permet de réaliser des produits de forme complexe à l'unité, en petite, moyenne ou grande série. L'intérêt porté à ces nouveaux procédés est lié aux possibilités offertes de conception (Allègement, personnalisation, texturation, canaux internes,) et l'apport en flexibilité dans les flux de production grâce à une fabrication numérique sans outillage.

La fabrication additive, prolongement de l'Impression 3D dans le domaine industriel, est un des piliers de l'industrie du futur. Son déploiement est :

- **Un défi applicatif** : elle bouleverse la chaîne de valeur industrielle. Elle offre des possibilités de gains de performances, la diminution des coûts, la réduction du 'time to market'
- **Un défi environnemental** : elle entraîne une réorganisation profonde de la 'supply chain'. Elle permet une production à la demande, à proximité de l'usage final, avec la juste-matière, soit la bonne quantité avec le bon matériau au bon endroit. Elle permet aussi de réparer ou de re-fabriquer des pièces détachées pour prolonger le cycle de vie.
- **Un défi sociétal** : elle redistribue la valeur ajoutée sur toute la chaîne, dans un concert mondial en ébullition. Trois grands enjeux : souveraineté nationale, relocalisation, formation des talents. Elle propose une image moderne (numérique, collaboratif, durable, ...) rendant ainsi plus attractive l'industrie auprès de nouveaux talents.
- **Un défi commercial** : vendre plus et plus vite que la concurrence, notamment US et asiatique, afin de gagner des parts de marché, baisser les coûts et amortir rapidement les investissements.
- **Un défi cyber sécurité** : par nature connectée, elle peut mettre à risque nos sites industriels et la propriété industrielle, design et recettes de fabrication en premier lieu.

La fabrication additive arrive en phase de maturité pour certaines applications et demande encore des efforts soutenus pour les autres afin d'atteindre des niveaux de performance et de coût tels qu'attendus par les industriels et utilisateurs finaux.

#### 7.2.1.1.2 Un domaine transverse étendu

La fabrication additive regroupe donc plusieurs procédés et fait appel à différents domaines connexes, intégrés suivant les usages cibles :

#### 7.2.1.1.3 Domaines natifs du CSF Solutions Industrie du Futur

- Briques technologiques de l'industrie du futur :
  - o Robots pour certaines machines (dont DED/WAAM en métal, FDM pour béton, FDM pour polymères à renforts continus).
    - ➔ Une imprimante 3D est une machine intelligente
  - o Systèmes distribués, mise en réseau, traçabilité et sécurité (cf. systèmes distribués / blockchain)
  - o Matériaux : la fabrication additive a pour spécificité que la matière est intimement liée et donc indissociable du procédé/machine
    - Matières : métal, polymère, céramique, béton, verre organique, ...
    - Granularité, texture, porosité
    - Tenue physique, durabilité
    - Contact alimentaire
    - Biocompatibilité : Implantation humaine, cellules vivantes
  - o Chaîne numérique :
    - Modélisation numérique

- Jumeau numérique de l'imprimante 3D et ou de la pièce
- Ingénierie des modèles : pour les pièces à imprimer
- Ingénierie des systèmes : pour les imprimantes complexes et les usines intégrées de fabrication additive
- Intelligence Artificielle :
  - En amont : reverse engineering, reconnaissance 2D pour migration vers 3D, design génératif, simulation
  - Pendant ou en aval de la fabrication : analyse des données pour traitement des erreurs et retour vers engineering
  - En chaîne complète : validation et certification à partir des données plutôt que tests destructifs sur éprouvettes ou sur pièces
- Contrôle :
  - En amont, caractérisation des matériaux
  - En aval, conformité des pièces réalisées
  - En chaîne complète : traçabilité numérique
- Post traitement :
  - Procédés de fabrication : Parachèvement de la géométrie, tribofinition, traitement thermique ...
- Organisation industrielle
  - Chaîne de production, de la pièce unitaire à la production de masse personnalisée
  - Certifications, contrôles et tests
  - Supplychain et fabrication distribuée

#### 7.2.1.1.4 Domaines à articuler avec d'autres CSF :

- Ingénierie applicative : propre à chaque CSF car très lié au métier (CSF : Aéronautique, Ferroviaire, Automobile, Industriels de la mer, Nucléaire)
  - Nouvelles formes : design génératif
  - Nouvelles structures de pièces : lattices, 4D
  - Nouvelles pièces : intégration de fonction
  - Nouvelles performances : allègement, résistance mécanique, élasticité
- Science des matériaux : CSF Chimie et CSF Mines et Métallurgie
  - A préciser par Domaines et Matières : métallique, polymère, céramique, béton, verre organique, ...

#### 7.2.1.1.5 Axes d'approche

La fabrication additive repose sur des éléments communs à l'ensemble des procédés et sur des variants :

- Éléments communs
  - Le point de départ est une source numérique d'un objet 3D
  - Une machine intelligente va exécuter des tâches de fabrication
  - Une matière va être accumulée couche par couche
  - Des post-traitements et finitions sont nécessaires
- Variants :
  - Pièces
    - Dimension : du plus petit à très grand
    - État de la pièce en fin d'impression : finie, verte (nécessitant une post-cuisson) ou brut (nécessitant des post-traitements)

- Application : Finale, outillage, complément, rechargement,
- Machines
  - Axes de fabrication fixes, robot fixe ou mobile
  - Chambre de fabrication ouverte ou fermée, thermo-régulée ou pas
- Matériaux
  - Mono ou multi-matériaux, par zone ou par couche
  - Forme liquide ou solide, résine, poudre, fil ou filament
- Criticité
  - Faible : maquette jetable, prototype bonne matière, outillage provisoire, pièce simple
  - Elevée : pièces d'usage contraint : pièces de structure, de fonctions critiques, implants et prothèses médicales, ...
- Volumétrie
  - Unitaire, petite série, grande série, personnalisation de masse

Cette grande variété explique sa richesse et la grande diversité des possibilités offertes. Néanmoins, cela illustre aussi la difficulté de conduire des actions efficaces, non redondantes et compétitives.

En vue de donner un cadre à des actions structurantes et efficaces à l'échelle nationale, nous préconisons de sortir de l'approche traditionnelle par matériau et d'opter pour une approche centrée sur 5 axes :

#### **Besoins/Technologies / Matériaux / Machines / Process industriel**

##### 7.2.1.1.6 Quels sont les besoins pour la France ?

Si nous souhaitons répondre à des objectifs de souveraineté, nous devons maîtriser les technologies clés qui sont assemblées :

- Besoin brique par brique : logiciels, matériaux, machines
  - Besoin pour les logiciels d'assurer une continuité numérique sur toute la chaîne de valeur de façon à optimiser chacune des étapes de la fabrication
  - Besoin de développer de nouveaux matériaux et d'assurer la compatibilité matériau/procédé
- Le besoin de R&D varie fortement suivant les domaines d'usages (industries du transport, artisanat, médecine, construction...) et les procédés spécifiques : DED, FDM, Binder jetting...
- Rattraper le retard sur des procédés clés : Jet Fusion, Binderjetting, WAAM, MBJ...
  
- Créer une chaîne de valeur dans le domaine des composants
  - ➔ Système d'alimentation en matière : granulés, filaments, liquides, ...
  - ➔ Tête de dépôt (couleur par ex) ou de transformation (multilaser par ex)
  - ➔ Chambre de fabrication
  - ➔ Four de frittage
  - ➔ Systèmes robotiques (bras robots, robots mobiles)
  - ➔ Equipement de post traitement
  - ➔ Capteurs, pilotage du procédé

##### 7.2.1.2 Etat de l'art industriel (il s'agit là des industriels « offreurs de solutions)

La France se place à la 4<sup>ème</sup> place du marché mondial de la fabrication additive en terme de revenus générés et à la 7<sup>ème</sup> place en terme de machines industrielles installées (Chiffres 2020) (<https://www.3dprintingmedia.network/the-top-20-global-am-markets/> ) Chiffres de 2019

The top 20 global AM markets. Source: 3dpm elaboration of SmarTech Analysis data (data in millions of US dollars).

Germany	\$ 1,282.12
USA	\$ 1,231.51
China	\$ 1,045.94
France	\$ 489.23
Italy	\$ 480.80
UK	\$ 472.36
Japan	\$ 354.27
India	\$ 328.97

Les investissements dans le monde entier, tant public que privés, sont colossaux. La France ne dispose pas des capacités financières, technologiques et humaines pour se positionner simultanément sur tous les sujets.

Les principaux acteurs de la filière « offre de solution » français sont :

- Fabricants d'équipements d'impression 3D selon différents procédés, dont : AddUp (fusion laser) ; Inetyx, Prodways, VLM Robotics (dépôt de matière) ; Addimetal (Metal Binder Jetting), Epeire3D, Pollen, Zetamix, (Dépôt fil + frittage), Lynxter,.....
- Editeurs de logiciels : environ 10 Acteurs, dont Dassault systèmes, Siemens Digital Industries Software, ESI, Cognitive Design Systems, Adaxis, SPARE PARTS 3D ; Vistory (BlockChain), .....
- Fabricants et fournisseurs de matériaux et gaz pour la FA alimentant les équipements : Aubert&Duval, Constellium, Arcelor, Air Liquide, Arkema, Kymia, Aperam...
- Fabricants d'équipements de post traitements et contrôles : Environ 10 acteurs, dont ECM (four de traitement thermique), Actemium (systèmes de gestion de la poudre), INEO SURF ( finition de surface ), RX solutions (tomographie), ...

#### 7.2.1.2.1 Qualifier et prioriser les besoins des filières stratégiques

Besoin est ici de disposer d'une roadmap croisant les besoins stratégiques avec l'état de l'art dans le domaine de la fabrication additive.

Aujourd'hui la fabrication additive est majoritairement utilisée à des fins de prototypage ou pour la fabrication de pièces d'outillage. La production de pièces finies gagne du terrain dans les applications et constitue un axe de développement et de croissance important pour les prochaines années.

Par exemple (ex fictifs à ce jour) :

- En 2025, 30% des petites séries des accessoires de luxe métalliques chaussant et maroquinerie seront relocalisés en France et fabriqués en fabrication additive.
- En 2028, une batterie solide de nouvelle génération aura une performance de +150% et elle sera composée à 35% de sa valeur par de la fabrication additive.
- 

La compréhension par les industriels des bénéfices apportés par la fabrication additive contribue à dynamiser le secteur et à soutenir le développement de l'impression 3D de pièces finies.

#### 7.2.1.3 Objectifs scientifiques 2030

##### 7.2.1.3.1 Accompagner la montée en gamme des machines

###### 7.2.1.3.1.1 Robustesse des machines :

- **Amélioration de la maîtrise dimensionnelle pendant la fabrication.** Il est important de produire des pièces au plus près des dimensions visées et pour cela il est indispensable de détecter au plus tôt de tels écarts (instrumentation adaptée, indicateurs discriminants). Cela permettra une

meilleure gestion des trajectoires nécessitant un traitement rapide des données en vue d'une boucle de rétroaction. Pour les technologies sans fusion de la poudre, il est important de contrôler au mieux les évolutions dimensionnelles durant le frittage.

- **Amélioration de la qualité matière.** Cela passe par une détection efficace des défauts, tout au long de la chaîne de fabrication (par exemple qualité du lit de poudres, suivi de la thermique du bain de fusion, imagerie 3D en cours de fabrication, caractérisations post fabrication...). En plus du développement de nouvelles instrumentations, cela exige aussi d'accélérer efficacement le traitement de quantités importantes de données en introduisant de l'IA. Enfin, mieux connaître les liens microstructure/procédés/durabilité permettra de les intégrer pleinement dans les démarches de développement de produits et de les optimiser.
- **L'optimisation des propriétés mécaniques des pièces** par le choix de nouveaux alliages ou la fabrication multi-matériaux permettant de maîtriser localement des propriétés spécifiques (dureté, résistance à la corrosion).
- **Minimisation de l'impact environnemental.** Celui-ci reste mal connu pour la plupart des technologies FA aujourd'hui mises en œuvre. Pour les technologies fusion de poudres, un effort doit être fourni sur la capacité à travailler avec des poudres recyclées ou présentant des morphologies moins exigeantes. Une amélioration des modèles économiques de la FA est par ailleurs nécessaire, prenant mieux en compte la fin de vie des pièces obtenues par FA et l'obsolescence des procédés.

#### 7.2.1.3.1.2 Productivité des machines :

- **Accroître les dimensions des machines.** Dans les technologies lit de poudres ou sans fusion, un défi important pour le futur réside dans la capacité à pouvoir produire des pièces de plus grande taille. Cela doit notamment passer par une augmentation du volume des chambres de fabrication. Pour les procédés sous dépôt d'énergie, l'enjeu est également de fabriquer des pièces de structure de grandes dimensions (plusieurs mètres) avec des propriétés mécaniques maîtrisées. Dans ce contexte, il faut souligner la présence d'acteurs français, fabricants de machines et intégrateurs, garants d'une indépendance nationale sur ces technologies stratégiques.
- **Augmenter les rendements.** Plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre pour atteindre cette cible : technologies multi faisceaux, optimisation de l'interaction faisceau – matière, sources d'énergie plus puissantes (ex. technologies haut débit en fusion fils...). Pour les technologies sans fusion, un potentiel important de gain de productivité réside dans la capacité à accélérer l'étape de frittage.
- **Favoriser les procédés hybrides.** De nombreuses avancées ont déjà été réalisées dans ce domaine avec par exemple l'arrivée sur le marché des technologies additives / soustractives mais celles-ci doivent être consolidées par une évaluation plus systématique des bénéfices pouvant être tirés de ces procédés, notamment en termes d'état de surface, voire de fonctionnalisation de ces surfaces. Dans ce domaine il est important de transférer les avancées technologiques pour le développement d'une offre Française innovante et compétitive

#### 7.2.1.3.1.3 Développement de l'offre de solutions de post traitement

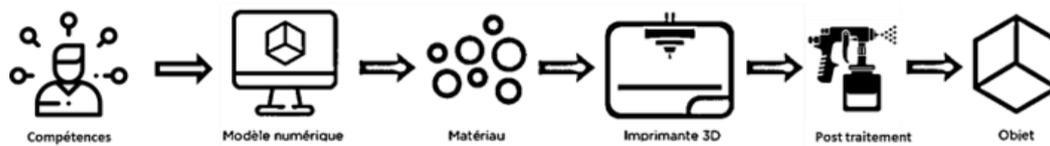
- **Amélioration de la qualité de surface** via l'hybridation de technologies en couplant procédés additifs et soustractifs (ex. : usinage, laser femtoseconde selon procédé FA utilisé) ou en combinant plusieurs procédés additifs (fusion fil et poudre).
- **Contribution au développement de solutions de finition de surface innovantes** permettant d'augmenter les performances des pièces en environnements sévères (tenue à la fatigue et corrosion).

### 7.2.1.3.2 Progrès matériaux à articuler avec les CSF Chimie et Mines

#### 7.2.1.3.2.1 Développement de nouveaux matériaux

- **Conception de nouveaux alliages pour la FA.** De nombreuses actions sont en cours en France pour adapter les compositions des alliages traditionnels (aciers, titane, aluminium, nickel...), voire pour en développer de nouvelles (design d'alliages) en particulier pour les technologies de fusion poudres. Le défi pour le futur est de coordonner ces différentes initiatives menées notamment dans les territoires. Cela peut permettre la mise en place de filières autour des industriels fournisseurs de matériaux ou donneurs d'ordre. Sur les technologies moins matures, des actions doivent être menées sur la capacité à accroître la palette des matériaux utilisables (par ex. titane pour la fusion fils ou aluminium pour les technologies sans fusion)
- **Extension de l'offre matériaux FA,** notamment aux métaux réfractaires. Les métaux réfractaires (tungstène, tantale, niobium, zirconium, molybdène...) sont aujourd'hui peu élaborés par fabrication additive malgré leur utilisation dans des secteurs industriels stratégiques et la difficulté à les produire par les procédés traditionnels, ce qui suppose d'intensifier la recherche dans ce domaine.

#### 7.2.1.3.2.2 Optimiser/développer le process industriel complet du besoin à la pièce



- Besoin ici est :
  - Intégration entre les éléments de la chaîne
  - Appropriation de cette chaîne par les acteurs industriels
  - Déploiement dans les usines
  - Intégration avec les autres procédés industriels tels que l'usinage ou l'injection
  - Capitalisation autour de la donnée

#### 7.2.1.3.3 Assurer une continuité numérique

- L'intégration entre les éléments de la chaîne sera facilitée par la continuité numérique du procédé industriel. A l'heure actuelle, de nombreuses ruptures existent dans la chaîne numérique (pas de lien entre les outils de conception, de pilotage de la machine ou de post-traitement)

##### 7.2.1.3.3.1 Capitalisation de données matériaux pour une meilleure compréhension des phénomènes

- Définition des données matériaux fiabilisés sur un nombre important de configurations : type de machine, paramètres de fabrication et de post-traitement
- Etude des liens entre les paramètres matériaux (fil, poudre), machines, données de fabrication et instruments de suivi aux propriétés des matériaux (chimie, métallurgie, propriétés mécaniques statiques-dynamiques, tenue à la corrosion) et alimentation d'outil d'intelligence artificielle nécessitant une grande quantité de données.
- Etude de l'impact des défauts sur les propriétés et définir des critères de réforme selon le type d'usage ou de sollicitation.
- Alimentation des développements des offreurs de solutions : machines, matériaux, logiciels, pièces.

