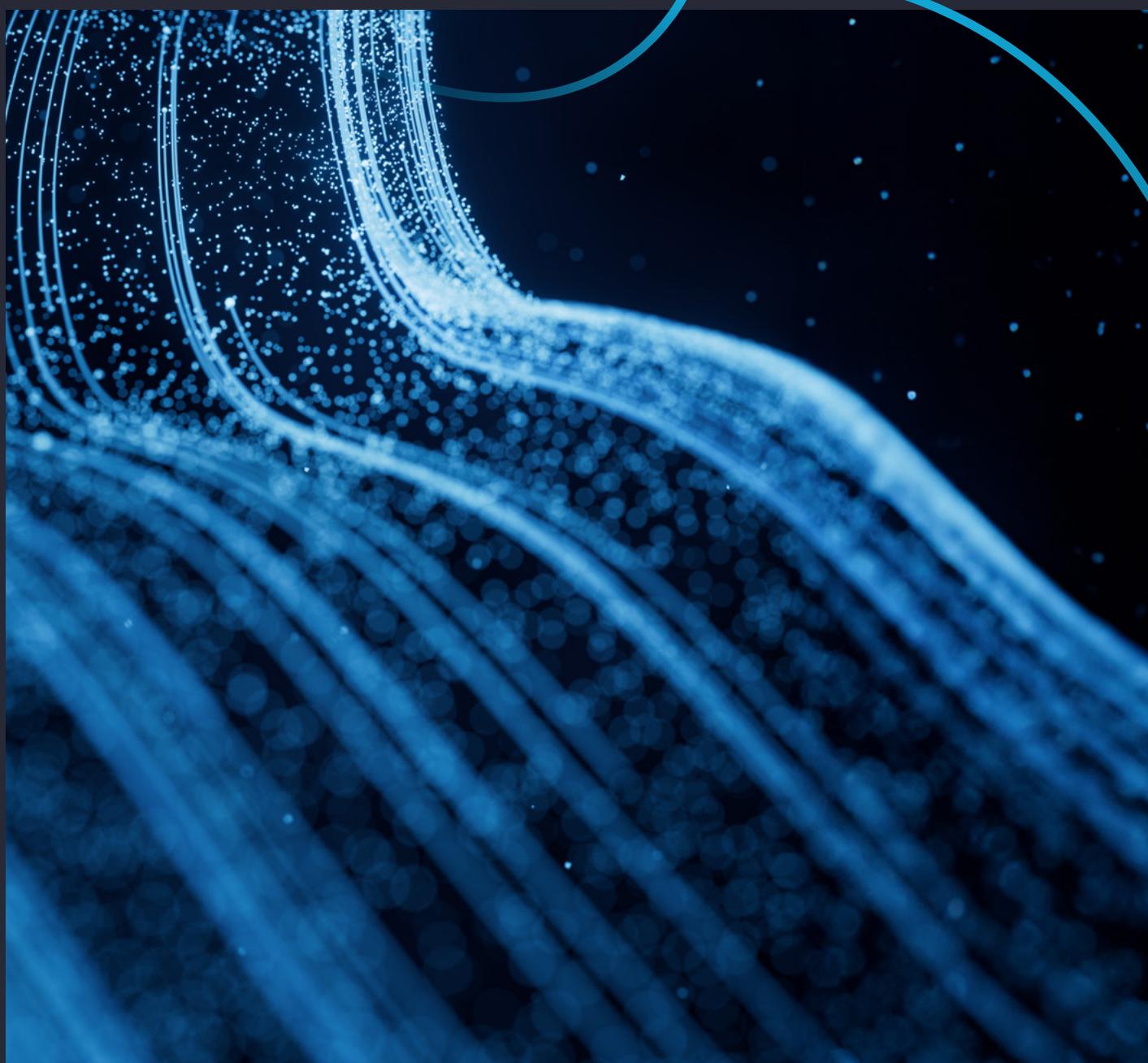


# Tech Radar 2024

Les technologies qui  
façonneront le futur

Capgemini  invent



# Sommaire

<b>L'ÈRE DE LA TECHNOLOGIE</b> .....	<b>3</b>
<b>PRINCIPES ET MÉTHODES</b> .....	<b>4</b>
<b>TECH RADAR</b> .....	<b>8</b>
<b>DOMAINES TECHNOLOGIQUES</b> .....	<b>10</b>
(Gen)AI & computer vision .....	10
Advanced connectivity .....	12
Chipset & semiconductors .....	14
Climate tech .....	16
Cloud & edge .....	18
Engineering tech .....	20
Decentralized tech .....	22
Immersive tech .....	24
Next-gen computing .....	26
Tech for digital trust .....	28
<b>UN POINT DE DÉPART</b> .....	<b>30</b>

# L'ère de la technologie

L'irruption fracassante de ChatGPT en novembre 2022 a brutalement ouvert les yeux des décideurs sur l'extraordinaire potentiel des nouvelles technologies. Soudain, ce qui était encore inimaginable la veille devenait possible le lendemain. Ce qui jusque-là aurait pris des semaines devenait réalisable en quelques secondes et, d'un jour à l'autre, un gouffre pouvait se creuser entre ceux qui disposaient de ces capacités et les autres. Avant cela, la pandémie de Covid-19 avait été un premier révélateur en montrant de façon saisissante combien, face à l'imprévu, la technologie était devenue vitale à la continuité d'activité et à la résilience.

Ces deux événements rapprochés ont fait basculer les entreprises dans une nouvelle ère. Désormais, **la technologie** n'est plus perçue comme un outil indispensable mais subordonné aux décisions business ; **elle est le moteur principal de ces décisions, leur pierre angulaire.** Les dirigeants ont compris que les réussites ou les échecs à venir dépendront de leur capacité, ou non, à la mettre en œuvre. Ils mesurent les risques et les opportunités immenses qu'elle représente. Ils ont conscience de ses conséquences potentielles, positives comme négatives, au-delà de l'entreprise, et de la responsabilité qui en découle. Ils savent, enfin, qu'aller de l'avant n'est plus une question de choix : c'est une question de survie. À cet égard, les chiffres [l'étude annuelle de Capgemini sur les priorités d'investissement pour les entreprises en 2024](#), présentés à l'occasion du Forum économique mondial de Davos en janvier 2024, sont éloquentes : **83 % des décideurs prévoient d'augmenter leurs investissements dans la technologie et le numérique dans les 12 à 18 prochains mois. Un an plus tôt, ils n'étaient que 39 %.**

La technologie s'impose donc comme une évidente obligation. Mais quelle technologie ? Pour quoi faire ? Avec quels impacts ? Et quel degré de priorité ? Pour les entreprises et les décideurs, le défi est de parvenir à s'orienter dans un univers foisonnant, complexe, où l'innovation est permanente et les promesses parfois mirobolantes. De même qu'il leur faut une solide culture financière ou juridique pour guider leur réflexion, ils doivent à présent posséder un bagage équivalent concernant la technologie pour l'intégrer convenablement à leurs décisions et investir à bon escient.