#### 7.2.1.3.3.2 Développement du potentiel des procédés de fabrication additive

- Optimisation des géométries et méthodes de conceptions avancées : la FA permet de réaliser des géométries complexes mais les outils et méthodes permettant de réaliser de telles géométries sont encore très limités. Le développement de méthodes numériques permettant l'optimisation géométrique multi-contraintes est cruciale dans le développement de solutions.
- Méta matériaux par fabrication additive : les méta matériaux permettent d'exprimer le potentiel de la fabrication additive. Le développement de matériaux architecturés aux propriétés spécifiques ouvre de nouvelles possibilités en termes de propriétés spécifiques et multifonctionnelles uniquement adressables par des techniques FA. La maîtrise de leur comportement mécanique, physico-chimique et des méthodes d'élaboration et de contrôle doivent permettre le développement de solutions de rupture.
- Gradients de propriétés et multi matériaux par contrôle (voire hybridation) des procédés : la réalisation de gradients de propriétés contrôlés ou de multi matériaux par les méthodes additives (par exemple par hybridation des procédés) doit permettre l'ajout de fonctions spécifiques de surface ou de volume aux pièces existantes. Leur développement suppose par exemple la mise en place de moyens permettant ces couplages de procédés, une compréhension fine des caractéristiques matériaux produits et les contraintes spécifiques de conception.

#### 7.2.1.3.3.3 Développement des techniques de contrôle

- Etude des limites de moyens CND existants et développement des techniques innovantes adaptées aux spécificités des pièces issues de fabrication additive. (ex. méthodes vibratoires, imagerie ultrasonore multi éléments, ultrasons laser,...).
- Développement d'instrumentation multi techniques et de méthodes de traitement de données (fusion de données, aide à sanction par l'IA) pour le diagnostic temps réel pendant la fabrication
- Mise au point de boucle de rétroaction sur des machines industrielles pour corriger des anomalies détectées en fabrication (dérive de paramètres machine, élimination de défauts précoces, ...)
- Etude de l'impact des défauts résiduels sur la tenue en service. En parallèle, établissement d'une base de données « défauthèque » permettant d'aboutir à une meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement permettant un dimensionnement fiable.

#### 7.2.1.4 Objectifs industriels à 5 ans

Développer une nouvelle offre de solutions Françaises, visibles et compétitives sur la scène internationale :

- D'équipements de fabrication additive plus productives et plus robustes permettant d'obtenir des pièces bonnes du premier coup et adaptées à de grands volumes de production. Cela passe en particulier par :
  - De la collecte et de l'analyse de données nécessitant instrumentations, boucles de rétroaction, etc.
  - Le développement d'une nouvelle offre de matériaux innovants et compétitifs. Les matériaux et les machines étant intimement liés, de la diffusion de l'un dépend la performance de l'autre.
- De logiciels performants reposant sur des données matériaux-procédés, notamment expérimentales.

Cet objectif implique de mettre en place des indicateurs et dresser une perspective de progrès de la FA pour 2030 avec une analyse portée à deux niveaux :

- 1/ la réalité économique des produits issus de FA,
- 2/ l'impact environnemental des technologies de FA.

### 7.2.1.5 Stratégie (enjeux/usage) (concerne les industriels ou filières industrielles utilisatrices).

#### 7.2.1.5.1 Filières utilisatrices concernées :

Les filières industrielles françaises des transports (ferroviaire, naval, aéronautique, construction), des engins mobiles (TP, etc.), de l'automobile et équipementiers ainsi que les industriels de la mécanique (énergie, machinisme agricole, pompes, etc.) représentent près de 70% des consommateurs de pièces métalliques.

Cinq filières du CNI ont d'ores et déjà inscrit son déploiement dans leur contrat de filière : MER, NUCLEAIRE, AERONAUTIQUE, FERROVIAIRE, MODE ET LUXE.

Parmi les principaux utilisateurs :

- Aéronautique : Dassault, Safran, Airbus, ...
- Spatial: Thales, Ariane Group, Airbus,...
- Médical : Wright Medical, Medicea, Marle,..
- Automobile : Michelin, Stellantis, Renault, Valeo, Faurecia...
- Energie : TotalEnergies, EDF, Air Liquide,...
- Ferroviaire : SNCF, Alstom ...

Il faut aussi compter tout le réseau de fabricants de pièces qui représente plus d'une vingtaine d'entreprises : WeAre, Volum-e, Lisi, Initial, Erpro, Fusia, GMP, Sculpteo, 3DMedlab, AFU, Technogenia, Vallourec, Mecachrome,...

#### 7.2.1.5.2 Enjeux de compétitivité et besoins adossés pour ces filières :

Apportant agilité et résilience, la fabrication additive représente une véritable rupture avec les procédés conventionnels. En effet, elle permet, entre autres choses, d'envisager de nouvelles conceptions, inaccessibles par d'autres procédés, de produire des pièces à forte valeur ajoutée, en série ou personnalisées, de reconsidérer les chaînes d'approvisionnement, d'optimiser les phases de maintenance. Elle constitue donc une des réponses à la production de pièces d'aujourd'hui et de demain.

#### 7.2.1.5.3 Enjeux de frugalité/circularité et besoins adossés pour ces filières

Compte tenu des enjeux sociétaux et environnementaux d'aujourd'hui et de demain, le développement de solutions industrielles plus légères, plus propres et durables constitue un défi que notre industrie doit relever. La fabrication additive est une technologie frugale en matériaux : la juste quantité de matière est utilisée pour fabriquer la pièce par couches successives, le solde résiduel est recyclé et réutilisable. Elle concourt à la relocalisation des activités industrielles pour une fabrication au plus près des besoins, réduisant ainsi l'empreinte carbone associée aux flux logistiques des pièces. Ces bénéfices seront d'autant plus importants que les procédés de fabrication seront parfaitement maîtrisés limitant ainsi les non-conformités et les rebuts.

Pour autant, les filières utilisatrices demandent aujourd'hui une analyse fine pour apprécier les indicateurs de performance environnementale sur l'ensemble des procédés couverts en prenant en compte les items couvrant l'ensemble du cycle de vie produit : Utilisation efficace des ressources (matière, Energie); Réduction des déchets - Minimisation des émissions – Recyclage des poudres ; Risques sanitaires – COV – Poudres CMR ; Fabrication au plus près.

#### 7.2.1.6 Recommandation

##### 7.2.1.6.1 En termes de R&D :

Soutenir et mettre en œuvre les travaux R&D nécessaires aux progrès et à l'innovation de l'offre nationale : machines, logiciels, matériaux, post traitements, CND et pièces et de leur écosystème.

Lever les verrous scientifiques listés dans le paragraphe « objectifs scientifiques 2030 » en associant intimement approches expérimentales, modélisations multi-physiques, simulations numériques et développements technologiques. Cette déclinaison devra se faire par typologie de matériaux, car les caractéristiques des pièces obtenues dépendent du triptyque matière-procédé-post traitement. De même, les technologies de contrôles dépendent de la matière utilisée.

Faciliter le transfert des innovations vers les fabricants de machines et d'équipements en soutenant de nouvelles plateformes technologiques complémentaires des plateformes existantes et favorisant le développement de l'écosystème associant académiques, industriels utilisateurs et offreurs de solutions. Le projet de plateforme PRISM proposé à l'AMI S-I-F s'inscrit dans cet objectif.

Pour les matériaux métalliques et assimilés (céramique...), la France doit changer d'échelle et d'approche pour rester en course dans la révolution technologique de la fabrication 3D. La bascule entre la recherche et l'industrialisation de nouvelles solutions doit être amplifiée pour rejoindre le peloton de tête mondial. Cette proposition de fédération des acteurs de la R&D et du transfert doit permettre d'intensifier l'effort de R&D pour soutenir le développement de l'offre de solution française (machines, logiciels...) et l'indispensable émergence d'ETI.

Une cohésion nationale s'est déjà structurée autour des acteurs clés de la R&D et du transfert technologiques (CNRS, I3D, Addimalliance, Cetim, Carnot pour l'Industrie du Futur, AFH, Printing Bourges...) de la fabrication additive métallique et matériaux assimilés, et ont élaboré un programme national de travail commun adressant la robustesse des machines, les matériaux, les post traitement, à réaliser conjointement avec les acteurs de l'offre.

Ce programme a fait l'objet d'une réponse à l'AMI S-I-F.

#### 7.2.1.6.2 En termes de normalisation :

Nourrir les travaux de normalisation permettant de démocratiser la technologie en lien avec l'UNM 920 (regroupant près de 150 membres industriels, centres techniques et académiques). La France est actrice depuis de nombreuses années. Les travaux réalisés jusqu'alors ont permis de générer une grande quantité de données. Celles-ci doivent permettre d'alimenter la normalisation, les travaux de R&D. Les aspects sociaux sont encore trop négligés et cela amène à une compréhension subjective de la performance durable, due un déficit de normalisation et de référentiel pour analyser ces impacts au niveau global.

#### 7.2.1.6.3 En termes d'offre industrielle :

Renforcer l'offre existante et la compléter par de nouvelles offres françaises, offres visibles et compétitives sur la scène internationale :

- De composants technologiques innovants et à forte valeur ajoutée, protégés par des brevets
- D'équipements de fabrication additive plus productives et plus robustes permettant d'obtenir des pièces bonnes du premier coup et adaptées à de grands volumes de production. Cela passe en particulier par :
  - o De la collecte et de l'analyse de données nécessitant instrumentations, boucles de rétroaction, etc.
  - o Le développement d'une nouvelle offre de matériaux innovants et compétitifs. Les matériaux et les machines étant intimement liés, de la diffusion de l'un dépend la performance de l'autre.
- De logiciels de modélisation et simulation performants reposant sur des données matériaux-procédés, notamment expérimentales.

#### 7.2.1.6.4 En termes de méthode et de pilotage :

*Etre intégré à la gouvernance du dispositif « Plan National Impression 3D », l'un des projets clés de la Filière Solutions Industrie du Futur, dans le cadre de France 2030*

Engager un pacte entre les acteurs de la chaîne de valeur – académiques, centres techniques, plateformes, offreurs, distributeurs, organismes de formation, clients - pour disposer d'une offre française souveraine d'ici 2030 dans les domaines stratégiques des filières du CNI

Assurer la synergie entre les plateformes de la Fabrication Additive pour :

- Collecter, mettre en forme et partager de la donnée
- Accélérer le passage de l'académique à l'offreur, et inversement
- S'intégrer entre offreurs

- Prouver l'industrialisation via des démonstrateurs opérationnels
- Construire des parcours de formation
- Assurer le maillage des acteurs des territoires, des métiers et des filières

⇒ Projet formalisé par France Additive qui a fait l'objet d'une réponse à l'AMI S-I-F

Renforcement du réseau national de plateformes de transfert vers les PME et Filières utilisatrices

#### 7.2.1.6.5 En résumé

L'objectif de la filière est de soutenir et mettre en œuvre les travaux R&D pour faire progresser l'offre nationale : machines, logiciels, matériaux, post traitements, contrôle. Cette déclinaison devra se faire par typologie de matériaux, car les caractéristiques des pièces obtenues dépendent du triptyque matière-procédé-post traitement. Pour cela il est nécessaire de :

- Développer des matériaux notamment à faible empreintes environnementales comme tel que la substitution de plastiques pétro-sourcés par de nouveaux bio-composites en lien avec les CSF Chimie & Mines ;
- Développer des outils numériques permettant de remplacer les tests physiques par des simulations de l'ensemble de la chaîne de fabrication (jumeau numérique) ;
- Développer des outils de pilotages des machines de FA afin de les rendre plus flexibles et reconfigurables pour permettre de fournir des solutions personnalisées ou de petites séries ;
- Accroître les dimensions des machines pour produire des pièces de grandes dimensions et
- Développer des outils pour accroître la robustesse des procédés et leur productivité (machines et post traitement) ;
- Favoriser les procédés hybrides (couplage des procédés par exemple) ;
- Développer des techniques de monitoring in-process ;
- Développer des outils d'automatisation des étapes de finition ;
- Faciliter la diffusion de l'usage de la FA en particulier dans les PME/ETI et le développement des compétences associées par la création de plateformes dédiées à l'expérimentation et au prototypage ;
- Mettre en place de bases de données sur les matériaux ainsi que d'une « défauthèque » permettant d'aboutir à une meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement permettant un dimensionnement fiable ;
- Minimiser l'impact environnemental : usage de poudres recyclées ou présentant des morphologies moins exigeantes, prise en compte de la fin de vie des pièces obtenues par FA et de l'obsolescence des procédés.

Accélérer la normalisation afin de permettre de disséminer la technologie et proposer des outils et méthodologies pour la certification des produits

## 7.3 Continuité numérique

### 7.3.1 Jumeau Numérique

#### 7.3.1.1 Définition du périmètre S&T

Un Jumeau Numérique est un ensemble organisé de modèles numériques représentant une entité du monde réel pour répondre à des problématiques et des usages spécifiques. Le Jumeau Numérique est mis à jour par rapport au réel, à une fréquence et une précision adaptées à ses problématiques et à ses usages. Il est doté d'outils d'exploitation avancés permettant notamment de comprendre, analyser, prédire ou optimiser le fonctionnement et le pilotage de l'entité réelle.

Contrairement à une maquette numérique ou au métavers industriel, le jumeau numérique (JN) reflète l'état dynamique d'une entité physique ou d'un processus.

Un jumeau numérique peut être le modèle d'un composant, d'un système de composants ou d'un système de systèmes. Par exemple : des pompes, des moteurs, des centrales électriques, des chaînes

de fabrication ou une flotte de véhicules. Les modèles de jumeaux numériques peuvent inclure des approches basées sur la physique ou sur les statistiques.

L'usage du jumeau numérique permet de répondre à différents macro-enjeux :

- Optimisation d'opérations au sein de l'usine
- Maintenance prédictive incluant la détection d'anomalie et l'isolation des défauts
- Optimisation de l'usage des machines par les filières utilisatrices
- Sécurisation de l'exploitation des machines et anticiper les dysfonctionnements
- Implémentation des stratégies d'économie circulaire (Réduire, Réutiliser, Remettre à neuf, Réparer, Recycler)
- Compréhension de l'usage des solutions par les filières utilisatrices pour une meilleure conception des machines, de leurs composants et sous-systèmes.

#### 7.3.1.1.1 Périmètre technologique couvert :

La mise en place d'un jumeau numérique par les acteurs parties prenantes de la filière S-I-F implique de faire appel à la fois à des briques numériques, physiques et technologiques :

**Modélisation numérique** : Un modèle numérique représente les caractéristiques d'intérêt d'une ou plusieurs entités du monde réel. Différents modèles, correspondant à autant de jumeaux numériques, peuvent collaborer afin de répondre au cas d'usage. Il peut s'agir par exemple de l'ensemble des équipements d'une ligne de production, constituant autant de jumeaux numériques, en plus de celui du produit en cours de fabrication ou du bâtiment si nécessaire. Le ou les types de modèles numériques dépendent du cas d'usage. On distingue par exemple:

- Modèles 3D
- Modèles de flux
- Modèles fonctionnels (processus industriels, processus d'entreprise, ...)
- Modèles physiques équationnels (hydraulique, électrique, physique des matériaux ...)

**Plateforme IIoT** : Une plateforme IIOT (Industrial Internet Of Things) fournit la connectivité aux équipements et sources de données de la ligne de production : PLC (automates programmables industriels), SCADA (systèmes de contrôle et d'acquisition de données en temps réel), MES (systèmes de suivi de la production), Data Historians (collecteurs de données historiques), capteurs et tout ce qui est nécessaire pour répondre au cas d'usage. La connexion aux équipements peut s'effectuer avec des protocoles tels que OPC-UA ou MQTT.

En complément des bases de données classiques, les bases de données de séries temporelles permettent par ailleurs de stocker des données horodatées à haute fréquence (dites en temps réel), par exemple issues de capteurs. Elles peuvent ainsi servir de sources de données aux modèles prédictifs et aux applications, soit sous forme brute, soit sous forme condensée.

**Cloud computing** : Le cloud computing fournit un accès à la demande, via Internet, à des ressources de calcul (applications, serveurs, stockage, outils de développement...) hébergées dans un centre de données géré par un fournisseur de services cloud. Ainsi, l'infrastructure matérielle (Infrastructure as a Service), de développement (Platform as a Service) ou même applicative (Software as a Service) devient une "commodité".

**Edge computing** : Une architecture supportant le calcul "on the edge" (en périphérie de réseau) permet de traiter les données au plus près de leur source (les équipements) et de prendre des décisions de manière autonome sans devoir transmettre les données collectées vers le cloud ou un système central. Par exemple, un modèle prédictif lié au JN d'un équipement peut imposer un arrêt immédiat dès qu'un certain niveau de vibration est atteint.

Une architecture mêlant cloud computing et edge computing peut être pertinente dans les applications industrielles du JN, les décisions opérationnelles ou urgentes pouvant être prises au niveau local ("edge") alors que les analyses ou les tableaux de bord sont construits et accessibles sur le cloud.

**Outils de diagnostic, prédiction et de recommandations** : Une des applications du JN est l'utilisation des données et du modèle numérique pour comprendre l'origine d'un dysfonctionnement, émettre

des prédictions et éventuellement produire des recommandations ou effectuer des actions (exemple: prédiction de pannes d'un équipement et recommandations de maintenance).

Pour cela, il est nécessaire de bâtir un modèle explicatif, prédictif et/ou prescriptif à partir des données en s'appuyant sur des méthodes statistiques ou du machine learning.

Le modèle prédictif est construit à partir des données historiques issues de la plateforme IIOT, du modèle du JN et éventuellement de connaissances expertes. Il est ensuite appliqué aux données actuelles de production afin de fournir des prédictions, voire des recommandations (on parle alors de modèle prescriptif).

Le machine learning est une branche de l'Intelligence Artificielle basée sur la construction automatisée de modèles à partir de données historiques afin de fournir des explications, des prédictions ou des recommandations liées au système étudié.

Par exemple, en s'appuyant sur le jumeau numérique d'un moteur incluant les données d'exploitation collectées par le passé (dont les pannes déjà observées), un algorithme de machine learning peut proposer une maintenance préventive du moteur afin d'éviter une prochaine panne.

**Outils de simulation** : S'appuyant sur les modèles des jumeaux numériques et les données associées, les outils de simulation permettent par exemple de :

- Simuler le comportement d'une machine intelligente afin de vérifier son bon fonctionnement avant sa mise en route (absence de collision notamment)
- Simuler le flux d'une ligne de production afin de vérifier que la cadence requise pourra être atteinte
- Explorer différentes hypothèses comme par exemple la reconfiguration d'une ligne de production
- Effectuer une mise en service virtuelle d'un équipement industriel ou d'une ligne de production (virtual commissioning)

**Outils d'exploitation et d'analyse** : Les outils d'exploitation reflètent l'état actuel de la production, affichent des alertes éventuelles, et comparent l'avancement au planning de production.

Les outils d'analyse s'appuient sur des données consolidées issues des jumeaux numériques et d'autres sources de données. Ils facilitent la prise de décision via la fourniture de graphiques, de tableaux de bord, de rapports... Ils peuvent utiliser des technologies de Business Intelligence déployées sur le cloud.

**Réalité augmentée/Réalité virtuelle et multi-modalités (haptique, audio, voix, ...)** : La réalité augmentée (RA) intègre des éléments virtuels au sein d'un environnement réel. Une des applications industrielles de la RA est l'aide aux opérations de production ou de maintenance. L'application de RA s'appuie alors sur le JN du produit à fabriquer ou de l'équipement à maintenir et sur le JN du processus industriel pour projeter sur l'objet physiques des consignes issues des instructions de travail stockées. La réalité virtuelle (RV) immerge l'utilisateur dans un environnement entièrement numérique généré par ordinateur. Une des applications industrielles de la RV est une visite virtuelle d'une ligne de production en cours d'élaboration afin de familiariser les opérateurs avec leur futur environnement de travail et recueillir leurs remarques.

#### *7.3.1.2 Etat de l'art scientifique et technique*

Même si certaines briques technologiques cités ci-dessus sont relativement mature, l'état de l'art scientifique et technique actuel ne permet pas la généralisation de déploiement des jumeaux numériques avec la fourniture d'une solution clé en main qui permettrait à un maximum d'acteurs industriels parties prenantes de la filière S-I-F d'établir les jumeaux numériques spécifiques à leurs produits :

- Chaque méthodologie de construction des jumeaux numériques doit être adaptée(s) en fonction de la typologie des systèmes réels (mécaniques, électromécaniques, mécatroniques, unitaires, petite, moyenne ou grande série, statiques ou mobiles, petites ou grandes échelles, ...), l'outil de simulation à utiliser étant déterminé par le type de machines/composants/systèmes et son usage.
- Les coûts et le temps de développement d'un jumeau numérique, intégrant les problèmes spécifiques de l'instrumentation connectée et les compétences en matière d'intégration et de gestion de l'information ainsi que les difficultés d'usage cognitif (adaptation de l'IHM) restent

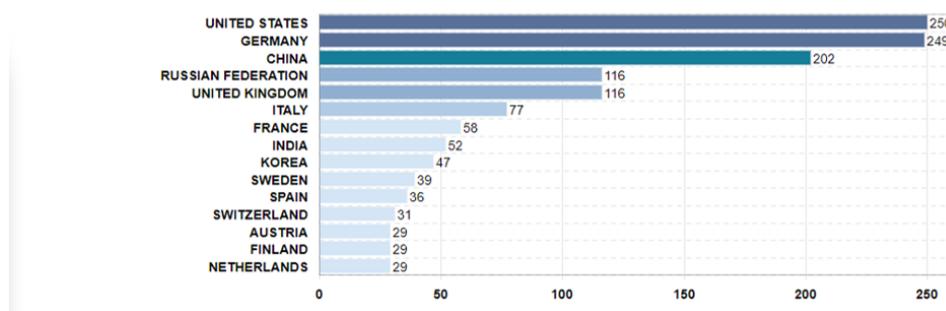
des freins (notamment pour les PME). Difficulté à poser un modèle économique pour justifier des investissements nécessaires ;

- Les problèmes d'interopérabilité, de réduction des modèles de comportements multiphysiques (pour les rendre compatibles avec les besoins de simulation « temps réel ») et de latence de bout en bout persistent ne permettent pas aujourd'hui un déploiement massif (temps et coût de calcul) ;
- La conservation de la proximité entre les modèles physique et numérique reste difficile à conserver, on observe rapidement des écarts entre les modèles physique et son jumeau numérique après un temps d'usage.

Les travaux sont aujourd'hui essentiellement tirés par les Donneurs d'Ordres des grandes filières industrielles (Safran, Air Liquide ...) et les éditeurs logiciels (3DS, ESI), les acteurs académiques (CEA, Ensam, IMT...) focalisant leurs travaux de recherche sur l'une ou l'autre des briques technologiques préalablement citées.

Le sujet est encore relativement modeste en termes de publications scientifiques : 1 500 publications dans la base Scopus évoquant le jumeau numérique. Bien qu'évoqué pour la première fois en 1958, on constate une réelle émergence et croissance quasi exponentielle de la thématique seulement depuis 2016 avec un pic en 2020, la France figurant en 7<sup>ième</sup> position.

### Origine géographique des publications sur le jumeau numérique



#### 7.3.1.3 Etat de l'art industriel (il s'agit là des industriels « offreurs de solutions »)

##### Description de la chaîne de valeur constituant l'offre de solutions, état des lieux français :

Seuls quelques grands acteurs de l'offre OEM, au regard des 3000 PME qui interviennent dans la filière S-I-F, sont aujourd'hui capables de fournir le jumeau numérique de leurs machines et équipements :

- Fives machining
- Zalking (constructeur de machines de capsulage)
- La commande numérique SinumerikOne de Siemens s'appuie sur les jumeaux numériques CreateMyVirtualMachine (CMVM) et Run MyVirtualMachine (RMVM)
- ....

On recense une offre d'outils pour l'établissement des jumeaux numériques mais qui sont souvent liés à une application spécifique :

- AVEVA (Schneider Electric)
- 3DS & Diota
- Light & Shadow
- Cosmotech
- ESI
- ASPEN TECH, notamment pour l'énergie et la chimie
- ANSYS TwinBuilder : permet de construire, valider et déployer des simulations de systèmes et des jumeaux numériques complets pour la maintenance prédictive
- SIMCENTER AMESIM (Siemens)

- ...  
-

Notons que dans le cadre de la filière, Siemens propose des jumeaux numériques dans les principaux domaines que sont procédés, la qualité, de la maintenance, la production et de l'énergie et en amont la conception et de bureau d'étude.

### **Intensité/volumétrie de la concurrence internationale**

Le marché des jumeaux numériques devrait passer de 3,8 milliards d'USD en 2019 à 35,8 milliards d'USD en 2025, avec un taux de croissance annuel moyen de 37,8 %

Il est intéressant de préciser la vision européenne sur le sujet : celle-ci a choisi de faire de la Twin Transition l'axe phare d'une transformation numérique concrète : la DG CONNECT a ainsi lancé plusieurs appels à projets (2022-2023) sur le sujet du jumeau numérique En sus :

- Le SRIA (Strategic & Research & Innovation Agenda) du partenariat européen sur Intelligence artificielle, les données et la robotique a formalisé à plusieurs reprises « les jumeaux numériques des équipements et composants » comme des technologies clés à partager avec le partenariat européen « Made in Europe » qui est dédié à l'industrie :  
<https://ai-data-robotics-partnership.eu/wp-content/uploads/2020/09/AI-Data-Robotics-Partnership-SRIDA-V3.0.pdf>
- Le SRIA 2022 de ECS (Electronics components and systems) recense les différentes briques technologiques nécessaire pour la constitution d'un jumeau numérique et leur évolution pendant la période 2022 -2026 ainsi que son usage dans le cadre de l'industrie du futur.
- Le SRIA 2030 de MANUFUTURE (Think Tank dédié à l'industrie manufacturière) souligne plus particulièrement l'usage des jumeaux numériques pour les composant, les équipement et les systèmes productifs pour augmenter la résilience industrielle, la reconfigurabilité, la maîtrise des données et des flux : [https://www.manufuture.org/wp-content/uploads/ManuFUTURE\\_SRIA\\_2030\\_Vfinal.pdf](https://www.manufuture.org/wp-content/uploads/ManuFUTURE_SRIA_2030_Vfinal.pdf)
- L'Allemagne a mis en place une association pour l'industrialisation du digital twin fondé par le VDMA et le ZVEI qui cherche à démocratiser l'usage du jumeau numérique sur les composants et équipements (IDTA). (Membres fondateurs : ABB, Asentics, Bitkom, Bosch, Bosch Rexroth, Danfoss, Endress Hauser, Festo, Homag, KUKA, Lenze, Pepperl Fuchs, Phoenix Contact, SAP, Schneider Electric, Schunk, Siemens, Trumpf, Turck, Volkswagen and Wittenstein.). On notera la présence de plusieurs fournisseurs d'équipement ou composants).

#### *7.3.1.4 Objectifs scientifiques 2030*

Les verrous scientifiques à lever restent nombreux et portent notamment sur les thématiques listées ci-dessous :

- Pour la création et la mise à jour de la réplique numérique :
  - Accessibilité de la démarche de création et de mise à jour d'un jumeau numérique pour des personnes non nécessairement expertes des techniques de modélisation requises (lien avec l'ingénieur augmenté)
  - Construction des modèles de comportement temps réel, multi-physiques, techniques de réduction de modèles, simulations prédictives, incrémentation et enrichissement des modèles comportementaux par les données (machine learning / apprentissage continu en ligne et/ou hors ligne), construction de jumeaux numériques uniquement à partir de données réelles (amélioration continue / apprentissage), modèles hybrides ...
  - Représentativité des jumeaux numériques fonctionnels en particulier vis à vis des processus complexes où l'humain joue un rôle prépondérant, avec tout ce que cela peut impliquer en termes de prise de décision autonome et capacité d'adaptation, génératrices d'incertitudes et d'aléas dans l'exécution des processus

- Extraction de la réplique numérique configurée, adaptation et traduction des modèles, mise à jour tout au long du cycle de vie des systèmes « As Built, As Maintained », capacité à mettre en place la réplique numérique de manière incrémentale (gestion d'abstractions et de raffinements)
- Dimension holistique de la réplique numérique : interopérabilité entre les différents modèles et outils d'exploitation du jumeau numérique multi-vues multi-échelles
- Pour la création de l'interactivité du jumeau réel :
  - Identification des paramètres pertinents, technologies des capteurs et intégration physique des capteurs, redondance, robustesse, perturbations, fiabilité, traitement temps réel
- Pour la réalisation/interconnexion des couples jumeaux numérique/physique
  - Organisation de la collecte des données, sécurisation des données, traçabilité, filtrage, fusion de données, construction d'indicateurs
  - Interopérabilité des systèmes dans le contexte de normes de communication multiples et de protocoles différents dont certains propriétaires, format standard d'échanges de données
  - Conception de systèmes communicants dans des environnements contraints (zones blanches, obstacles métalliques, confidentialité, autonomie énergétique, zones radioélectriques perturbées...)
  - Problématique de latence de bout en bout
- Pour la réalisation et l'exploitation des couples jumeaux numérique/physique
  - Définition de méthodes, techniques et stratégies permettant aux jumeaux numériques d'intervenir sur le jumeau physique pour du contrôle/correction automatique, outils d'aide à la décision, apprentissage par l'exemple, protocoles de communication, compréhension et explicabilité de ces méthodes
  - Intégration des techniques/outils de Réalité Virtuelle / Réalité Augmentée dans l'exploitation des jumeaux numériques pour améliorer l'aide à la décision, la perception/compréhension des résultats de simulation, des données issues des capteurs, ...
  - Définition et mise en œuvre de mécanismes de retour d'expérience issus de l'exploitation des jumeaux numériques pour faciliter/améliorer le développement de nouveaux produits/systèmes plus performants
- Pour l'implémentation des stratégies d'économie circulaire :
  - Dimension holistique de la réplique numérique : interopérabilité entre les différents modèles et outils d'exploitation du jumeau numérique multi-vues multi-échelles, pour une vision systémique permettant l'éco-conception des produits et des processus, et pour une coopération transverse entre différentes entreprises ou entités de l'entreprise
  - Partage sécurisé et décentralisé des jumeaux numériques entre les différents acteurs de la chaîne de valeur (produits, réseaux de production, Supply chain, etc.), pour une transparence accrue sur les compositions puis usages des produits en prenant en compte les problématiques de confidentialité associées

#### 7.3.1.5 Objectifs industriels à 5 ans

Massifier l'usage des jumeaux numériques en embarquant l'ensemble des acteurs parties prenantes de la chaîne de valeur de l'offre de solutions IDF, et en contribuant à la structuration / mise à disposition des infrastructures, moyens et outils « types et dynamiques », indispensables à la généralisation des jumeaux numériques de l'offre de solutions françaises.

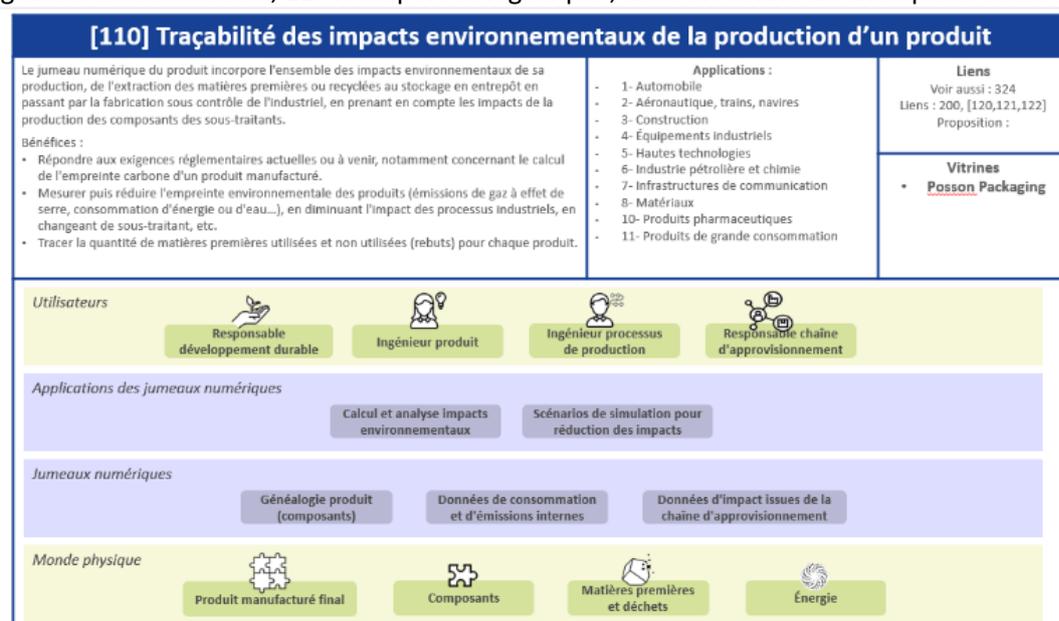
Pour ce faire, fédérer dès à présent environ 200 industriels français (majoritairement PME) acteurs de l'offre S-I-F regroupés par typologies de produits conçus/fabriqués : composants, systèmes, équipements/marché-usage dans une logique de progression commune adressant les 3000 PME intervenants déjà dans la filière de solutions IDF

### 7.3.1.6 Stratégie (enjeux/usage) (concerne les industriels ou filières industrielles utilisatrices).

#### Filières utilisatrices concernées :

Toutes les filières utilisatrices sont concernés et demandeuses de pouvoir disposer des jumeaux numériques des machines et équipements de leurs sites de production.