Avec ce Tech Radar, nous souhaitons fournir aux décideurs, CxO et responsables d'organisations **le guide et la boussole de l'univers technologique dont ils ont désormais besoin pour naviguer dans**

**l'univers de la technologie.** Ce document, ainsi que les contenus et les échanges qui le prolongeront, visent à leur donner la hauteur et la clarté de vue nécessaires pour orienter leurs choix avec le juste niveau de précision technique.

Pour trouver cet équilibre, et créer un contenu à la fois pratique et rigoureux, nous nous sommes appuyés sur notre double expertise business et technologique, enrichie de toute l'expérience du Groupe Capgemini puisque ce radar s'adosse au [TechnoVision Capgemini](#) rapport sur les tendances technologiques majeures, publié annuellement. Nous avons sélectionné **les 50 technologies qui, selon nous, joueront un rôle déterminant pour répondre aux grands enjeux d'aujourd'hui et de demain.** Nous les présentons d'une façon accessible, classées par grandes thématiques, et, surtout, nous avons évalué leur maturité, leur potentiel d'impact positif pour les personnes, les objets et l'environnement, et les conditions de confiance dans lesquelles elles doivent être déployées pour porter tous leurs fruits.

Cette analyse, ancrée dans la réalité de l'adoption, vise à **donner aux dirigeants des clés objectives pour leur permettre de s'orienter, de donner la priorité aux technologies les plus sûrement créatrices de valeur, et de se préparer aux changements à venir.** C'est aussi, en ce qui nous concerne, le symbole d'une ère où la technologie n'est plus seulement une affaire de spécialistes, mais où le rôle des spécialistes est d'en faire l'affaire de tous.





# Principes et méthodes

Un concentré d'expertise dans un format résolument pratique

Notre ambition, en créant ce Tech Radar, est d'offrir aux décideurs un outil de veille pratique, accessible et évolutif afin de les aider à naviguer dans le paysage technologique actuel.

Pour cela, nous avons constitué une communauté de spécialistes désireux de partager leurs connaissances, leurs analyses et leurs convictions que nous avons nommés Tech Hero. Chacun dans leur domaine, nos Tech Heroes ont sélectionné les technologies qui leur semblent devoir jouer un rôle déterminant dans le futur. Au total, ce sont ainsi une cinquantaine d'objets technologiques, répartis en 10 domaines, qui ont été retenus : un nombre suffisamment élevé pour balayer entièrement le spectre de l'innovation, mais suffisamment restreint pour aller à l'essentiel et rester manipulable.

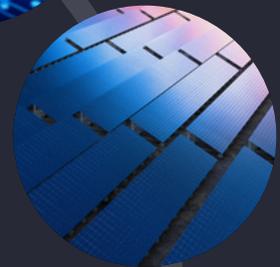
(Gen)AI &  
Computer Vision



Advanced  
Connectivity



Climate Tech



# LES 10 DOMAINES TECHNOLOGIQUES

Découvrez davantage  
sur chaque domaine  
en cliquant sur  
le visuel associé

Cloud & Edge



Engineering Tech



Decentralized Tech

Engineering Tech

Tech for Digital Trust



Chipset &  
Semiconductor



Next-Gen  
Computing



Immersive Tech



Pour obtenir un document synthétique, qui permette d’embrasser rapidement l’état des technologies, nous avons établi une grille d’analyse systématique selon deux axes : la maturité et l’impact.

## L’horizon de maturité

**Avant d’investir dans une technologie, il convient de savoir si elle est prête à être employée comme on l’envisage et si ses promesses ont déjà été validées sur le terrain. Notre indicateur de maturité reflète à la fois la maturité de la technologie – stabilité, interopérabilité, sécurité, richesse fonctionnelle... –, la maîtrise qu’en ont ceux qui la développent, la vendent et la mettent en œuvre, et enfin l’état de son adoption par les organisations utilisatrices. Il comporte trois niveaux :**

- **Now** : la technologie est mise en œuvre et déployée, et elle crée dès à présent des bénéfices significatifs. Elle est techniquement au point, largement répandue, et elle transforme d’ores et déjà certains métiers ou secteurs d’activité.
- **New** : la technologie n’a donné lieu qu’à un petit nombre de projets, d’une portée généralement limitée (pilotes, MVP...), ou bien restreints à des cas d’usage ou des secteurs particuliers. Elle n’est pas diffusée à grande échelle et les spécialistes sont encore peu nombreux, mais son adoption progresse car son potentiel est évident.
- **Next** : la technologie est encore au stade du développement ou des projets expérimentaux (POC...). Elle n’est pas prête pour un déploiement opérationnel, mais les possibilités immenses qu’elle laisse entrevoir justifient de s’y intéresser dès à présent.

## Le framework d’impact positif

Correctement choisies et mises en œuvre, les nouvelles technologies peuvent avoir des conséquences bénéfiques pour l’environnement (Planet), pour les personnes et les groupes sociaux (People), et pour les objets et les systèmes du monde physique (Products). Lorsqu’ils engagent un projet technologique, les décideurs sont désormais sensibles à cette exigence, et cherchent à maximiser ces bénéfices en plus d’atteindre leurs objectifs métiers et financiers traditionnels.

**Cependant, ils ne disposent aujourd’hui que de trop rares éléments pour éclairer leurs choix de ce point de vue. C’est pourquoi nous avons évalué le potentiel d’impact positif des technologies émergentes sur les trois dimensions où s’expriment la responsabilité et l’engagement des entreprises :**

**PLANET** La technologie a des conséquences sur l’environnement. Elle peut affecter positivement le climat, les ressources naturelles, les écosystèmes, la biodiversité, la qualité de l’air, de l’eau ou des sols. On doit donc s’interroger sur l’opportunité que représente chaque technologie pour améliorer la dépense énergétique, réduire l’empreinte carbone, préserver les milieux naturels...

**PEOPLE** La technologie a des conséquences sur les personnes et les groupes sociaux. Elle peut affecter positivement la culture, l’économie, la politique, l’éducation, la cohésion sociale, les valeurs ou les comportements individuels... On doit donc s’interroger sur son utilité, sur son accessibilité, sur son influence culturelle et sociale, sur les progrès qu’elle apporte en matière de bien-être, de santé, de sécurité, d’éthique, de justice...

**THINGS** La technologie a des conséquences sur les objets et les systèmes du monde matériel. Elle peut affecter positivement leur design, leurs fonctionnalités, leur fabrication, leurs performances, leur sécurité, ou encore l’expérience proposée. On doit donc s’interroger sur sa capacité à rendre les objets plus sûrs, plus efficaces, plus durables, à étendre ou réinventer leurs usages...