Le GT DOTF de l'AIF a recensé et décrits une cinquantaine de cas d'usages type appliqués à 12 secteurs industriels : 1- Automobile, 2- Aéronautique, trains, navires, 3- Construction, 4- Équipements industriels, 5- Hautes technologies, 6- Industrie pétrolière et chimie, 7- Infrastructures de communication, 8- Matériaux, 9- Production d'énergie, 10- Produits pharmaceutiques, 11- Produits de grande consommation, 12- Transport et logistique ; dont on donne un exemple ci-dessous :



On peut citer quelques applications phares :

**Aéronautique** : Jumeaux numériques des moteurs LEAP de Safran : surveillance continue de l'état de 29 moteurs en vol, grâce à des capteurs embarqués (température, vitesse de rotation, consommation d'huile) et à un modèle numérique du moteur qui intègre des paramètres de fonctionnement extérieur (météo, pollution atmosphérique, déroulé du vol)

**Énergie** : EDF, « jumeau numérique » du parc nucléaire français, afin de simuler en temps réel l'état des centrales existantes et prolonger leur durée de vie. Ces maquettes virtuelles permettront de mieux prévoir les arrêts de réacteurs et de coordonner les opérations à réaliser (déconstructions futures incluses) entre les équipes d'EDF, les sous-traitants et les fournisseurs. Le coût de chaque jumeau est estimé à 1 M€ par centrale

**Naval, Défense** : Jumeau numérique d'un navire de guerre par Naval Group, pour anticiper les défaillances de composants et mieux prévoir les périodes de maintenance

**Bâtiment** : Dans le cadre d'un projet BIM, utilisation d'un jumeau numérique de la gare de Rennes, pour la gestion en temps réel des équipements et la visualisation de l'impact de travaux sur les usagers

**Biens d'équipement** : La société Kaeser Kompressoren SE propose des jumeaux numériques de ses compresseurs en réseau.

Les principaux cas d'usage répertoriés par le GT Jumeau Numérique de DOTF (maintenant CORI2DF) sont :

- Optimisation de l'usage d'un produit à l'aide de données d'utilisation permettant de constituer un JN (ex: automobile connectée, moteur d'avion)

- Optimisation des parcours d'approvisionnement et de livraison (utilisant les JN des parcours possibles, de l'état du trafic, des véhicules...)
- Mise en ligne virtuelle d'une ligne de production ou d'une évolution de celle-ci à des fins de validation
- Formation et assistance des opérateurs à leur poste de travail en réalité augmentée
- Télémaintenance d'un équipement industriel
- Maintenance prédictive d'un actif industriel (prédiction de pannes, recherches des causes, recommandations d'opérations de maintenance)
- Gestion d'une infrastructure industrielle (ex: centrale nucléaire) tout au long de son cycle de vie

**Enjeux industriels** sont les suivants :

- Compétitivité/gain de temps
- Qualité
- Sécurité au travail
- transparence et pilotage des impacts environnementaux

**Enjeux de frugalité/circularité et besoins adossés pour ces filières**

L'usage des jumeaux numériques par les filières utilisatrices va permettre de :

- Suivre, optimiser et piloter sa consommation énergétique
- Optimiser la consommation de matière et consommable ; Optimiser la maintenance
- Prolonger/prédire la durée de vie,
- Recycler/ démanteler (end of life)

#### 7.3.1.7 *Recommandation*

**En termes de R&D :**

- Lever, via des travaux de recherche applicatifs les verrous scientifiques qui entravent la généralisation de déploiement des jumeaux numériques. (cf. paragraphe objectifs scientifiques) et développer des Use cases de jumeaux numériques pour constituer une "bibliothèque dynamique" française autour d'une dizaine de regroupements industriels constitutifs de la chaîne de valeur de la filière offre de solutions IDF

**En termes d'appropriation/transfert :**

- Diffuser massivement l'usage des jumeaux numériques créés
  - Démonstrateurs de taille industrielle dans le cadre des plateformes d'accélération
  - Favoriser l'incrémentation de nouveaux cas d'usage dans nos plateforme/base de données nationale
  - Services de diffusion et d'acculturation
  - Formations pour pouvoir « faire » et « exploiter » un jumeau numérique
- Permettre l'exploitation personnalisée / l'hybridation des use cases directement par les PME françaises de l'offre parties prenantes via une plateforme sécurisée dédiée intégrant outils et exigences de réalisation

**En termes de normalisation :**

- Inscrire nos travaux (notamment les travaux de recherche qui établissent les fondations formelles) dans la démarche de normalisation CEN et ISO des produits de l'offre en lien avec l'UNM, et en cohérence avec le projet ATLAS de l'AIF (Domaine Jumeau numérique)

#### 7.3.1.7.1 *Conclusion*

Le jumeau numérique est un domaine de recherche interdisciplinaire qui comprend l'ingénierie, l'informatique, l'automatisation et le contrôle, etc. En raison cette nature multidisciplinaire, il touche aussi bien à la virtualisation du composant et des machines, à la science des matériaux, à la

communication, à la gestion des opérations et à d'autres disciplines. Les défis les plus notables comprennent :

- La réalisation de la perception (capteurs) et de l'interconnexion intelligentes d'entités physiques hétérogènes multi-sources ;
- La collecte de données hétérogènes multi-sources d'entités physiques en temps réel, la transmission efficace (5G) et le traitement complet des données cyber-physiques ;
- La construction d'un modèle haute-fidélité dynamique multidimensionnel et multi-espace-temps ;
- La vérification de la cohérence, de la validité et de la fiabilité des modèles ;
- L'intégration d'un modèle multi-sources, multi-disciplines et multidimensionnel.

**Recommandation** : Le développement d'un jumeau numérique holistique et sécurisé et démocratisation de son usage. Ceci nécessite de :

- Lancer une grande action d'innovation autour de l'intégration des représentations et outils d'exploitation constitutifs des jumeaux numériques, notamment pour implémenter les stratégies d'économie circulaire garantissant la confidentialité, la sécurisation et la fiabilité des échanges ;
- Amplifier les recherches sur la précision, la fiabilité, la rapidité et le caractère incrémental des modèles et outils de simulation et d'exploitation pour garantir la représentativité du jumeau numérique par rapport au système réel, tout au long de son cycle de vie tout en assurant l'accessibilité de la démarche à des non-experts afin de la démocratiser ;
- S'investir dans les comités de normalisation (CEN, ISO) autour du jumeau numérique ;
- Constituer une « bibliothèque dynamique » française autour de regroupements d'industriels constitutifs de la chaîne de la valeur S-I-F.
- Mettre en place des plateformes d'acculturation et de service autour du jumeau numérique adaptées aux différents domaines, aux différents niveaux d'utilisateurs et à différentes applications métier pour démontrer l'efficacité liées, la valeur ajoutée créée et le ROI et ainsi diffuser massivement ses usages auprès des PME françaises.

### 7.3.2 Ingénierie dirigée par les modèles des systèmes (réingénierie des méthodes et outils de travail)

La digitalisation de l'industrie est une promesse de solutions pour faire face aux multiples enjeux sociétaux, économiques et environnementaux que doivent relever les entreprises en 2022. Mais elle vient avec ses propres défis, en particulier la maîtrise des niveaux de complexité toujours plus importants et qui prend plusieurs formes – diversité croissante des points de vue à considérer embarquant chacun leurs lots d'exigences et de contraintes, parfois contradictoires, une compétition toujours plus pressante et globalisée, des ressources en tension, etc. –. Faute de nouvelles méthodes d'ingénierie et d'outils performants et accessibles, innover dans un contexte numérique ultra concurrentiel devient de plus en plus difficile.

La continuité numérique est l'élément clé pour développer des systèmes complexes. Il s'agit de pouvoir **garantir et gérer la cohérence de toutes les données, informations, et connaissances** d'ingénierie, produites tout au long du cycle de vie d'un système et d'un logiciel et échangés par les différentes parties prenantes impliquées dans ce même cycle de vie.

Les approches à base de modèles se substituent aux approches classiques d'ingénierie à base de documents et l'ingénierie dirigée par les modèles des systèmes regroupe l'ensemble des pratiques et outils mis en œuvre pour développer des systèmes et s'appuyant sur des modèles et non plus uniquement sur des documents.

Parmi les enjeux qu'à l'ambition de relever l'industrie française, la sobriété énergétique et de matière ainsi que la circularité exige des pratiques de développement durable et donc demande la prise en compte des considérations écologiques dans le développement des systèmes, et cela globalement au

niveau de tout le cycle de vie d'un système en particulier en introduisant les éléments **d'analyse du cycle de vie (ACV)** dans l'ingénierie système.

Elément essentiel pour atteindre les **objectifs de compétitivité**, l'intelligence collective est un facteur important pour le succès du collectif que représente l'entreprise. L'épisode récent du COVID-19, mais aussi les difficultés à recruter, a démontré la nécessité vitale de pouvoir collaborer de façon hybride, en présentiel, comme à distance. On appelle ce phénomène la collaboration distribuée. Elle peut être évidemment distribuée dans l'espace (par exemple, télétravail), mais aussi dans le temps (des personnes travaillant sur un même objet mais dans des fuseaux horaires différents).

Enfin, les systèmes sont largement bâtis sur les capacités informatiques (logicielles et matérielles). Or les compétences dans ces domaines sont déjà largement en tension. Les **approches baptisées de « low-code », voire de « no-code »**, vise à réduire tant se faire que peut la marche pour accéder aux "supers pouvoir" de l'informatique en rendant cette dernière plus accessible. L'ingénierie des systèmes fournit les outils de conception logiciel « low code ».

#### *7.3.2.1 Etat de l'art scientifique et technique*

Du point de vue scientifique, l'Europe, et en particulier la France et l'Allemagne, est pionnier dans le domaine de l'ingénierie dirigée par les modèles. On peut entre-autre citer le CEA et INRIA comme des acteurs majeurs de la communauté scientifique, au niveau national, Européen, mais aussi international. Du point de vue technique également, la France compte des contributions importantes et reconnues au niveau international, notamment dans le domaine de l'open source. On peut citer par exemple, les deux projets, Papyrus porté par le CEA et Sirius porté par la PME OBEO, qui sont comptent parmi les projets phares de la fondation Eclipse dans le domaine de l'ingénierie dirigée par les modèles. La conception pour la durabilité (« Design for Sustainability ») a évolué de la fin du siècle dernier à nos jours en étendant le périmètre d'analyse nécessaire à la mise en place d'une ingénierie durable. Elle correspond à un processus collaboratif qui englobe les études de faisabilité et la définition des spécifications en lien avec les exigences en IS (Ingénierie des Systèmes) jusqu'à l'industrialisation (préparation du passage en production).

Le sujet de la continuité numérique touche possiblement à de nombreux domaines de recherche comme la traçabilité, la coévolution, l'automatisation ou encore l'intégration et le déploiement continu.

#### *7.3.2.2 Etat de l'art industriel (il s'agit là des industriels « offreurs de solutions »)*

Du point de vue industriel, tous les grands fournisseurs de technologie d'ingénierie proposent un support à l'ingénierie dirigée par les modèles. Au niveau de la France, on peut citer Dassault Système avec sa suite d'outils de modélisation PLM et son outil de modélisation UML/SysML, MagicDraw. Des sociétés allant de la PME à l'ETI, comme par exemple ARTAL, OBEO ou encore DPS, proposent également des solutions technologies avancées à la pointe. Au niveau Européen, Siemens propose également une suite d'outils complète et intégrés et promeut activement les approches à base de modèles. Et au niveau international, des sociétés comme Mathwork ou encore ANSYS ne sont pas en restent et proposent également des solutions plus ou moins intégrés.

En termes de gestion de la traçabilité, de la coévolution de l'automation des processus, il existe également des solutions industrielles mais souvent limitées ou/et pas intégrées.

Il existe une offre d'outils permettant des **ACV**. Ces derniers s'appuient sur des bases de données souvent propriétaire et très peu interopérables et les outils sont à ce jour que très peu intégrés à une approche globale d'IS. La réalisation d'une seule étude ACV est très coûteuse car réalisée par des spécialistes ACV pour un coût typiquement >30k euros et d'une durée de plusieurs mois. Ceci la rend difficilement généralisable dans un contexte d'explosion de la demande d'étude d'impact environnementaux des produits de consommation et difficilement adaptable dans un contexte d'amélioration environnementale continue poursuivie par les différents acteurs d'une chaîne d'approvisionnement. Aujourd'hui, la collecte de données en ACV est souvent réalisée manuellement

par une seule personne qui détient l'expertise ACV et qui n'a pas forcément connaissance de toutes les données techniques de l'ensemble d'une chaîne de valeur.

Concernant les outils de « low code » « no code », IBM (<https://www.ibm.com/uk-en/automation/low-code>), Microsoft et Oracle, ont commencé à intégrer des solutions à faible code dans leurs portefeuilles de produits. Les sociétés d'études de marché ont prévu un potentiel de marché considérable pour les LCP (Low Code Platform). Gartner a prédit que d'ici 2023, plus de 50 % des moyennes et grandes entreprises auront adopté une plateforme LCAP comme l'une de leurs plateformes d'applications stratégiques. Par exemple, on peut citer le rachat pour 730 M\$ par Siemens de Mendix, l'un des principaux fournisseurs de LCP. Mendix a ainsi été intégrée à la division Siemens' Digital Factory (DF). Selon Siemens, à mesure que les entreprises investissent dans la numérisation de leurs activités, la demande d'applications professionnelles augmente beaucoup plus vite que la capacité des services informatiques à les fournir. Du côté Français, on a d'ores et déjà quelques sociétés, plutôt des PME, qui se sont positionnées sur le créneau du LCP, comme la société BonitaSoft. Mais, on va donc aussi retrouver toutes les sociétés qui ont une offre MBSE, comme ARTAL et OBEO par exemple.

### 7.3.2.3 Objectifs scientifiques 2030

Bien qu'unanimement reconnue comme étant un « Must », la transition « approches documentaires d'IS » vers des « approches dirigées par les modèles d'IS » n'est toujours pas systématique et massivement réalisée. Notamment pour les PME et les ETI, cette transition reste difficile. Les raisons pour cela sont diverses : questions de coûts et de gestion des risques associés, gestion de l'existant, attente de ROI à trop court terme, difficultés d'accessibilité à la connaissance et aux outils, problèmes de formation et de disponibilité des compétences nécessaires, gestion du changement, difficulté de choisir une solution plutôt qu'une autre et être « captif » à terme, etc. Ainsi, de nombreuses entreprises continuent d'utiliser des documents comme artefacts principales d'ingénierie produits et échangés et les outils afférents ad hoc (c.-à-d., généralement la suite bureautique MS Office, qui comme son nom l'indique n'est pas un outil d'ingénierie) toutes les conséquences qu'il en coûte : perte de cohérence/consistance de l'information, surcoût et erreurs de mise à jour de l'information (démultiplié dans le cadre d'approches dites agiles où les itérations sont la clé), impossibilité d'automatiser tout ou partie des étapes d'un processus, etc.

L'atteinte des objectifs de la filière requiert d'intégrer toutes les dimensions nécessaires au développement durable d'un système sociotechnique dans son ensemble dans les méthodologies d'ingénierie système, dès la phase de définition de l'architecture du système.

En particulier les ACV sont généralement faites de façon orthogonale à la conception. Il est important de pouvoir définir des méthodes et des outils support d'ACV et les intégrer dans une approche d'IS de façon holistique. Elle reste un acte artisanal, souvent fait de façon ad hoc. Les coûts et les temps de réalisation sont élevés. Il est important d'innover pour accélérer les temps de traitement et réduire les coûts afférents. De plus, faire des ACV est un pas en avant pour commencer à éco-concevoir, mais loin d'être suffisant. Il est démontré comme fondamentale de pouvoir considérer la dimension sociotechnique de l'activité de développement durable, considérant comme déterminante l'interaction entre le système technique conçu et les parties prenantes intervenant lors du cycle de vie du système. Enfin, il est important de pouvoir comprendre, modéliser, analyser l'impact du système sur le comportement responsable des usagers, notamment pour espérer réduire les effets rebonds bien connus en écoconception. Il convient pour cela de définir un cadre théorique et son cadre technologique de partager automatiquement et de façon sécurisée les données afférentes tout en conservant une confiance élevée en leur qualité, en offrant la transparence sur l'origine des données et en protégeant les informations qui doivent rester confidentielles, en particulier l'identité des fournisseurs et la composition détaillée des produits.

#### 7.3.2.4 Objectifs industriels à 5 ans

Du point de vue industriels, les questions d'intégrabilité, d'interopérabilité, de partage, et d'échange sécurisés des données sont au cœur des préoccupations à venir pour catalyser la transition vers les approches dirigées par les modèles.

Les standards sont une partie de la solution aux problèmes liés à cette transition. Dans ce domaine, un support au langage SysML, le langage de modélisation en IS le plus répandu au monde à ce jour, est un choix évident. Une nouvelle version majeure de ce langage, SysML v2, est en cours de finalisation par un consortium international de plus de 200 membres (On y retrouve pour la France, Airbus, CEA, Dassault System, INRIA, etc.). Cette nouvelle version aura sans doute un impact important sur les outils et les pratiques en IS. Elle devra en outre intégrer les technologies d'ACV à une suite d'outils globale d'ingénierie systèmes.