Pour chacun de ces domaines, nous avons ainsi élaboré une liste d'une dizaine de questions (« La technologie est-elle économe en énergie ? », « La technologie est-elle accessible à tous ? », « La technologie permet-elle de prolonger la durée de vie des objets ? » ...) avec des réponses s'échelonnant chaque fois de 0 à 3 :

- 0 : Non, pas du tout, jamais.
- 1 : Oui, mais très rarement ou de façon peu évidente.
- 2 : Oui, occasionnellement, dans certains cas d'usage.
- 3 : Oui, dans la plupart des cas d'usage ou les plus courants.

En passant chaque technologie au crible de ce questionnaire, nos Tech Heroes ont ainsi déterminé une note globale sur les trois axes considérés. Ceci permet d'avoir une idée de son potentiel d'impact positif en un seul coup d'œil au travers d'un score synthétique, explicable et évolutif, tout en ayant la possibilité de challenger, faire évoluer ou personnaliser cette grille d'analyse.

## Comment utiliser ce radar ? une base de réflexion et de discussion

Ce Tech Radar 2024, qui présente les 50 technologies retenues et analysées par nos Tech Heroes, constituera un point de référence puisque la méthodologie mise en place permettra d'actualiser de façon régulière la liste des technologies ainsi que leurs notations pour tenir compte des innovations et des évolutions du marché.

Pour approfondir certains sujets, aller plus loin dans la compréhension et l'analyse, et rester au plus près de l'actualité, ce document sera suivi de contenus complémentaires – comme des podcasts, des vidéos ou des articles – qui seront plus focalisés, par exemple, sur certains enjeux technologiques ou métiers, ou sur des évolutions majeures. Notre ambition à travers ces prises de parole est avant tout de stimuler et de prolonger la conversation autour des transformations technologiques actuelles.

Pour les dirigeants, ce Tech Radar est en effet une base de réflexion, au travers d'une information concise et éclairée, mais ce doit être aussi une base de discussion avec vos/nos experts et, plus largement, avec toute une communauté qui pourra se rassembler autour de ce travail. Pour cela nous recommandons de l'utiliser comme un point de départ pour construire votre propre radar à l'échelle de l'entreprise, d'une business unit, d'une ligne produit ou autre. Il s'agira alors, d'une part, de sélectionner les technologies pertinentes, de supprimer celles qui le sont moins et probablement d'en ajouter certaines relatives au secteur d'activité ou au domaine ciblé et d'autre part d'identifier le niveau de maturité propre à l'organisation afin de déterminer là où les efforts doivent être portés.

En complément, nous recommandons d'ajouter une dimension confiance et responsabilité. En effet, quelle qu'elle soit, une technologie n'est pas bénéfique ou vertueuse en soi. Ses retombées positives dépendent très largement des conditions et du contexte de sa mise en œuvre, en particulier des garde-fous dont on aura pris soin de l'encadrer et de la confiance qu'elle saura inspirer aux utilisateurs visés.

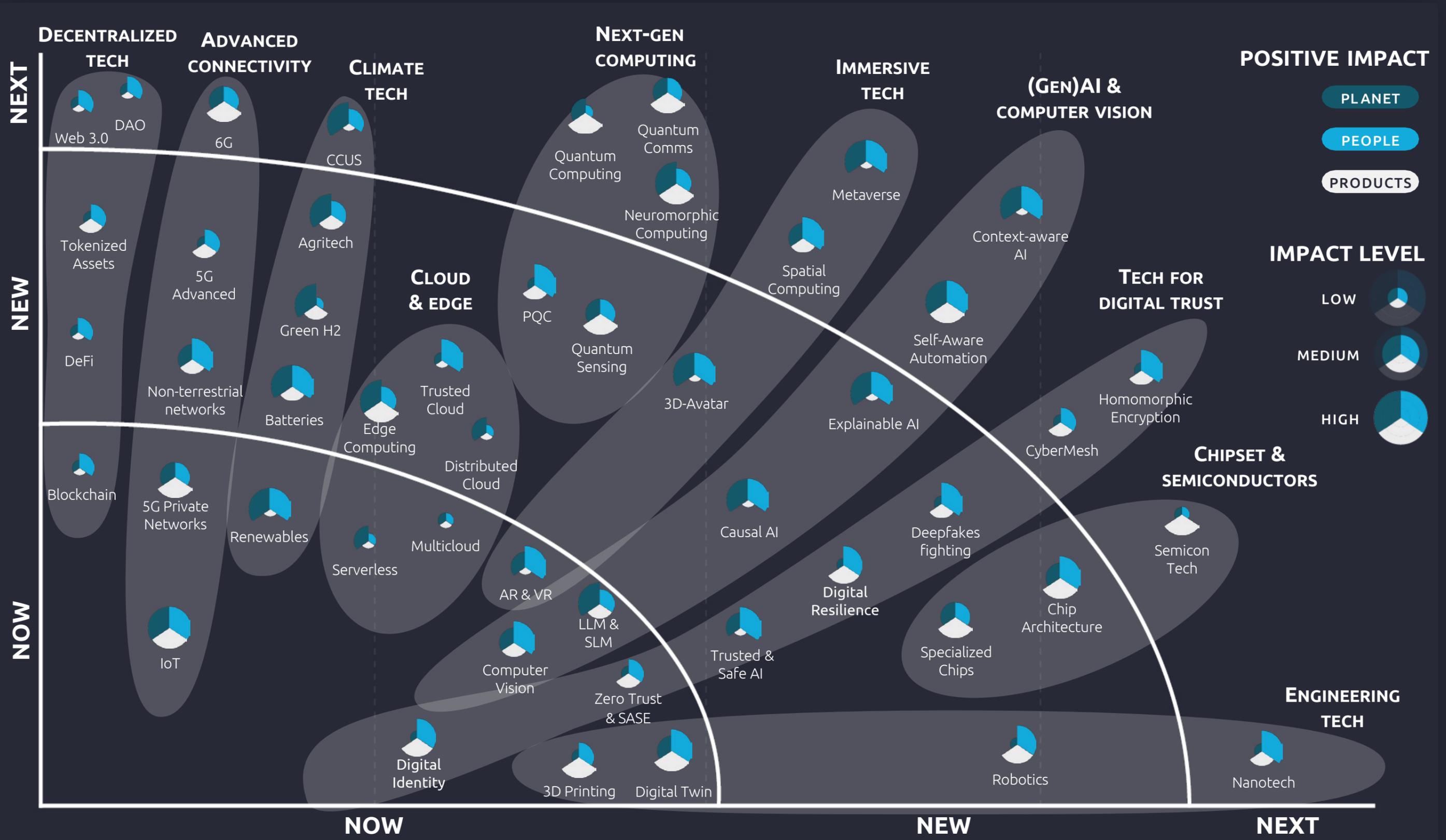
**Pour cette raison, nous proposons de poser un cadre d'interrogation qualitatif. Ceci permet de tenir compte des circonstances et de juger des diverses précautions à prendre en amont, et autour, de chaque cas d'usage :**

- **Cybersécurité :** existe-t-il des pratiques et des solutions de cybersécurité connues pour cette technologie ?
- **Résilience :** cette technologie est-elle capable de fonctionner dans des conditions complexes et inattendues ?
- **Conformité et lutte contre la fraude :** dans quel cadre législatif et réglementaire s'inscrivent l'emploi et les usages de cette technologie ?
- **Vie privée :** cette technologie menace-t-elle la vie privée, ou bien peut-elle la protéger ?
- **Éthique :** certains cas d'usage de cette technologie peuvent-ils contrevenir à l'éthique ou à la morale ? la technologie est-elle transparente ?
- **Géopolitique :** cette technologie peut-elle être impactée par des mouvements géopolitiques ? a-t-on les moyens de les anticiper ?

Alors que la technologie s'apprête à façonner notre futur, il est capital que nous nous nourrissions tous de l'expérience et de l'expertise de chacun pour faire les bons choix en toute connaissance de cause.

# Tech Radar

Parcourez le Tech Radar et cliquez sur la technologie souhaitée pour la découvrir en détails.



# (Gen)AI & computer vision

Si l'intelligence artificielle (IA) a déjà commencé à réinventer de nombreux aspects de notre vie, la vision artificielle (Computer Vision) et l'IA générative poussent cette révolution encore plus loin. En permettant aux machines de comprendre le monde qui les entoure et d'interagir avec lui de manière plus intelligente et plus autonome, ces technologies les rapprochent peu à peu des aptitudes humaines.

En particulier, l'IA générative est la technologie dont l'adoption a été la plus rapide de tous les temps. C'est une forme d'intelligence artificielle qui permet d'explorer, comprendre et créer des textes, des images, des sons ou de la vidéo. Elle peut être utilisée pour aider la prise de décision, stimuler la créativité, accroître la productivité et la valeur ajoutée, et personnaliser les produits et les services. Cependant, l'IA générative est susceptible de reproduire les biais présents dans les données sur lesquelles elle a été entraînée, de commettre des erreurs factuelles (hallucination), et de les répandre (toxicité). Il est donc essentiel de la mettre en œuvre de manière responsable, éthique et contrôlée, en exerçant toujours son sens critique.

Voir ce domaine technologique sur le **Tech-Radar**

## Computer Vision (NOW)

La Computer Vision est une technologie qui utilise des algorithmes pour permettre aux machines de comprendre et d'interpréter des images et des vidéos. Elle peut être utilisée pour la reconnaissance d'objets, la détection de mouvements, la reconstruction 3D et la surveillance. Elle joue un rôle clé dans de nombreuses applications, notamment dans la sécurité, la santé, l'automobile, la robotique et les jeux. Elle peut également être utilisée pour améliorer l'expérience utilisateur en permettant aux machines de percevoir leur environnement et d'y répondre de façon appropriée. Cette technologie, qui séduit de plus en plus le secteur public, peut aussi être utilisée pour la gestion de problématiques environnementales, par exemple pour automatiser la détection de zones victimes de déforestation ou souffrant de la sécheresse. La plateforme *Global Forest Watch (GFW)*<sup>1</sup> utilise ainsi des images satellites et l'apprentissage automatique pour détecter

la déforestation en quasi temps réel. Elle transmet ensuite des alertes et des données à jour aux organisations qui luttent contre la déforestation.

## LLM & SLM (NOW)

Les LLM (Large Language Models) dits « Fit for Purpose » et les petits modèles de langage (Small Language Models, SLM) sont deux approches ciblées du domaine de l'IA Générative. Contrairement aux grands modèles génériques à vocation universelle, les LLM « Fit for Purpose » sont taillés pour répondre précisément aux besoins de certaines applications et/ou de certains secteurs. Dans la même logique, les SLM sont élaborés pour des tâches spécifiques, avec une empreinte réduite. OpenAI a notamment opté pour des SLM pour son application Whisper, un puissant modèle de reconnaissance vocale qui permet de transcrire la parole en texte en temps réel et de générer des sous-titres pour les vidéos, ou encore pour DALL-E 2, qui génère

1 - Global Forest Watch (GFW) : <https://www.globalforestwatch.org/>

des images réalistes à partir de descriptions textuelles. Bien que d'une portée plus limitée que les LLM généralistes, ces modèles excellent dans les tâches qui leur sont assignées, offrant à la fois efficacité accrue, latence réduite et moindre consommation de ressources. Ceci montre l'importance de choisir la solution la plus appropriée pour chaque application entre la puissance d'une grande architecture et l'efficacité d'un modèle plus ciblé.

### Causal AI (NEW)

L'IA causale est une branche de l'IA qui vise à comprendre les relations de cause à effet entre les variables, là où l'IA traditionnelle se contente de simples corrélations. Elle permet de savoir comment les modèles d'IA prennent leurs décisions, ce qui contribue à renforcer la confiance des utilisateurs dans les systèmes d'IA, à réduire les biais et à améliorer l'équité. L'IA causale est aussi d'une grande utilité pour la prise de décision, la planification stratégique et la prédiction. Elle pourrait ainsi aider à prédire l'impact d'une politique ou encore les effets d'un médicament. Par exemple, le projet *CausalPath*<sup>2</sup>, mené par des chercheurs de l'Université de Californie à San Francisco et de l'Université de Stanford, utilise des modèles d'IA causale pour analyser les données génomiques, protéomiques et phénotypiques afin d'identifier les meilleures cibles thérapeutiques et prédire les interactions entre médicaments.

### Explainable AI (NEW)

En réponse à la complexité des algorithmes d'apprentissage profond, l'IA explicable est un domaine émergent de l'intelligence artificielle qui vise à rendre les systèmes d'IA plus transparents et plus compréhensibles pour les utilisateurs. En s'attachant à expliciter leur raisonnement, elle entend renforcer la confiance et favoriser l'adoption de l'IA dans des domaines sensibles tels que la santé, la finance et la justice. Par exemple, *SHAP (SHapley Additive Explanations)*<sup>3</sup> est une méthode d'explication qui permet de comprendre les prédictions d'un modèle d'apprentissage automatique. SHAP calcule l'importance de chaque caractéristique dans une prédiction et présente ses résultats sous forme de diagrammes en cascade,

de graphiques ou encore d'explications locales. En insistant sur la clarté, l'IA explicable aspire à concilier la puissance des modèles complexes avec le besoin de compréhension nécessaire à l'acceptation sociale.