#### 7.3.2.5 Stratégie (enjeux/usage) (concerne les industriels ou filières industrielles utilisatrices).

##### Usages :

- Tous les domaines/secteurs peuvent être susceptibles d'en bénéficier.
- Ingénieries des systèmes des systèmes complexes (incluent toutes les ingénieries par exemple, ingénierie de développement, ingénierie de maintenance, ingénierie de production, etc.), ACV, plateforme « low code »...

##### Enjeux :

L'ingénierie système permet d'adresser les principaux enjeux que s'est donné la filière : circularité avec les ACV, l'écoconception et la souveraineté à travers des gains de compétitivité grâce à une optimisation globale que permet l'outil. Ajoutons que les gains importants en qualité et sécurité peuvent être obtenus, ce qui va dans le sens également de la souveraineté.

#### 7.3.2.6 Recommandations

Afin de relever les grands enjeux de l'industrie du futur, il est d'abord nécessaire d'établir une réglementation/normalisation croissante des référentiels. Concernant les ACV par exemple cela implique une simplification de la vérification de cohérence entre les données.

Les approches d'ingénierie système sont un facteur clé de performance de l'industrie. Mais les outils doivent être démocratisés pour permettre aux PME/ETI d'accéder à ces approches déjà largement utilisées par les grands groupes. Pour cela, il faut :

- Soutenir les PME et ETI proposant des briques technologiques d'ingénierie par les modèles ;
- Organiser/favoriser la coopération entre les différents fournisseurs de technologie pour construire et intégrer des solutions holistiques complètes ;
- Développer des technologies formelles pour améliorer la qualité des systèmes ;
- Promouvoir un socle de technologie généraliste d'ACV pour favoriser son déploiement et usage systématique notamment auprès des PME et ETI ;
- Favoriser les projets d'application de l'IA pour le développement de systèmes et de logiciels complexes ;
- Développer l'Ingénierie dirigée par les Modèles naturelle pour la démocratiser en facilitant l'usage des technologies numériques ; en intégrant à la fois des technologies d'IA et des technologies facilitant le travail collaboratif pour favoriser l'intelligence collective ;
- Booster l'innovation dans les PME/ETI au travers d'un accès facilité aux "super-pouvoirs" de l'informatique.

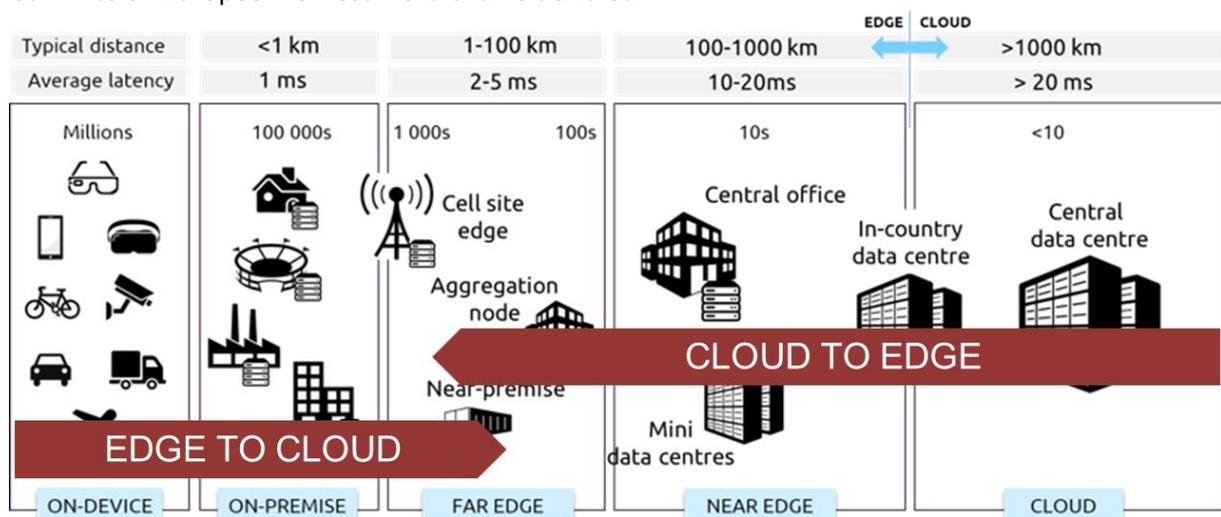
## 7.4 La numérisation de l'industrie : Données et systèmes distribués

Le passage des entreprises à l'industrie du futur se fait en premier lieu à travers la numérisation :

- Numérisation des systèmes d'informations (IT) à travers, par exemple, les systèmes de planification des ressources de l'entreprise (ERP), la gestion de la relation client (CRM) ou la veille stratégique (BI).
- Numérisation croissante des systèmes industriels (OT) directement liés à la manière dont une entreprise fonctionne, et fabrique ses produits qui s'articulent généralement autour d'un système d'exécution de la fabrication (MES ou manufacturing execution system) utilisant des systèmes tels que PLCs SCADA, etc...

Au fur et à mesure que la numérisation s'impose à l'entreprise, les deux mondes de l'IT et de l'OT, traditionnellement séparés convergent vers un système intégré qui permet un meilleur échange des données entre les mondes fonctionnels et opérationnels de l'entreprise. À mesure que davantage de systèmes travaillent ensemble, les données peuvent être partagées, mises à jour et communiquées avec une plus grande cohérence permettant d'atteindre une plus grande agilité opérationnelle et de réagir plus rapidement au changement.

Cette convergence permet une efficacité accrue, avec, selon Gartner, un accroissement du temps d'utilisation des équipements jusqu'à 30% une réduction des coûts de l'ordre de 10% et une qualité supérieure (20%). Cette transformation offre aux entreprises des possibilités de réagir plus rapidement au changement, de mieux diagnostiquer les possibilités d'amélioration des performances et de fournir les bonnes données, au bon moment, aux bonnes personnes pour une aide à la décision intelligente. Pour soutenir cette convergence, il est d'abord nécessaire de s'appuyer sur une infrastructure numérique puissante et à large usage. La mission 5G industrielle qui a donné ses conclusions début 2022 a pointé l'importance que la 5G pour l'accession à la numérisation des entreprises et à cette convergence qui s'annonce. La 5G fournit le squelette nécessaire au déploiement de l'IloT et de sa gestion à travers l'edge computing. Au-delà de des plateformes locales, le partage de données développe un grand potentiel pour générer de la croissance en permettant aux entreprises d'optimiser les processus existants et en rendant possible la création de nouveaux produits et activités. Ce partage des données provient de différents secteurs industriels par l'intermédiaire de plateformes permettant de faciliter l'échange d'information entre deux ou plusieurs acteurs industriels. GAIA-X, lancé par la commission, a l'ambition d'être l'agrégateur de ces plateformes. Le schéma ci-dessous proposé par la Commission Européenne<sup>4</sup> résume la chaîne de valeur.



<sup>4</sup> European industrial technology roadmap for the next generation cloud-edge offering, European Commission, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/today-commission-receives-industry-technology-roadmap-cloud-and-edge>

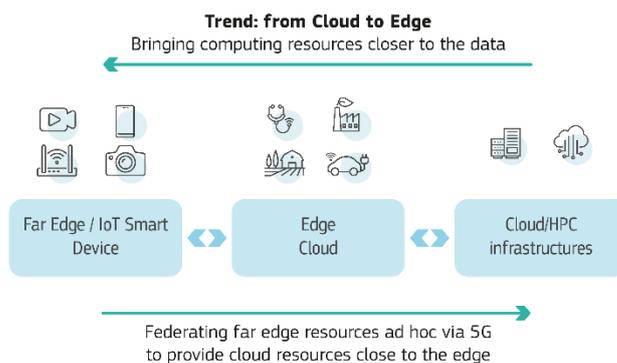
Corollaire de cette explosion des données industrielles et de cette hyperconnectivité, la sécurité devient cruciale pour les entreprises. La blockchain apporte des solutions novatrices, notamment **sur la certification et la traçabilité** grâce au stockage et à la transmission d'informations transparentes et sécurisées permettant de garantir la traçabilité de composants ou d'opérations.

Finalement, si cette convergence permet à l'entreprise d'améliorer son efficacité opérationnelle, elle accroît dans le même temps sa vulnérabilité face aux attaques informatiques. Il est donc nécessaire de se protéger en développant des outils de cybersécurité adaptés aux problématiques de l'industrie.

#### 7.4.1 L'usine connectée (Ilot Internet des objets industriel) /5G /Edge/Cloud)

##### 7.4.1.1 Définition du périmètre S&T

Le premier objectif de la numérisation de l'industrie est de connecter des capteurs, des dispositifs des équipements, des applications logicielles et à plus haut niveau des installations de production et des opérateurs. Cela nécessite le déploiement d'une infrastructure de communication adaptée qui doit remplacer des solutions propriétaires qui ne permettent pas de bénéficier des solutions d'edge computing et de cloud computing qui permettent de traiter les données ainsi récoltées. Une intégration à la fois verticale et horizontale transparente à travers toutes les couches de la pyramide d'automatisation, offrant des possibilités d'accroître l'efficacité opérationnelle de la chaîne logistique à l'usine en optimisant les process à l'aide des données ainsi collectées. Le schéma<sup>5</sup> ci-dessous depuis les composants/équipements connectés jusqu'au cloud en passant par l'edge computing.



Le continuum des données est un préalable à la numérisation des entreprises. La feuille de route Européenne pour le cloud distingue 3 types de cloud :

4. Le Cloud : Fournit des moyens de calcul et de stockage distants. Il permet aussi d'avoir des espaces de données partagés. Ce type de cloud permet aussi le traitement et le stockage des données externes à l'entreprise concernant l'environnement de l'entreprise (clients, fournisseurs, ...).
5. Le Edge Cloud : Traitement local des données (Région-ville, organisme, entreprise, etc.). Ce type de cloud permet le traitement et le stockage des données de l'entreprise liées aux systèmes d'information (IT : pour Information technology) concernant les services internes de l'entreprise (Gestion entreprise, bureautique, Mail, ERP ...). Ces données peuvent être facilement liées au (voire traitées dans le) cloud.
6. Le Far Edge Cloud : Traitement des données sur le terrain (usine, réseau urbain, champs agricole, chantier, ...). Ce type de cloud permet généralement le traitement des données de l'entreprise liées aux opérations (OT : pour operation technology, processus de production des

<sup>5</sup> The next generation Internet of Thing, European Commission, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/next-generation-internet-things>

biens et services). Ces données techniques, spécifiques du métier de l'entreprise sont à lier aux autres types de données et à traiter dans le cloud.

#### 7.4.1.2 *Etat de l'art scientifique et technique*

##### 7.4.1.2.1 5G

Un système 5G se présente comme un pont virtuel prêt à s'intégrer aux systèmes de gestion de réseau existants. Ceux-ci utilisent généralement des protocoles de gestion de réseau pour cela, comme le protocole SNMP (Simple Network Management Protocol) et les bases d'informations de gestion. Un système 5G déployé dans une architecture de réseau Ethernet intégrée peut avoir plusieurs ponts Ethernet logiques 5G.

La 5G marque aussi un tournant avec l'introduction des « réseaux privés 5G » qui définit un système cellulaire 5G conçu et exploité exclusivement pour l'usage privé d'une entreprise, d'un individu ou d'un organisme gouvernemental. Les réseaux privés 5G sont définis par le 3GPP comme étant des réseaux non publics qui ont généralement recours à un déploiement plus concentré, à plus petite échelle, afin de répondre aux besoins d'une organisation en termes de fiabilité, de disponibilité et d'entretien. Cette technologie permet aux utilisateurs de créer des réseaux 5G privés qui offrent des services dédiés à un groupe d'appareils dans une zone définie, comme des usines et des manufactures. Cette fonctionnalité permet aux fabricants d'isoler et d'adapter leurs réseaux à des exigences d'application spécifiques telles que la haute disponibilité, la qualité de service, la confidentialité, la sécurité et la sûreté.

##### 7.4.1.2.2 *Edge & cloud computing*

Les travaux menés dans le cadre des Filières stratégiques font souvent référence à la maîtrise des données mais sans qu'aucun programme ne traite spécifiquement les données sur le terrain (OT). Il s'agit d'un domaine de recherche spécifique. Aujourd'hui en France, dans le cadre général des plans de relance, il convient d'actionner le levier que représente la stratégie cloud et verdissement du numérique en lui adjoignant un volet OT qui permettra à cette stratégie de couvrir le continuum des données de l'objet au cloud.

#### 7.4.1.3 *Etat de l'art industriel (il s'agit là des industriels « offreurs de solutions »)*

##### 7.4.1.3.1 5G industriel

Suivant les travaux e la Mission 5G industrielle, la France dispose d'un écosystème de fournisseurs de solutions et d'intégrateurs très dynamiques autour des réseaux privés 5G pour l'industrie. Dans un contexte de virtualisation accrue des réseaux, ces entreprises permettront de construire un panel d'offres adaptées à la dimension, aux besoins et aux modèles économiques des sites industriels.

##### 7.4.1.3.2 *Edge & cloud computing*

L'offre de technologies nationales pour la maîtrise des données sur le terrain est importante - plus de 100 acteurs répertoriés - mais reste fragmentée et a besoin d'être renforcée au sein d'un écosystème :

- a. L'offre française de solutions pour maîtriser les données des capteurs/machines intelligentes est assez bien fournie (Schneider Electric, Fives) pour l'industrie et l'énergie.
- b. Plusieurs acteurs dans le segment du cloud storage (OVH, Outscale, Scaleway) mais avec une force de frappe faible comparée aux grands groupes américains surtout AWS, MS (Azure) ou Google.
- c. De fortes compétences en traitement des données avec quelques grands groupes comme ATOS et Orange, mais une offre limitée pour les PME/ETI.
- d. Les grands acteurs du cloud ont commencé à investir les secteurs du edge cloud en offrant des solutions génériques avec un contrôle local du stockage et des traitements. Par

contre, ils sont encore loin de pouvoir répondre aux demandes de numérisation du terrain où des solutions spécifiques aux différents métiers sont nécessaires.

#### 7.4.1.4 Objectifs scientifiques 2030

Selon un livre blanc conçu par un groupe de 70 experts, lors d'un atelier du 6G Wireless Summit 2019, les technologies de communication mobile vont progresser largement au-delà de ce qui est connu aujourd'hui. Cela devrait améliorer l'efficacité des entreprises et des industries.

Les grands challenges de la recherche pour la 6G doivent se concentrer sur la faisabilité d'une transmission jusqu'à 1Tbps par utilisateur, l'usage de bandes dans la gamme des THz et l'inclusion de nouvelles technologies telles que le web3.0 (blockchain), ou l'Intelligence Artificielle pour et par la 6G. Compte-tenu de la diversité des systèmes connectés et des applications complexes mises en œuvre, il faudra que l'architecture des communications 6G donne des gages de confiance vis-à-vis des utilisateurs (sécurité conçue et réalisée sur couche physique pour les dispositifs connectés). Le volume de données sera tel que la protection de la vie privée deviendra un des facteurs clés pour les services proposés.

La 6G facilitera la circulation des données mais elle sera aussi un environnement de services où les calculs se dérouleront près de l'endroit physique où les données sont collectées et analysées (*Edge Computing*) plutôt que sur un serveur centralisé ou dans le nuage (*Cloud Computing*).

#### 7.4.1.5 Objectifs industriels à 5 ans

##### 7.4.1.5.1 5G

Dans un contexte de virtualisation accrue des réseaux, ces entreprises permettront de construire un panel d'offres adaptées à la dimension, aux besoins et aux modèles économiques des sites industriels.

Des travaux menés autour de l'« ouverture » de certaines interfaces au niveau du réseau d'accès donnent la possibilité d'agrèger des briques technologiques issues de fournisseurs différents. Il ressort des travaux de la Mission 5G industriel que ce type de solutions ouvertes ne sont pour la plupart pas encore matures et que, si leur prix d'acquisition est souvent inférieur à celui de solutions plus classiques, leur coût d'opération et de maintenance est encore significativement élevé. De plus, elles requièrent un grand degré de maîtrise technique pour être déployées et opérées.

Parmi les principaux cas d'utilisation de la 5G industrielle figurent :

- La surveillance à distance : les entreprises sont en mesure de collecter des données à partir de capteurs situés dans leurs installations ou leurs processus de fabrication. Ces données peuvent être utilisées pour identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent problématiques, améliorant ainsi les performances et la sécurité des opérations.
- La maintenance prédictive : utilise des algorithmes d'apprentissage automatique pour analyser les données des réseaux IoT et prédire le moment où les équipements tomberont en panne ou nécessiteront un entretien. Disposer de ces informations permet aux entreprises de programmer les réparations de manière proactive au lieu d'attendre que les problèmes surviennent, ce qui peut permettre de gagner du temps et de l'argent en réduisant les temps d'arrêt non planifiés.
- Les robots autonomes : la 5G industrielle leur permet de communiquer entre eux et de coordonner leurs actions. Cela peut être utilisé dans des applications telles que la gestion d'entrepôt ou la logistique, où les robots peuvent travailler ensemble pour optimiser les opérations.