### Self-aware Automation (NEXT)

L'autonomie et l'automatisation auto-consciente (Self-aware Automation) sont deux technologies de rupture qui vont révolutionner la façon dont les machines interagissent avec leur environnement. Dans le cas de l'autonomie, les machines sont capables de prendre des décisions seules et d'exécuter des tâches sans intervention humaine, favorisant ainsi l'efficacité et l'adaptabilité. La Self-aware Automation va encore plus loin en leur conférant une forme de conscience d'elles-mêmes qui leur permet de percevoir leur propre état et de s'adapter de façon dynamique au contexte. Dans le cadre du projet Waymo de Google, elle est utilisée pour permettre aux véhicules autonomes de gérer les situations imprévues, planifier leur trajet et interagir avec les autres usagers de la route. Depuis les véhicules autonomes jusqu'aux systèmes intelligents d'optimisation de consommation d'énergie, ces deux concepts auront de nombreuses et profondes implications, et redéfiniront le spectre de la collaboration homme-machine, ouvrant la voie à des innovations transformatrices.

### Context-aware AI (NEXT)

L'IA contextuelle est capable de comprendre son environnement physique et/ou humain, et de s'y adapter. Elle utilise des données concernant les individus, les lieux et les objets qui l'entourent pour caractériser sa situation et prévoir son évolution. Cette technologie pourra révolutionner l'expérience utilisateur en permettant aux machines d'avoir un comportement personnalisé. Elle pourra également fournir des informations plus précises et plus pertinentes pour améliorer la prise de décision. Aujourd'hui, les assistants virtuels les plus connus, comme Siri et Alexa, utilisent l'IA contextuelle pour comprendre les commandes des utilisateurs et effectuer les tâches demandées. Le développement de l'IA contextuelle est une étape importante vers des systèmes d'IA plus intelligents et plus fiables.

2 - CausalPath : <https://causalpath.cs.umb.edu/>

3 - SHAP (SHapley Additive Explanations) : <https://github.com/shap/shap>

# Advanced connectivity

**Socle incontournable de l'ère numérique, la connectivité transcende les frontières physiques et numériques. En permettant l'échange instantané d'informations, elle aide à mieux communiquer, à améliorer la performance des opérations industrielles, à enrichir les expériences, à faciliter l'accès au savoir. L'accélération du numérique et le règne de la donnée font de la connectivité un défi central. Pour devenir plus intelligentes, les organisations ont besoin de solutions de connectivité avancée pour collecter, partager et traiter des volumes exponentiels de données en temps réel, à l'échelle, avec la vitesse et la sécurité adéquates, quelles que soient les sources et leur localisation.**

**Pour répondre à ces défis, les technologies de connectivité avancée – de l'IoT au WiFi et à la 5G, des réseaux privés au NTN, demain à la 6G – évoluent continuellement, offrant des opportunités de rupture, d'innovation et d'accélération du développement de l'industrie intelligente.**

Voir ce domaine technologique sur le **Tech-Radar**

## Internet of Things (NOW)

L'IoT (Internet des objets) recouvre un ensemble de systèmes et de technologies permettant de connecter des objets physiques à Internet : capteurs, caméras, véhicules, appareils domestiques, machines industrielles... Ces objets interconnectés recueillent, analysent et transmettent des données, ouvrant la voie à une multitude d'applications innovantes dans des secteurs tels que la santé, la domotique, l'industrie et les transports. L'IoT permet d'améliorer l'efficacité opérationnelle, d'optimiser les décisions et de mettre en place des solutions plus intelligentes. Particulièrement intéressantes, les technologies IoT bas débit basse consommation (NB-IoT, LoRa, Sigfox) sont aujourd'hui matures et présentent des caractéristiques et des cas d'usage complémentaires des autres technologies du domaine Advanced Connectivity.

## 5G Private Networks (NOW)

Ports, aéroports, centres logistiques, usines, mines... Pour répondre à leurs enjeux critiques

de connectivité, de plus en plus de sites réfléchissent à déployer leur propre réseau privé 4G/5G, dont ils pourront maîtriser la couverture, la qualité de service et l'usage. Le marché se développe, porté par un accès facilité aux fréquences privées dans de nombreux pays, une offre dynamique qui stimule l'innovation et tire les prix à la baisse, et une maturité accrue de la technologie 5G et des terminaux. Nombre d'entreprises sont déjà équipées en production (Airbus<sup>5</sup>, Arcelor, BASF, aéroport de Francfort, Tesla<sup>6</sup>...) et envisagent de passer à l'échelle avec des mises en œuvre multi-sites et multi-pays.

## 5G Advanced (NEW)

La 5G publique, déployée par les opérateurs mobiles, couvre aujourd'hui plus de la moitié de la population française. Si elle n'a pas encore révolutionné les usages des personnes et des entreprises, c'est qu'il ne s'agit jusqu'ici que de 5G « non standalone », basée sur un cœur de réseau 4G avec des fréquences supplémentaires pour plus de débit. Déjà déployée par une cinquantaine d'opérateurs

5 - Airbus : <https://5gobservatory.eu/airbus-expands-5g-private-network-to-new-european-countries/>

6 - Tesla : <https://www.fierce-network.com/wireless/tesla-goes-private-5g-its-factory-berlin>

dans le monde et prévue en France en 2024, la 5G Advanced, ou 5G standalone, est bien plus intéressante. Grâce à son cœur de réseau 5G, elle apporte d'importantes fonctionnalités nouvelles, dont le « slicing », soit la capacité à découper virtuellement le réseau pour proposer et garantir une qualité de service spécifique pour certaines applications. Ceci ouvre la voie à de nouveaux services associant un usage, une application, un équipement et une connectivité adaptée : par exemple, une lunette de réalité augmentée et une slice de réseau à faible latence, ou bien une caméra mobile et une slice lui garantissant un débit minimum. C'est une vraie révolution et un enjeu à la fois de monétisation et de transformation pour les opérateurs télécoms.

### Non-Terrestrial Networks (NEW)

Le NTN (Non-Terrestrial Network) est un nouveau paradigme de convergence entre les réseaux cellulaires terrestres et les réseaux satellitaires. Le déploiement de nouvelles constellations en orbite basse (LEO), comme Starlink, OneWeb, demain Kuiper d'Amazon et d'autres encore (AST SpaceMobile, Sateliot...), apporte des possibilités nouvelles en matière de connectivité par satellite : des débits plus élevés et une latence plus faible, avec une promesse de couverture globale. Plusieurs acteurs développent des solutions NTN « direct to device » pour connecter des équipements non modifiés – smartphones ou capteurs IoT – directement aux antennes radio embarquées dans les satellites. Ceci permettra aussi de couvrir des zones non, ou mal, desservies par les réseaux terrestres actuels (forêt, montagne, désert, îles, océan...). *Depuis un an, les initiatives se multiplient*<sup>7</sup> et démontrent la viabilité technologique de ces solutions. La course aux investissements et au déploiement est en marche ; son ampleur dépendra de la capacité des acteurs à définir un modèle commercial viable.

### 6G (NEXT)

La future génération de réseau sans fil, la 6G, sera disponible durant la décennie 2030<sup>8</sup>. Les travaux de R&D, qui ont commencé, visent à ce stade à définir les exigences techniques et les caractéristiques clés. Plus qu'un surcroît de vitesse, la 6G promet des avancées significatives avec notamment une intégration plus poussée de l'intelligence artificielle, des capacités de communication holographiques et une connectivité omniprésente grâce à l'intégration native des différents réseaux, notamment satellitaires, et leur interopérabilité renforcée.

7 - <https://spectrum.ieee.org/satellite-cellphone-starlink>

8 - <https://www.lifewire.com/6g-wireless-4685524>



# Chipset & semiconductors

Omniprésents dans les appareils électroniques, les circuits intégrés sont d'une importance vitale pour le progrès technologique, l'innovation industrielle et l'avancement de la société, et ce d'autant plus avec l'essor actuel de l'IA et de l'IoT. Très concentré, le secteur des semi-conducteurs est confronté à de nombreux défis : course à la production au sein d'une supply chain complexe et globalisée, poursuite incessante de la miniaturisation, nécessité d'investir massivement dans les fonderies et la R&D pour spécialiser les chipsets, concevoir de nouvelles architectures, trouver des matériaux permettant d'aller au-delà du silicium, ou encore améliorer les méthodes de lithographie. Cette industrie est si critique pour la souveraineté nationale que plusieurs pays ont pris des mesures afin de relocaliser la fabrication de puces (*CHIPS and Science Act*<sup>9</sup> aux États-Unis, *Chips Act*<sup>10</sup> de l'Union européenne).

Voir ce domaine technologique sur le Tech-Radar

## Specialized Chips (NEW)



On assiste ces dernières années à une multiplication des puces spécialisées, optimisées pour un usage spécifique. Outre les CPU (Central Processing Units), incontournables, on a ainsi :

- **les GPU** (Graphics Processing Units), conçues pour gérer des tâches graphiques et de traitement parallèle complexes comme le rendu de graphiques 3D, l'encodage vidéo et les simulations scientifiques ;
- **les TPU (Tensor Processing Units)**, dédiées aux applications d'apprentissage profond et optimisées pour la multiplication matricielle et d'autres opérations courantes dans les réseaux neuronaux ;
- **les FPGA (Field-Programmable Gate Arrays)** et d'autres accélérateurs spécialisés tels que les DSP (Digital Signal Processors) pour le traitement audio et vidéo, le traitement d'images et les télécommunications.

La demande est particulièrement forte pour des chipsets optimisés pour l'IA, à l'image du système *Cerebras CS-2*, basé sur la méga-puce

*Wafer-Scale Engine (WSE-2)*<sup>11</sup>, ou du GPU Nvidia A100 Tensor Core, tous deux conçus pour l'IA générative et les applications scientifiques. Cette spécialisation va se poursuivre car elle est cruciale pour maximiser les performances d'applications de plus en plus exigeantes, de l'IA aux jeux vidéo en passant par les systèmes embarqués.

## Chip Architecture (NEW)



Il existe différentes architectures de chipset – Chiplet, ARM et RISC-V –, qui se distinguent par leurs caractéristiques, mais aussi par leurs utilisations et leur maturité. Nouvelle approche de conception modulaire, l'architecture Chiplet consiste à créer de petites puces autonomes qui peuvent se combiner pour créer des circuits intégrés plus grands. Les avantages en sont une amélioration des performances, une réduction de la consommation d'énergie et une plus grande souplesse de conception. Les microarchitectures Zen d'AMD ou Meteor Lake d'Intel en sont des exemples. ARM (Advanced RISC Machines) est une architecture mature, largement utilisée pour les processeurs informatiques. Son faible coût, sa consommation énergétique limitée et son dégagement de chaleur réduit la rendent

9 - CHIPS and Science Act : <https://new.nsf.gov/chips>

10 - Chips Act : <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-chips-act>

11 - <https://www.zdnet.com/article/ai-startup-cerebras-unveils-the-largest-chip-yet-for-generative-ai/>

idéale pour les appareils légers, nomades et alimentés par batterie, comme les smartphones et les ordinateurs portables. *Les puces ARM équipent ainsi près de 60 % des appareils mobiles dans le monde*<sup>12</sup>.

RISC-V est une architecture open source, soutenue par un écosystème actif, que l'on peut utiliser pour développer des processeurs ad hoc pour toutes sortes d'applications, des systèmes embarqués aux supercalculateurs. Par exemple, *Alibaba T-Head Semiconductor a lancé le processeur RISC-V à haut rendement XuanTie C908*<sup>13</sup>, adapté à de nombreux usages tels que les interactions intelligentes, les terminaux multimédias, les réalités virtuelles et augmentées, et la communication sans fil.

### Semicon Tech (NEXT)

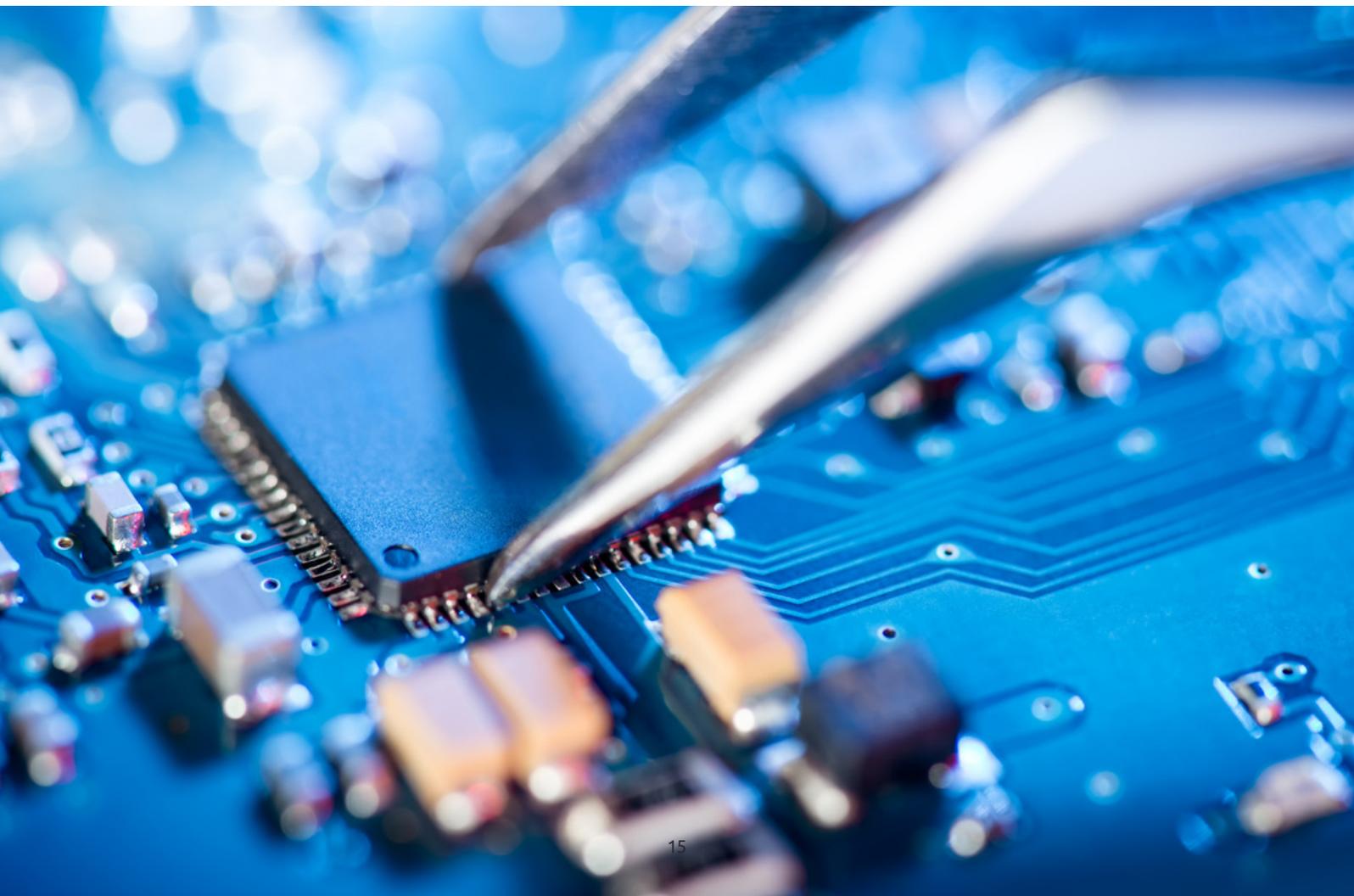
Afin de répondre à la demande de chipsets toujours plus petits, sobres et puissants, l'industrie des semi-conducteurs cherche à dépasser les limites physiques des technologies actuelles. Les progrès en matière de lithographie, tels que l'ultraviolet extrême