#### 7.4.1.6 Stratégie (enjeux/usage) (concerne les industriels ou filières industrielles utilisatrices).

Le cabinet KPMG a rédigé un livre blanc sur le Cloud européen avec pour objectif de dresser un panel des différents enjeux auxquels est confronté le secteur et de proposer des scénarios sur ce que pourrait s'inscrire l'avenir de ce secteur en Europe<sup>6</sup>. Les principales conclusions sont :

- Le cloud européen est un marché à très fort potentiel qui devrait atteindre jusqu'à 260 Md€ d'ici 2027 et plus de 500 Md€ d'ici 2030.
- Si les opérateurs de cloud localisaient leurs opérations et leurs investissements en Europe, cela pourrait permettre de créer environ 550 000 emplois et de déclencher des investissements significatifs de l'ordre de 200 Md€ sur la période 2021-2027.
- Au-delà de son importance pour le développement économique de notre territoire, le cloud est aussi un marché stratégique pour la défense d'un modèle numérique européen assurant à ses utilisateurs la pleine maîtrise de leurs données industrielles.
- La structuration actuelle du marché européen ne paraît pas pérenne sur le long terme et ce pour de nombreuses raisons : risques juridiques et commerciaux (ex : problématique des lois à portée extraterritoriale) ; pratiques anticoncurrentielles et barrières à l'entrée sur le marché ; forte demande des utilisateurs quant à la protection de leurs données ; et tensions dues à la croissance rapide du marché.

Il est nécessaire d'aligner les besoins de la demande (utilisateurs finaux comme Valeo, Schneider Electric, ...) et les offres des fournisseurs de solutions (Schneider Electric, ATOS, ...) pour co-construire un cloud approprié à la numérisation du terrain facile à utiliser par les entreprises y compris les PME. Une telle action doit permettre de renforcer les fournisseurs et les utilisateurs pour maîtriser le continuum de l'objet au cloud en vue de le mettre à la portée de l'ensemble de l'industrie française, y compris les PME.

Les bénéfices attendus de l'ouverture d'une action nationale/Européenne dédiée à la maîtrise des données sur le terrain sont à court terme de :

- Soutenir la numérisation des entreprises à se digitaliser complètement, en maîtrisant TOUTES leurs données avec des solutions pour accompagner les grands groupes d'un côté et une offre dédiée pour les PME/ETI de l'autre ;
- Renforcer l'offre des solutions pour la maîtrise des données sur le terrain à partir des capteurs et machines intelligentes ;
- Faire émerger des champions du continuum du traitement des données de l'objet au cloud.

A plus long terme l'effet sera le renforcement de toute la filière du numérique Française (et Européenne), mais aussi plus largement de tout le tissu économique. Il s'agit de :

- Augmenter la valeur des données et améliorer la compétitivité des entreprises Françaises ;
- Créer une expertise dans le domaine de la maîtrise des données-terrain ;
- Lancer des activités de R&D&I collaboratives en France sur ce sujet majeur, ce qui permettrait de prendre un leadership dans la course qui démarre pour la maîtrise des données-terrain ;
- Favoriser le développement, la validation et le transfert d'innovations de la recherche vers les industriels majeurs du domaine ;
- Faire émerger et consolider de nouveaux acteurs dans ces sujets clés ;
- Améliorer la visibilité de la France dans ce domaine, ainsi que sa présence et contributions dans les grands écosystèmes européens et internationaux ;
- Créer de nouvelles opportunités de recherches, de coopérations industrielles et des synergies Trans-sectorielles.

Au-delà des avantages sociaux et économiques, les solutions de cloud de terrain (edge computing) permettent une réduction drastique de la consommation énergétique. L'empreinte énergétique du Cloud est croissante. Le numérique représente 9 % (~20 % en 2030) de l'énergie consommée par an.

---

<sup>6</sup> Le cloud européen : de grands enjeux pour l'Europe et cinq scénarios avec des impacts majeurs d'ici 2027-2030, <https://home.kpmg/fr/fr/home/insights/2021/04/cloud-europeen-croissance-enjeux.html>

Le cloud local est une solution d'efficacité énergétique. Selon le rapport de prospective stratégique 2020<sup>7</sup> « transferring and storing one gigabyte of data through the internet uses between 3.1 kWh and 7 kWh, instead of 0.000005 kWh if done locally ».

#### 7.4.1.7 Recommandation

L'infrastructure numérique (5G, IIoT, cloud..) est la colonne vertébrale de de l'industrie 5.0 permettant aussi bien l'accès aux réseaux mobiles mais des usages depuis la maintenance prédictive jusqu'à la collection des données venant des machines et des différents systèmes d'information de l'usine. Pour cela un certain nombre d'actions ont été lancée via la mission 5G industriel et les stratégie d'accélération 5G et cloud. Il convient de convertir ces résultats dans le domaine de l'industrie ce qui demande de :

- Capitaliser sur les FabLab 5G issus de l'AMI FabLab 5G industriel comme « bac à sable » permettant des expérimentations pour tester des cas d'usage différents dans des conditions proches des conditions réelles ;
- Lancer des démonstrateurs 5G impliquant des acteurs français et européens ;
- Développer, en complément des solutions de sécurisation "préventives" traditionnelles du réseau (authentification, contrôle d'accès, chiffrement, ...) définies dans les standards, des solutions complémentaires de sécurisation "réactives et autonomes" des réseaux ;
- Soutenir le développement de solutions 5G souveraines pour les réseaux privés d'entreprises ;
- Intégrer de l'intelligence et de l'apprentissage machine sûr, fiable et explicable dans l'ensemble du réseau (5 et 6G) pour automatiser son fonctionnement et sa gestion ;
- Assurer l'interopérabilité dans les communications et les services de bout en bout à tous les niveaux, en assurant l'alignement et la compatibilité des propriétés, des politiques et des règles d'interconnexion, de protection et de sécurité des systèmes impliqués ;
- Développer des solutions « edge computing » à base des technologies définies à partir du projet OTPaaS ;
- Remplacer les traitements des données sur le terrain, organisés en silos, par une plateforme native Gaia-X par construction (portable, interopérable, sécurisée et souveraine ...).

#### 7.4.2 Blockchain

##### 7.4.2.1 Etat de l'art scientifique et technique

D'un point de vue technologique, la blockchain n'a jamais cessé d'évoluer, grâce à un écosystème diversifié fortement ancré dans une R&D de pointe. La blockchain a ainsi modifié ses algorithmes de consensus pour être de moins en moins énergivore, ajouté des mécanismes pour que les transactions soient plus rapides et intégré des primitives cryptographiques pour la confidentialité. Des environnements de développement évolués permettent aujourd'hui d'écrire des contrats intelligents en quelques heures et les lancer dans une blockchain existante en quelques clics.

D'un point de vue usage, la blockchain a parcouru un long chemin, passant de simple registre pour les cryptomonnaies comme le Bitcoin à l'épine dorsale de la traçabilité des produits et des processus dans des chaînes d'approvisionnement complexes et multi-acteurs. Dans la mesure où un service fourni via une blockchain ne nécessite pas d'entité centrale de contrôle, il est par conséquent particulièrement adapté aux applications qui traversent les frontières de différentes organisations, pour lesquelles une autorité universellement reconnue n'existe pas ou serait difficile à établir. Des applications comme la certification de l'énergie verte, la traçabilité de produits ou la certification des diplômes universitaires sont à ce jour déployées et commercialisées. D'autres applications sont à venir comme celles liées à l'économie circulaire et aux passeports produits. Certains perçoivent la blockchain comme incontournable dans le développement des jumeaux numériques et des metaverses.

---

<sup>7</sup> Rapport de prospective stratégique 2020 [https://ec.europa.eu/info/strategy/strategic-planning/strategic-foresight/2020-strategic-foresight-report\\_fr](https://ec.europa.eu/info/strategy/strategic-planning/strategic-foresight/2020-strategic-foresight-report_fr)

A noter la forte implication de l'Europe dans l'écosystème avec la mise en place d'une infrastructure blockchain mutualisée entre les pays de l'Union Européenne dénommée EBSI.

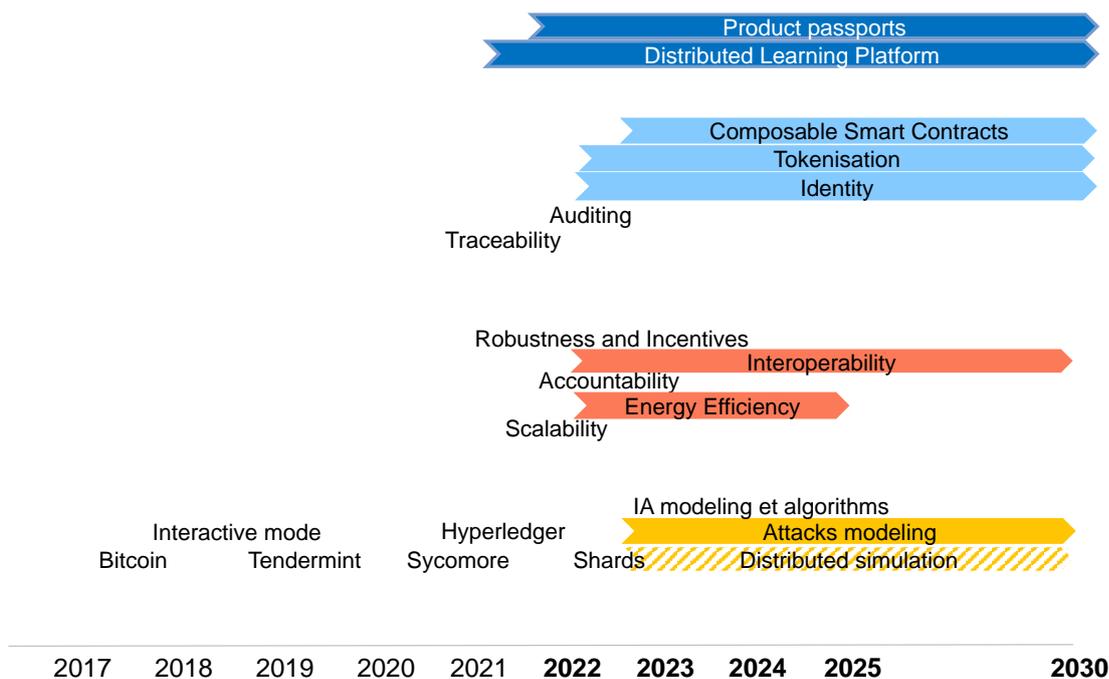
#### 7.4.2.2 *Etat de l'art industriel (il s'agit là des industriels « offreurs de solutions »)*

Les industriels offreurs de solution se sont structurés autour d'activités à différents niveaux des registres de confiance décentralisés :

- La fourniture de services d'infrastructure, permettant d'utiliser des blockchains à la demande. C'est par exemple le cas d'Hyperledger Fabric, développé par IBM et Digital Asset, Corda développé par R3, ou encore Ethereum.
- La fourniture de services-clé, construits sur la base de blockchains, et permettant par exemple l'interconnexion, la traçabilité de données, ou encore la tokenisation de biens. Un exemple très visible serait la plateforme Binance d'échange de crypto-monnaies, ou la plateforme OpenSea de frappe de NFT.
- La fourniture de services finaux « tiers de confiance », utilisant les blockchains et leurs services en *back-end*, pour permettre de sécuriser l'intégrité de transactions décentralisées. Parmi la grande diversité de ces industriels, on trouve des startups de l'agroalimentaire comme Connecting Food, comme les géants de l'automobile comme BMW ou de l'énergie comme Engie.

-  
Dans tous ces cas, la mise en œuvre industrielle lève des problèmes de passage à l'échelle, de frugalité, d'interopérabilité, et de confiance, qui requièrent des avancées fondamentales dans l'ingénierie de tous les niveaux (infrastructures, services, applications...) des piles logicielles et systèmes concernées.

#### 7.4.2.3 *Objectifs scientifiques 2030*



#### 7.4.2.4 Objectifs industriels à 5 ans

Selon Gartner. La valeur ajoutée commerciale de la blockchain atteindra un peu plus de 176 milliards de dollars d'ici 2025, puis elle dépassera 3,1 billions de dollars d'ici 2030.

On peut mettre en évidence six grands domaines d'applications de la blockchain dans l'industrie :

- La rationalisation des données pour améliorer l'efficacité : l'adoption de la blockchain permet une réduction des délais de traitement des problèmes tels que la maintenance. Il permet d'améliorer les prévisions pour les gestionnaires de stocks et les distributeurs
- La collaboration entre les parties prenantes : les fabricants peuvent sélectionner un fournisseur en fonction de l'historique stocké dans un grand livre partagé. Toutes les parties prenantes du réseau peuvent bénéficier de la collaboration en supprimant les intermédiaires inutiles et les goulots d'étranglement dans la chaîne de valeur de fabrication
- La traçabilité en temps réel : l'historique des produits liée aux matériaux, à la logistique, à la fabrication, au stockage et à la distribution peut être suivi en quelques secondes plutôt qu'en plusieurs jours avec plus de fiabilité et de confiance basée sur des enregistrements immuables.
- La fiabilité et transparence : la blockchain fournit des informations vérifiées sur les produits en temps réel, notamment l'origine, le processus, les détails de transit, etc. Elle améliorera la fidélité des clients à long terme en améliorant la fiabilité des produits et la transparence de la production.
- La gestion de la qualité des produits : les fabricants peuvent suivre et rappeler un lot d'un produit auprès des clients et des distributeurs au lieu de l'intégralité de l'envoi. Il améliore le coût économique lié à un rappel de produit.
- Des économies sur les coûts de vérification et de surveillance : les fabricants peuvent améliorer la transparence financière en utilisant la blockchain, ce qui réduira les coûts de vérification pour les fournisseurs et les coûts de surveillance.

#### 7.4.2.5 Stratégie (enjeux/usage) (concerne les industriels ou filières industrielles utilisatrices).

Si les technologies des blockchains ont beaucoup évolué depuis l'apparition du Bitcoin, elles ne jouissent pas toujours d'une bonne réputation. Servant initialement d'infrastructure pour les cryptomonnaies, la blockchain a été perçue comme l'« instrument informatique » de marchés douteux et

d'activités illégales. Leur impact environnemental, conséquence directe des choix de conception des mécanismes de consensus implémentés initialement, a été également fortement décrié.

L'enjeu aujourd'hui est de permettre la mise en œuvre de ces technologies, de façon responsable, pour permettre aux industriels de la filière de se positionner compétitivement face aux challenges de la décentralisation. Plusieurs verrous viennent néanmoins impacter la réalisation de cette stratégie. D'abord, la capacité à analyser et benchmarker les solutions existantes ou émergentes, pour permettre une prise de décision adaptée aux contextes industriels spécifiques des acteurs de la filière. Par exemple, les temps d'enregistrement des différentes chaînes de blocs peuvent influencer sur l'applicabilité dans des contextes terrain contraints. Ensuite, le développement de nouvelles fonctionnalités « cœur » des infrastructures blockchains et des services clés déployés, pour permettre de garantir par exemple la protection des données ou la traçabilité des calculs. Enfin, le plus important verrou concerne les chaînes d'outillage pour la conception et la vérification de registres de confiance décentralisés. Le manque criant d'approches correctes se voit, entre autres, aux spectaculaires vulnérabilités exploitées dans le monde de la crypto-finance<sup>8</sup>, mais impacte très largement, au-delà des questions de cybersécurité, la fiabilité, la sûreté, et la frugalité de l'ensemble de ces approches.

- Aux Etats Unis, une enquête menée auprès de plus de 500 entreprises américaines a révélé que 75 % des utilisateurs de l'IoT avaient déjà mis en œuvre la blockchain ou prévoient de le faire.
- GE Research a développé un réseau Blockchain sécurisé quantique pour l'impression 3D qui peut gérer les transactions numériques, de la poudre au produit fini
- Engie utilise une blockchain pour certifier l'origine de l'électricité verte
- Maerk (logistique) utilise la blockchain pour gérer le dédouanement numérique pour l'importation et l'exportation de conteneurs. et suivre les envois selon différents modes de transport
- Renault s'est associé à IBM pour certifier la conformité des composants du véhicule entre les fournisseurs
- Moog s'est associé à VeriTX et Algorand pour l'impression 3D basée sur la blockchain afin de réduire le temps de remplacement des pièces d'avion.
- Merck s'est associé à IBM pour garantir la sécurité des patients en cas de rappel de produit. ▪ L'adoption de la blockchain conduit à la réduction des contrefaçons
- ....

Le « World Economic Forum's Mining and Metals Blockchain Initiative ("MMBI")" propose de tracer les émissions de carbone.

De même suivant l'OCDE<sup>9</sup>, la blockchain favorise la réutilisation et le recyclage des matières dans un concept d'économie circulaire. Suez propose une blockchain, Circularchain pour répondre à cet usage.

#### 7.4.2.6 *Recommandation*

Mise en place d'une plateforme industrielle de registres distribués de confiance basée sur des blockchains vertes. Ceci nécessite de :

- Lancer une grande action d'innovation sur les sujets de conception, de validation et de benchmarking, avec pour objectif de créer les outils, manquants aujourd'hui, qui faciliteront l'adoption des technologies blockchain par le développement plus simple de solutions sûres, fiables et vertes.
- Amplifier les recherches sur le sujet de la confidentialité et de la gestion des données personnelles ou sensibles (privacy), et de focaliser une partie des compétences en génie logiciel sur les problèmes spécifiques des applications et des infrastructures blockchains.