(EUV), permettent de produire des transistors plus petits, plus denses et plus puissants. *La première production en série utilisant le High-NA-EUV, le dernier cri en la matière, est prévue pour 2025*<sup>14</sup>. On cherche par ailleurs des alternatives technologiques au standard historique CMOS qui atteint lui aussi ses limites, comme la logique MESO, basée sur le spin des électrons, qui promet des gains spectaculaires de performances. L'industrie étudie également de nouveaux matériaux susceptibles de remplacer le silicium comme le graphène, le nitrure de gallium (GaN), les semi-conducteurs à deux dimensions (2DLM) et le diamant. La généralisation de ces nouveaux matériaux nécessitera cependant encore d'importants travaux de R&D pour régler les questions de coût, de fabrication et d'intégration. Enfin, l'empilement de couches de matériau (intégration 3D) est une voie importante et largement explorée pour tenir le rythme de la loi de Moore. Invisibles des utilisateurs, ces avancées sont pourtant cruciales pour poursuivre l'innovation en électronique et en informatique.

12 - <https://www.strategyzer.com/library/arm-business-model>

13 - <https://riscv.org/blog/2022/11/xuantie-c908-high-performance-risc-v-processor-catered-to-aiot-industry-chang-liu-alibaba-cloud/>

14 - <https://www.anandtech.com/show/21264/asml-to-ship-multiple-highna-tools-in-2025-expands-production-capacities>



# Climate tech

Les climate techs recouvrent l'ensemble des technologies innovantes visant à mesurer le changement climatique, à l'atténuer ou à s'y adapter. L'hydrogène décarboné, les énergies renouvelables, les batteries, la séquestration du CO2 et les AgriTechs font partie des solutions à très fort potentiel pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, notamment dans des secteurs dépourvus de solutions à court terme comme l'industrie lourde. Certaines de ces technologies ont déjà démontré leur valeur environnementale, sociale et économique, changeant radicalement certains modèles d'affaires ou modes de consommation, ou répondant à des besoins essentiels tels que l'accès à l'électricité. D'autres doivent encore relever des défis techniques et économiques pour pouvoir passer à l'échelle. Pour les territoires, le déploiement des climate techs représente un enjeu environnemental, mais aussi économique et de souveraineté, qu'il s'agisse d'en maîtriser la fabrication (batteries, électrolyseurs...) ou de décarboner les activités traditionnelles (industrie, agriculture, transports...). Il est donc critique d'accompagner leur développement à bon escient, conjointement à des efforts de sobriété, pour maximiser leurs bénéfices pour la société.

Voir ce domaine technologique sur le **Tech-Radar**

## Renewables (NOW)

Chaque année, la croissance des énergies renouvelables (solaire et éolien essentiellement) dépasse tous les pronostics<sup>15</sup>.

En 2023, la capacité installée a augmenté de 50 %, battant le record d'installation pour la 22e année consécutive, et l'électricité renouvelable devrait dépasser celle produite à partir de charbon d'ici 2025<sup>16</sup>. C'est la preuve qu'en combinant politiques de soutien ambitieuses, progrès technologiques constants et développement des capacités industrielles, les énergies renouvelables peuvent jouer un rôle de premier plan dans la lutte contre le réchauffement climatique. Alors que leur coût a drastiquement baissé (-82 % pour le photovoltaïque depuis 2010)<sup>17</sup>, le secteur devrait poursuivre sa trajectoire d'innovation, avec des avancées attendues en matière de rendement, de recyclabilité et de réduction de l'impact environnemental. Ainsi la France a-t-elle lancé

un appel d'offres afin de développer plusieurs *parcs éoliens flottants de 250 MW*<sup>18</sup> au large de ses côtes, promettant des records de taille pour cette technologie qui n'est aujourd'hui déployée qu'à l'échelle de pilote. Ce projet permettra d'utiliser des innovations majeures en matière d'éolien offshore, tant en ce qui concerne la taille des pâles des éoliennes (plus de 100 m) que de puissance développée (18 MW).