---

<sup>8</sup> <https://www.msn.com/fr-fr/actualite/other/binance-arr%C3%AAt-d-urgence-de-la-blockchain-pour-piratage-500-millions-d%C3%A9rob%C3%A9s/ar-AA12HoXt>

<sup>9</sup> Blockchain technologies as a digital enabler for sustainable infrastructure

- Développer des blockchains scalables et non énergivores.

### 7.4.3 Cybersécurité

#### 7.4.3.1 Définition du périmètre S&T

La transformation numérique de l'industrie a entraîné de nombreux avantages, allant de produits de meilleure qualité à une productivité accrue et à des délais de mise sur le marché plus courts. Dans ce monde numérique, les données sont devenues un élément essentiel dans de nombreuses décisions et processus critiques au sein et entre les organisations. L'échange de données est désormais un processus clé pour la communication, la collaboration et l'efficacité des organisations. L'adoption par l'industrie 4.0 de technologies de communication modernes a rendu ces données disponibles et partageables.

La connectivité à la base de l'Industrie 4.0 fait apparaître un risque critique de cybersécurité. En effet, l'échange de données industrielles et le contrôle à distance de systèmes de production imposent d'accroître les mesures de sécurité.

Le marché de la sécurité OT évolue rapidement. Le marché de niche traditionnel de la sécurité OT mettait l'accent sur les produits axés sur les systèmes industriels et les réseaux d'exploitation uniquement. Le marché évolue maintenant rapidement à mesure que de nouveaux outils et services avec une gamme toujours croissante de fonctionnalités deviennent disponibles. Alors que l'OT continue de se connecter aux systèmes informatiques et que de nouveaux systèmes d'IloT sont déployés, la gestion, la gouvernance, l'infrastructure et la sécurité de l'OT évoluent.

Avec l'arrivée de la convergence entre l'IT et l'OT, les risques d'attaques sont de plus en plus élevés : les environnements critiques industriels sont aujourd'hui au cœur des cyberattaques. Leurs vulnérabilités les exposent à des conséquences physiques, environnementales et/ou financières importantes. On note en particulier une augmentation de 31% des attaques contre des outils de production en 2017 (vs. 2016).

Orange Cyberdefense a par exemple identifié 6 vulnérabilités présentes dans plus de 90% des usines qu'ils ont auditées :

- OS et firmwares non sécurisés,
- Protocoles non sécurisés,
- Absence de capacité de détection,
- Stations ingénieurs connectées en permanence,
- Absence de veille en sécurité,
- Absence de scellement de poste/anti-virus.

Une étude menée par Enterprise Strategy Group révèle que 49% des entreprises déclarent avoir subi une violation de données au cours des deux dernières années contre 39% en 2021.

#### 7.4.3.2 Etat de l'art scientifique et technique

Les systèmes industriels reposent de plus en plus, en particulier pour des raisons économiques, sur des mécanismes logiciels et des standards ouverts. Ils peuvent donc être attaqués, comme n'importe quel autre système d'information. Le contexte est d'autant plus sensible que les conséquences d'une attaque peuvent être catastrophiques.

En outre, certains dispositifs actuels seront utilisés encore de longues années, alors qu'ils n'ont pas été sécurisés à la conception. Ils offrent peu de ressources de calcul, ce qui rend difficile voire impossible l'ajout de mécanismes de protection. N'étant pas censés, à l'origine être exposés Leurs spécifications ne sont pas toujours publiques, ce qui rend les dispositifs de sécurité standards incapables de traiter leurs flux réseaux.

Les défis de recherche sont bien entendu liés à l'adaptation des mécanismes de sécurité à ce contexte très spécifique, qui nécessite notamment un fonctionnement en temps réel. La coexistence entre des dispositifs modernes sécurisés et des dispositifs anciens qui n'auront pas pu être modifiés doit être

soigneusement étudiée ; les protocoles de communications sont particulièrement concernés, car il faudra assurer l'interopérabilité. Enfin, dans un contexte où il sera difficile d'intégrer de nouveaux mécanismes et dispositifs, la supervision apparaît essentielle : l'étude de mécanismes de détection efficaces et spécifiques, aptes à être déployés dans ce contexte sans le perturber, est donc cruciale

Les développements en cybersécurité pour les installations industrielles portent principalement sur 6 axes de recherche :

- Sécurité autonome : l'objectif est de développer des outils autonomes / d'assistance aux experts capables de détecter des cyberattaques et d'y répondre en temps réel. Pour ce faire, une approche mettant en œuvre un réseau de surveillance parallèle au réseau et à l'exécution des applications à surveiller est utilisée. Ce réseau de surveillance est constitué de sondes intelligentes. Son auto-orchestration et sa mise en œuvre de fonctions de réponses constituent deux autres niveaux s'appuyant sur l'intelligence artificielle.
- Approche conjointe de la privacy et de la sécurité : l'objectif est de développer une approche basée sur des mécanismes cryptographiques (ABE) et protocolaires (Holo) permettant d'obtenir de très hauts niveaux de sécurité et de privacy, tout en offrant aux utilisateurs du système des moyens simples de le configurer, en particulier sur le plan du membership (par exemple : accès sécurisé mais anonyme à un réseau ou un service).
- Confiance dans les nouveaux paradigmes de calcul et de stockage : il s'agit de développer les méthodes et frameworks qui permettront la mise en œuvre de nouveaux paradigmes de calcul (e.g. Machine Learning) et protocoles de stockage distribués avec des garanties de confidentialité et d'intégrité.
- IoT & Edge de confiance : l'objectif est de réduire la surface d'attaque des composants numériques et de développer des architectures sécurisées sous contraintes, afin de répondre aux enjeux cyber dans les applications réparties sur le continuum IoT-Edge-Cloud. Les contraintes de frugalité, de coût et de garanties de sûreté de fonctionnement sont prises en compte.
- Analyse sécuritaire avancée du code : le but est d'adapter les progrès significatifs accomplis dans le cadre de l'automatisation des analyses de sûreté du code au cas de la sécurité. Le cadre (logiciels, langages, propriété, environnement) étant plus lâche, les méthodes ne peuvent pas être réutilisées telles quelles. Nous distinguons notamment le besoin de prendre en compte l'attaquant, de considérer des propriétés de sécurité avancées et enfin la possibilité non pas de vérifier qu'un code est sécurisé, mais aussi de le rendre sécurisé.
- Méthodes & outils pour la transition vers des systèmes numériques avec des niveaux de sécurité adaptés : une stratégie de sécurisation adaptée implique une analyse multifactorielle des systèmes et logiciels en considérant les besoins de l'écosystème (e.g., standards par domaine), leurs contraintes (e.g., rapport coût/bénéfice), les spécificités techniques (e.g., surface/opportunité d'attaque). La sécurisation adaptée s'adresse en particulier aux systèmes dont le niveau de risque 0 (i.e., sans faiblesses ni vulnérabilités) n'est pas atteignable.

#### 7.4.3.3 *Etat de l'art industriel (il s'agit là des industriels « offreurs de solutions »)*

Les industriels « offreur de solutions » en cybersécurité se retrouvent dans le CSF « industries de sécurité » et son projet structurant « cybersécurité et sécurité de l'IoT ».

L'écosystème français de la cybersécurité est construit autour de grands acteurs historiques, souvent issus de la sécurité numérique et/ou des services numériques, et souvent liés aux écosystèmes régaliens et de défense. Ces grands acteurs historiques, fortement exportateurs, ont des offres orientées vers les états, les Opérateurs d'Importance Vitale (OIV), et les grandes entreprises internationales. Ils représentent 13,3 Mds € de chiffre d'affaires en 2021.

Cependant, un autour de ces grands acteurs, il existe un écosystème de PME/ETI. Au cours de la décennie des années 2010, cet écosystème a progressivement pris de l'importance et recense désormais de nombreuses grandes PME dont certaines ont déjà dépassé la barre des 50 M € de CA et

sont devenues des Entreprises de Taille Intermédiaires (ETI), tournées vers l'international. Cet écosystème est composé très majoritairement de startups dont beaucoup ont des offres visant à adresser de nouveaux marchés comme les PME/TPE. La forte croissance de cet écosystème est portée par des levées de fonds pour des montants toujours plus importants d'années en années. Cet écosystème représente un chiffre d'affaires estimé entre 2 et 2,5 Mds € en 2021 (en additionnant les PME avec un chiffre d'affaires supérieur à 5 M €, les entreprises ayant bénéficié d'une levée de fonds pour un montant égal ou supérieur à 5 M € et les PME qui sont devenues des ETI depuis 2010). BPI France Le Hub a répertorié 150 startups spécialisées en cyber sécurité en 2021.

#### 7.4.3.4 Objectifs scientifiques 2030

L'Etat a lancé un programme de recherche PEPR doté de 65 M€ avec pour objectif de développer l'ensemble des technologies pour obtenir une couverture complète et souveraine pour prévenir les menaces. Le PEPR Cybersécurité a été structuré selon deux grands axes thématiques : la **sécurité de l'information** et la **sécurité des systèmes**. La première porte sur la protection des données indépendamment de leur support alors que le second s'intéresse précisément à ce support, où le terme « système » doit être interprété dans un sens large.

- **Axe Sécurité de l'information** : au-delà des protocoles de cryptographie qu'il convient de robustifier, l'attention porte autour du chiffrement homomorphe et du chiffrement fonctionnel qui permettent de réaliser des calculs sur des données chiffrées. Un autre sujet majeur est la cryptographie post-quantique, c'est-à-dire la cryptographie conçue pour résister à un ordinateur quantique. Il s'agit d'un sujet d'importance vitale car la cryptographie dite asymétrique telle qu'elle est conçue reposant sur la difficulté de la factorisation et du calcul du logarithme discret, ne pourra plus être utilisée lorsque les premiers ordinateurs quantiques efficaces apparaîtront. L'usage des plateformes de cloud computing requiert le développement d'outils d'anonymisation des données qui fournissent une confiance raisonnable dans l'incapacité d'identifier son fournisseur.
- **Axe Sécurité des systèmes** : aussi bien la sécurité des systèmes logiciels et/ou matériels que la sécurité des réseaux et des infrastructures. Ceci nécessite la conception de systèmes dédiés à l'analyse des vulnérabilités. Il est essentiel dans cette thématique d'avoir un point de vue vertical qui va du logiciel jusqu'au matériel, avec une étude particulière de l'interface entre le matériel et le logiciel en étudiant les vulnérabilités liées notamment à des canaux cachés et des corruptions de mémoire. L'explosion du déploiement d'objets connectés pose de nombreuses questions et de nouveaux verrous scientifiques à lever. Un objectif est donc de développer la surveillance des réseaux (dénis de service distribués, menaces persistantes, etc.), la gestion des identités et des clefs (cycles de vie), la sécurisation des protocoles distribués (par exemple, la sécurisation du protocole BGP), ou encore la sécurisation des réseaux de nouvelle génération (internet des objets (IoT), machine-to-machine (M2M), Software-Defined Network (SDN), Content Delivery Network (CDN), etc.).

#### 7.4.3.5 Objectifs industriels à 5 ans

Un certain nombre de projets, issus de la stratégie d'accélération qui ont permis de faire émerger des start-ups comme :

- CybelAngel capable de suivre l'exposition aux menaces cyber des différents éléments d'un système d'information aidant ainsi les utilisateurs à concentrer leurs efforts de sécurisation de leur surface d'attaque sur leurs vulnérabilités les plus critiques ;
- NANO Corp permettant de cartographier automatiquement tout réseau et de détecter aussi bien les attaques que les anomalies ;
- Quarkslab, proposant un outil qui permet d'assurer qu'un équipement connecté à un réseau est bien celui fourni par le constructeur, et qu'il n'a été ni copié ni altéré ;

Des projets ayant pour but la mutualisation des données cyber ont aussi émergé de la stratégie tel que SMART-CTI, système d’alerte et d’anticipation cyber pour qualifier une menace en agrégeant sur une plateforme des données provenant de capteurs multiples. Il s’agit de rendre possible et pratique le partage de donnée dans l’Industrie.

De nombreux fournisseurs entrant sur le marché de la cybersécurité OT ont une expérience de la sécurité de l’Internet des objets (IoT). Bien que les organisations connectent de plus en plus leurs usines au cloud, l’écart entre l’IT et l’IoT est présente. Alors que les capteurs IoT collectent des données de l’environnement physique pour améliorer la prise de décision dans les entreprises, les systèmes de contrôle industriels utilisent des microcontrôleurs pour manipuler le monde physique. L’objectif est de continuer à unifier les deux mondes. La sécurité, la disponibilité et la résilience sont des caractéristiques primordiales des environnements industriels qui nécessitent une expertise et une technologie uniques pour se défendre contre le paysage croissant des menaces.

#### *7.4.3.6 Stratégie (enjeux/usage) (concerne les industriels ou filières industrielles utilisatrices).*

La filière « industries de la sécurité » est structurée autour de 3 axes : le Grand défi cyber dans le cadre du conseil de l’Innovation, un « Campus cyber » visant à fédérer la communauté de la cybersécurité et à développer des synergies entre ces différents acteurs et une stratégie d’accélération cyber dotée de 1Md€ dont 720M€ de financements publics. Cette stratégie repose sur 5 axes :

- Développer des solutions souveraines de cybersécurité ;
- Renforcer les liens et synergies entre acteurs ;
- Soutenir l’adoption de solutions cyber par les entreprises, les collectivités et l’Etat notamment via des actions de sensibilisation tout en faisant la promotion d’offres nationales ;
- Former plus de jeunes et professionnels aux métiers de la cybersécurité ;
- Soutenir en fonds propres.

La stratégie a pour objectif, entre autres,

- De tripler son chiffre d’affaires.
- De doubler le nombre d’emplois en 2025.
- De développer des solutions souveraines et innovantes de cybersécurité.

#### *7.4.3.7 Recommandations*

La cybersécurité a été identifiée comme une technologie prioritaire afin de garantir la sûreté et la sécurité numérique des offres de solutions aux différentes filières industrielles. La filière S-I-F va s’appuyer en particulier sur les membres de la filière « industries de sécurité » ainsi que sur les différents outils à sa disposition tels que le Cyber Campus, le grand défi cyber, le PEPR cyber ainsi que la stratégie d’accélération. Dans le cadre de la filière S-I-F s’il s’agira de de porter l’ensemble des briques à notre disposition avec l’objectif de :

- Mettre à disposition une chaîne outillée d’évaluation renforçant la capacité des analystes
- Développer des outils de tests de conformités sécuritaires pour le développement d’objets et services sécurisés
- Développer des outils de protection des données hébergées dans le cloud
- Mettre à disposition une plateforme nationale d’analyse de codes binaires
- Mettre à disposition un bouquet de service innovants de détection, supervision et d’orchestration.

## 7.5 Intelligence artificielle pour l’industrie 5.0

### *7.5.1.1 Définition du périmètre S&T*

Le domaine d’intervention de l’IA pour l’industrie intègre tous les secteurs opérationnels et d’innovation des systèmes industriels, des couches les plus basses à celles de plus haut niveau d’interaction des installations avec l’environnement extérieur :

- Instrumentation, capteurs intelligents
- Suivi, contrôle et diagnostique des équipements
- Robotisation fixe et mobile
- Contrôle et supervision des systèmes de production
- Gestion et anticipation des commandes, suivi de de la relation client
- Distribution et logistique.
- 

Ces différentes couches font appel aux techniques de traitement des signaux, de vision par ordinateurs et de traitement automatique des langues (NLP) basées sur l'IA. Cela implique concrètement l'ensemble des technologies de l'IA :

- Raisonnement automatique (IA symbolique, systèmes experts) et résolution de contraintes
- Heuristiques d'optimisation combinatoire, programmation génétique
- Analyse statistique des données, apprentissage automatique avec des approches probabilistes (bayésiennes) et à base de réseaux de neurones, notamment avec de l'apprentissage profond (deep learning).

Les applications types de l'IA émergentes, parmi les plus évoquées par la communauté sont :

- Le contrôle qualité (dont le contrôle non destructif, CND) des pièces, produits par des techniques de vision (recherche de défauts dans des images au sens large selon la nature des signaux : image classique, infrarouge, rayons X mais aussi signaux vibratoires, radiations, etc.). Ces applications font massivement appel à des techniques d'apprentissage profond. (Exemples : pilotage de la qualité de l'eau de stations d'épuration chez Veolia, contrôle qualité de rotor chez Safran, contrôle de défaut de barres d'acier en laminage, contrôle de soudure de châssis automobile chez Renault)
- Maintenance prédictive par analyse de données capteur des machines de nature variables selon les équipements. On retrouve ici encore des méthodes d'apprentissage qui vont du probabiliste (bayésien) à l'apprentissage profond et parfois combiné avec la représentation d'expertise structurées (règles, contraintes, mais aussi modèles physiques/équations différentielle). Une particularité, est le besoin de gérer des « séries temporelles », c'est-à-dire d'intégrer pour l'apprentissage et le raisonnement non seulement les valeurs à un instant donné, mais également leur évolution au cours du temps (parfois sur des horizons très longs). (Exemples : prédiction d'engorgement de colonne de distillation chez Total Energie, prédiction de panne de porte automatique sur des quais de métro à la RATP, prédiction de vieillissement d'équipements par étude des paramètres physiques chez Alstom ou Trixell).

La vision et le traitement des langues pour le contrôle et la commande des équipements, en particulier pour les systèmes robotiques (identification et positionnement des pièces par vision, détection de risques, humains et mise en sécurité, planification des tâches, etc.). (Exemples : dévissage de pièces avant insertion dans la chaîne d'assemblage chez Siemens et la PME Tridimeo, gestion de véhicules automatisés (AGV) pour la logistique avec différents industriels comme Safran ou Stelantis et des PME comme TwinswHeel) :

- Gestion de la relation client par analyse des demandes, retours clients et suivi des flots d'interaction dans le temps par des méthodes d'apprentissage profond intégrant l'historique d'évolution des données (séries temporelles) couplées à des connaissances structurées (IA symbolique). (Exemples : prédiction de la demande et optimisation de la production par analyse des historiques de commandes et commandes en cours chez Air Liquide, analyse des retours clients par analyse sémantiques des messages chez Renault, suivi de trafic et prévision d'incidents sur réseau de transport à la RATP)

#### 7.5.1.2 *Etat de l'art scientifique et technique*

On distingue deux volets : celui de l'IA symbolique et celui de l'IA à base d'apprentissage.

Le volet de l'IA symbolique s'appuie sur une recherche et des résultats déjà bien établis et relativement stabilisés depuis plusieurs années. Les orientations actuelles les plus actives se situent, en particulier sur deux volets :

- L'explicabilité des résultats (des raisonnements logiques) aux utilisateurs finaux. L'enjeu est de trouver le bon niveau d'abstraction de l'information vis-à-vis de la formation et des centres d'intérêts de l'utilisateur. Il a donné lieu à des actions de recherche d'ampleur soutenues par la stratégie nationale de recherche en IA en phase 1 (2018-2022) dans plusieurs 3IA et chaires IA de l'ANR.
- Le couplage de l'IA symbolique à l'apprentissage machine, soit pour apprendre les règles et lever le frein de la collecte manuelle de l'expertise, soit en hybridation pour compléter les deux niveaux d'information. Ce thème est encore émergent et encore abordé en périphérie des thématiques plus établies de l'apprentissage machine.

Pour le volet apprentissage machine, les travaux scientifiques sont à ce stade très centrés sur les fondements génériques de l'IA et leurs applications où de grosses bases de données publiques sont accessibles, mais pour lesquelles la déclinaison opérationnelle demande encore des efforts de recherche et développement importants et complexes à mettre en place.

La stratégie nationale d'accélération de l'IA a ainsi mis l'accent du plan de recherche (PEPR) IA sur 3 clés essentielles pour le déploiement industriel de l'IA : la frugalité, l'embarqué et le distribué, la confiance. Le PEPR IA propose ainsi 9 projets de recherche ciblés pour progresser sur la levée de ces verrous critiques pour la diffusion industrielle de l'IA.

En effet, par exemple, si la vision par ordinateur obtient de très hauts niveaux de performance, elle nécessite la disponibilité de données en nombre, pas toujours accessibles. Ainsi la question de la frugalité des algorithmes en données et de leur capacité à apprendre efficacement avec peu de données (« few shot learning ») est essentielle. Ces applications, soulèvent également une autre thématique clé : l'adaptation (« transfer learning ») des algorithmes à chaque contexte d'usage (même pour une même fonction, le contexte de fonctionnement modifie le contenu de l'image, l'éclairage, le fond, l'environnement). Ce sujet du portage d'une fonction performante d'un contexte à un autre est un sujet de recherche très actif, mais encore largement ouvert. Cette thématique de la frugalité fait l'objet de deux projets prioritaires du PEPR IA, l'un sur les fondements mathématiques de la frugalité, l'autre sur le déploiement des algorithmes pour l'embarqué.

Les données sont à la base de l'apprentissage et soulèvent en elles-mêmes un champ complémentaire de recherche sur l'automatisation et l'aide à la mise en forme des données (annotation, qualification, analyse de couverture). Ce sujet est essentiel pour pouvoir développer rapidement et avec des coûts raisonnables des applications sur les différents jeux et types de données industrielles, en général beaucoup plus hétérogènes que ceux des données publiques usuellement utilisés pour la recherche. Ce sujet s'appuiera sur une action spécifique de la stratégie nationale d'accélération de l'IA centrée sur la mise en forme des données portée par Inria en synergie avec la plateforme Scikit-Learn.

Dans le monde industriel, un grand nombre de modèles physiques a été largement déployé et constitue une base très performante pour le développement des différentes fonctions de contrôle, pilotage, diagnostique et prévision. Cela amène naturellement la question du couplage des algorithmes d'IA à ces modèles physiques. C'est un thème qui monte en puissance au niveau international afin de bénéficier des atouts des deux approches pour compléter et enrichir les performances des applications (par exemple pour palier au faible nombre de données réelles, ou à leur faible qualité, ou inversement accélérer les simulations ou modéliser des phénomènes peu connus et complexes). C'est une thématique particulièrement regardée dans le domaine de l'énergie sous l'angle de l'approximation des modèles complexes et la gestion des incertitudes. Elle a potentiellement un impact transverse très large portant des ruptures et innovations importantes.

Le déploiement massif de l'IA dans les systèmes industriels interroge sur la pertinence de rester sur des architectures où l'apprentissage et le calcul sont centralisés sur un « cloud » (propriétaire ou partagé). La tendance de basculement du tout cloud au tout embarqué est une tendance forte du déploiement du numérique soulignée et portée par la commission européenne (inversement du rapport actuel 80% Cloud – 20 % embarqué à échéance 2030). C'est un axe prioritaire de la stratégie nationale d'accélération de l'IA est fortement soutenue à la fois par des actions de recherche fondamentale dans le PEPR IA, par des actions d'innovation avec des projets ambitieux de développement de composants matériels pour l'IA embarquée, et également via la mise en place d'une plateforme nationale et européenne de test et d'expérimentation support à la conception microélectronique pour l'IA (TEF PREVAIL). Elle est complétée par une plateforme de test et d'expérimentation de l'intégration de l'IA dans les systèmes industriels : la TEF AI-MATTERS.

Scientifiquement, la question est abordée à travers deux sujets complémentaires avec l'objectif de recentrer les calculs au plus près des sources de données et des usages :

- IA embarquée : qui s'attache à la capacité à réduire la taille des modèles et le volume de calculs à réaliser une fois l'apprentissage réalisé. Elle repose sur le développement de composants matériels d'accélération des calculs l'IA et moins consommateurs en énergie et sur la compression et l'optimisation des modèles et du code implantant les algorithmes pour réduire en amont les besoins en calcul et ressources embarquées. Cette thématique s'appuie sur la stratégie nationale d'accélération de l'IA via trois projets de recherche du PEPR IA, le lancement d'une plateforme généraliste d'optimisation du deeplearning embarqué portée par le CEA (DeepGreen), des projets d'innovation en soutien de la conception de nouveaux composants matériels pour l'IA embarquée et la plateforme microélectronique de test et d'expérimentation (TEF PREVAIL).
- IA distribuée (dont notamment, l'apprentissage fédératif) qui vise à effectuer l'apprentissage à la source sur chaque équipement d'acquisition des données et à partager entre les différents équipements uniquement le résultat de l'apprentissage afin de partager l'information utile sans faire circuler les données brutes elles-mêmes. C'est un sujet au cœur d'un des projets du PEPR IA.

Enfin, les applications de contrôle qualité ou pilotage des équipements amènent un besoin stratégique de leur qualification vis-à-vis des référentiels métiers (exemple détection de défaut de soudure sur des châssis automobiles) qui pose la question de la sûreté de fonctionnement des systèmes à base d'IA et plus globalement de leur confiance. C'est un enjeu national porté par le programme Confiance.ai qui regroupe une dizaine d'industriels des différents secteurs comme l'énergie, l'aéronautique ou l'automobile qui ont chacun des objectifs de déploiement de l'IA non seulement dans les produits, mais également, et de manière plus rapide, dans leurs installations de production, usines. Les cas d'usages remontés par ces industriels couvrent l'ensemble des applications et technologies évoquées ci-dessus. La thématique s'appuie également sur deux projets du PEPR IA dédiés aux fondements de la robustesse de l'apprentissage profond.

#### *7.5.1.3 Etat de l'art industriel (il s'agit là des industriels « offreurs de solutions »)*

L'offre commerciale dédiée à l'industrie 5.0 est à ce stade du déploiement de l'IA limitée aux grands acteurs de la robotique industrielle comme Siemens et de nombreuses PME comme AkeoPlus, Sileane, Tridimeo, TwinswHeel... De manière moins ciblée sectoriellement, elle est également portée par la plupart des grandes sociétés de services et de conseil (ATOS, OnePoint, Accenture, Cap Gemini...) ainsi que nombre de startup proposant des solutions applicables aux usages des différentes couches fonctionnelles des systèmes industriels.

Un élément structurant de l'adoption de l'IA est la clarification du cadre réglementaire permettant de fixer les exigences de développement et condition d'exploitation des systèmes à base d'IA. La nouvelle

réglementation européenne, AI Act, en cours d'adoption devrait clarifier le contexte et faciliter la diffusion dans le domaine industriel. On notera la prise en compte dès le début par la commission européenne du secteur du « manufacturing » qui a donné la production d'une déclinaison des recommandations générales sur ce domaine par le groupe d'experts haut niveau de la commission (High Level Expert Group). Il reste toutefois encore un travail important à réaliser et fortement poussé par la commission européenne dans des projets de rapprochement des communautés IA, données et robotique comme Adra-e avec l'ambition d'identifier les enjeux d'adaptation des réglementations sectorielles aux directives générales de l'AI Act afin de faire émerger des standards européens et mondiaux à la fois technique et de qualification des systèmes.

#### 7.5.1.4 Objectifs scientifiques 2030

Les principaux verrous scientifiques du déploiement de l'IA dans l'industrie du futur se déclinent sur quatre axes :

- La frugalité en données et algorithmes : même si ce thème est transverse, c'est un point bloquant pour la capacité à construire des applications d'IA performantes et avec des coûts maîtrisés. Cela comprend en particulier :
  - o La mise en forme automatisée des données,
  - o L'apprentissage avec peu de données (frugalité algorithmique)
  - o Le transfert et la spécialisation d'algorithmes à des usages particuliers
- Le couplage des modèles issus des technologies d'IA et de ceux usuellement utilisés en simulation. C'est particulièrement fondamental pour le domaine industriel très riche en modèles et simulations des phénomènes physiques et équipements manipulés.
- La qualité et la confiance des systèmes à base d'IA (aussi bien pour l'apprentissage que pour le symbolique / systèmes experts) et sa projection dans les exigences réglementaires sectorielles des domaines impliqués dans la stratégie de l'industrie 5.0.
- La décentralisation et relocalisation des traitements par :
  - o L'embarquabilité à faible coût, consommations de ressources et haute performance
  - o La décentralisation de l'apprentissage et la coopération ou décision distribuée entre équipements à base (similaires ou non) intégrant des fonctions à base d'IA

#### 7.5.1.5 Objectifs industriels à 5 ans

Les principaux apports industriels de l'IA sont des capacités :

- D'augmentation de la flexibilité, de la réactivité et de l'autonomie des équipements, moyens de production et de distribution
- D'amélioration de la qualité et de réduction des coûts de la maintenance par anticipation des pannes et optimisation du pilotage des équipements
- De réponses à des besoins changeants et notamment de faibles séries, et de besoins de spécialisations clients
- D'améliorer les conditions de travail des opérateurs en valorisant leurs valeurs ajoutées individuelles
- La gestion des ressources et de l'impact de l'industrie dans une vision avancée de l'économie circulaire. Avec en particulier le suivi et l'optimisation fine et en continu des consommations en énergie ou matière.

De manière plus prospective, dans le domaine des bureaux d'étude, l'IA pourra également permettre d'inventer de nouvelles approches (« generative design ») techniques, de nouvelles architectures voire même inventer des schémas de conception originaux et plus performants de par sa capacité à créer des heuristique d'exploration de problèmes très complexes et faire émerger des solutions en dehors des chemins battus (l'exemple phare est la capacité à construire des stratégies originales dans des jeux comme le Go, mais plus récemment l'IA a également permis d'inventer de nouvelles solutions mathématiques de calcul matricielle plus performantes).

#### 7.5.1.6 *Stratégie (enjeux/usage) (concerne les industriels ou filières industrielles utilisatrices).*

La filière doit faire face à trois grands enjeux :

- La sobriété (énergie et/ou matière) : l'IA est un outil nouveau pouvant proposer des approches en rupture pour l'optimisation des processus des couches les plus basses aux couches les plus hautes de l'activité et dans toutes leurs dimensions.
- L'intégration des processus de production dans une vision globale d'économie circulaire : Ici l'IA peut intervenir pour explorer des modèles interdépendants très complexes, proposer des heuristiques de prédiction, anticipation des comportements ou d'évolution du contexte environnemental.
- L'acceptabilité des innovations et l'intégration du facteur humain avec une capacité accrue d'activités plus centrées sur l'humain, tout en intégrant les contraintes incontournables de compétitivité des organisations industrielles.

Les principaux jalons industriels peuvent être déclinés autour des quatre éléments suivants :

- L'acculturation, la formation aux technologies de l'IA et leur expérimentation en environnement réel représentatifs. Par exemple, autour de projets de fédération d'écosystèmes sur des plateformes expérimentales, le développement de benchmark représentatifs des besoins, données et exigences des différents secteurs industriels.
- La construction de démonstrateurs flagship illustrant la valeur ajoutée de solutions d'IA.
- L'adaptation des réglementations sectorielles aux réglementations et enjeux de l'IA.

#### 7.5.1.7 *Recommandation*

Un déploiement rapide et efficace de l'IA nécessite des actions d'accompagnement des objectifs précédents (scientifiques, industriels et stratégiques). En particulier les actions suivantes seraient des leviers structurant d'accélération de l'innovation par l'IA :

- Création de plateformes d'acculturation et d'expérimentation de l'IA adaptées aux différents secteurs et coordonnées pour développer les transversalités et transferts de compétences.
- Création de structures dédiées à l'innovation et la recherche collaboratives, « bacs à sables », permettant la capitalisation de données, l'innovation tout en assurant la sécurité et la protection des informations industrielles sensibles.
- Le soutien de projets de recherche collaboratifs d'envergure regroupant de larges écosystèmes académique et industriels sur les verrous scientifiques clés :
  - o IA et simulation
  - o Gestion des données, apprentissage frugal
  - o Qualification et confiance
  - o IA décentralisée et embarquée.

Ces trois actions se complètent et s'appuient l'une sur l'autre et bénéficieraient d'une coordination globale.

Remarque : au-delà des actions essentielles d'acculturation, l'accent n'est pas mis ici sur le volet formation à l'IA, car il fait l'objet d'une mesure stratégique très ambitieuse de la seconde phase de la stratégie nationale d'accélération de l'IA. Les fondements scientifiques et techniques de l'IA étant communs aux différents domaines ils répondent aux besoins de l'Industrie 5.0. Deux sujets pourraient toutefois faire l'objet d'attentions particulière vis-à-vis des besoins de l'Industrie 5.0 : l'embarqué et la confiance. En effet ces deux sujets ne sont pas ou peu traités par les formations existantes de la communauté académique et ne semblent pas faire l'objet d'actions spécifiques de développement de formation

## 8 L'écosystème des principales filières utilisatrices

## 9 Liste des membres de la Taskforce Feuille de Route de la filière Solutions pour l'Industrie du Futur

- Sous la supervision d'Aymeric Renaud (Schneider Electric/Gimélec)
  - Les pilotes des 3 GT (offre, demande, accompagnement),
    - Jean-Noël Patillon (CEA List),
    - Philippe Piard (IRT Jules Verne),
    - Francis Jutand (IMT)
  - Les responsables du Comité d'experts, Laurent Aubertin (AFPC/Pole EMC2) et Arnaud Bocquillon (AFPC/Cimes)
  - Le Président du Groupe robotique d'Evolis Symop, Serge Nadreau (ABB)
  - Le correspondant du Group robotique d'Evolis Symop, Guy Caverot (IRT Jules verne)
  - Le Cetim, Héléne Determe (Guide des technologies industrie du Futur)
  - Thierry Valot (Fives/Evolis Symop),
  - Les Représentants Numeum – Yann Begue et Christophe Neveu (Akkodis)
  - Christophe Eschenbrenner (Dassault Systems, France Additive)
  - J. Dupenloup (Staubli)
  - Perdo Rodriguez & Anne Barros (CentraleSupelec)
  - Philippe Tavernier (Numeum)
  - Sebastien Massart (Dassault System)
  - Pascale Vicat-Blanc (INRIA)
  - Ainsi que,
    - Christian Ferveur (Schneider Electric),
    - Claire Brillanceau (Evolis Symop),
    - Laurent Siegried (Gimelec),
    - Paul-Emile Contreras (Gimelec),
    - Valentin Hueber (Numeum),
    - Vincent Pessione (IMT)
    - Rémi Malétras (AIF)
  - Participation de la DGE
    - Catherine Toucheau
    - Bertille Martinier
    - Betina Janneteau
    - William Bouet