## Green H2 (NEW)

L'hydrogène vert / Green H2, produit à partir d'énergies renouvelables, nourrit de nombreux espoirs pour décarboner les secteurs les plus émissifs comme les transports ou l'industrie lourde. Aujourd'hui, le secteur industriel consomme chaque année 53 Mt d'hydrogène carboné, lequel émet 680 Mt CO2 (AIE, 2022)<sup>19</sup>. Le simple fait de le remplacer par de l'hydrogène vert permettrait de supprimer

15 - <https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Mar/Record-9-point-6-Percentage-Growth-in-Renewables-Achieved-Despite-Energy-Crisis>

16 - <https://www.theguardian.com/environment/2024/jan/11/worlds-renewable-energy-capacity-grew-at-record-pace-in-2023>

17 - <https://www.nrel.gov/news/program/2021/documenting-a-decade-of-cost-declines-for-pv-systems.html>

18 - <https://presse.economie.gouv.fr/le-gouvernement-annonce-le-laureat-du-premier-appel-doffres-eolien-flottant-au-sud-de-la-bretagne/#~:text=Ce%20nouveau%20parc%20est%20la,dans%20l'%C3%A9olien%20flottant.%20%C2%BB>

19 - <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>

500 Mt CO<sub>2</sub> émises par an. À Dunkerque, le projet H2V prévoit d'éviter 420 000 tCO<sub>2</sub>e par an à Arcelor Mittal<sup>20</sup>, soit les émissions de 240 000 voitures, à l'horizon 2029. Techniquement mature, la production d'hydrogène par électrolyse n'est pas compétitive en raison de ses coûts de production élevés. De plus, le prix du carbone sur le marché européen des quotas (EU ETS) ne permet pas aujourd'hui de rendre l'hydrogène vert plus attractif. Malgré cela, plus de 40 gouvernements ont déjà fait part de stratégies de soutien à l'hydrogène, dont l'Union européenne qui vise 100 GW de capacité installée en 2030 contre 228 MW aujourd'hui<sup>21</sup>. En Europe, les perspectives sont favorables pour cette technologie qui bénéficie d'une demande avérée et d'un cadre légal contraignant mais clair.

## Batteries (NEW)



De 2016 à 2022, la demande de batteries a été multipliée par 13 au niveau mondial<sup>22</sup> pour des usages de mobilité comme de stockage stationnaire. Cette tendance devrait se confirmer avec une capacité de stockage globale estimée à 680 GW en 2030 (AIE). Cette croissance est essentiellement tirée par la demande en batteries Li-ion, qui ont suscité 300 Mds \$ d'investissements industriels dans le monde entre 2019 et 2023<sup>23</sup>. Des enjeux technologiques persistent cependant : traçabilité et efficacité de la supply chain, performance et recyclabilité des batteries, disponibilité des matériaux (début 2023, le prix du lithium était six fois supérieur à son cours moyen sur la période 2015-2020) ... L'innovation se tourne donc de plus en plus vers des chimies et des structures de batterie nouvelles (Na-ion, solid state...) qui permettraient de réduire l'impact environnemental et sociétal des matériaux tout en répondant aux besoins. La start-up chinoise Betavolt développe une batterie nucléaire plus petite qu'une pièce de monnaie<sup>24</sup>, qui serait capable de produire une puissance de 100 microwatts durant 50 ans sans aucune recharge grâce à la combinaison du nickel-63 et d'un semi-conducteur diamant.

## AgriTech (NEW)



L'AgriTech englobe toutes les technologies innovantes destinées à améliorer la productivité de l'agriculture tout en la rendant plus soutenable : data et IA, agriculture de précision, robotisation, culture en environnement contrôlé... Portées par la forte croissance du secteur estimée à environ 10 % par an d'ici 2030<sup>25</sup>, des startups émergent tout au long de la chaîne de valeur de l'agriculture, comme les Américains Akorn<sup>26</sup>, qui développent

le « seed coating » pour renforcer la résistance des semences, ou BlueWhite<sup>27</sup>, qui robotise les tracteurs. Si beaucoup de ces technologies doivent encore faire leurs preuves sur les plans environnementaux, sociétaux et économiques, certaines sont particulièrement prometteuses comme l'irrigation de précision associée à l'IA, qui, selon l'Israélien SupPlant<sup>28</sup>, pourrait réduire la consommation d'eau de plus de 30 %. Les AgriTechs sont fortement soutenues par les pouvoirs publics, comme en témoignent les 2,3 Mds d'euros alloués par le plan France 2030<sup>29</sup>, mais le marché reste principalement tiré par l'Amérique du Nord (60 % en 2023).

## CCUS (NEXT)



Essentielle à la décarbonation de l'industrie lourde, la séquestration du carbone ou CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) permettrait, en Europe, une réduction des émissions de 450 MtCO<sub>2</sub>e en 2050<sup>30</sup>, également répartie entre usage et stockage. Cependant, de nombreux écueils demeurent : il faut fiabiliser le processus de capture et son rendement, sécuriser le transport et le stockage, et développer les usages, tout en réduisant drastiquement les coûts. Il existe aujourd'hui plus de 72 projets européens de CCUS, avec une capacité prévisionnelle de 34,1 Mt de CO<sub>2</sub> stockées par an en 2030<sup>31</sup>. Après de nombreuses années de stagnation, les pouvoirs publics renforcent enfin leur soutien : les États-Unis subventionnent le captage de carbone à hauteur de 85\$/t<sup>32</sup> tandis que l'Union Européenne a accordé des aides record en 2023<sup>33</sup>. Ces soutiens doivent toutefois encore se renforcer pour rendre les business models attractifs tandis que les acteurs qui, comme Aster, se positionnent sur le « CCUS as a service » doivent encore faire leurs preuves.

20 - <https://h2v.net/projet/projet-h2v-59/>

21 - <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023PC0161>

22 - <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dac14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>

23 - <https://source.benchmarkminerals.com/article/investment-in-battery-gigafactories-nears-300-billion-since-2019-as-china-extends-battery-dominance>

24 - <https://www.independent.co.uk/tech/nuclear-battery-betavolt-atomic-china-b2476979.html>

25 - <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2024/03/15/2847144/0/en/AgriTech-Market-Expected-to-Reach-US-32-7-Bn-by-2030-Indicates-a-New-Report-by-Fairfield-Market-Research.html>

26 - <https://akorn.tech/our-company/>

27 - <https://www.bluewhite.co/>

28 - <https://www.futurefarming.com/crop-solutions/supplant-raises-us-27-million-for-its-irrigation-platform/>

29 - <https://www.info.gouv.fr/actualite/la-french-agritech-au-service-de-l-innovation-agricole#:~:text=France%202030%20pr%C3%A9voit%20d'investir,alimentation%20saine%2C%20durable%20et%20tra%C3%A7able>

30 - [https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS\\_in\\_clean\\_energy\\_transitions.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/181b48b4-323f-454d-96fb-0bb1889d96a9/CCUS_in_clean_energy_transitions.pdf)

31 - [https://energy.ec.europa.eu/topics/carbon-management-and-fossil-fuels/industrial-carbon-management\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/carbon-management-and-fossil-fuels/industrial-carbon-management_en)

32 - <https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2023/02/16093309/ira-carbon-capture-fact-sheet.pdf>

33 - [https://energy.ec.europa.eu/topics/carbon-management-and-fossil-fuels/industrial-carbon-management\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/carbon-management-and-fossil-fuels/industrial-carbon-management_en)

# Cloud & edge

Au fil des années, le cloud est devenu bien plus qu'un mode de mutualisation de ressources informatiques permettant de réduire les coûts IT et de gagner en flexibilité. Grâce aux investissements massifs des hyperscalers, c'est à présent la matrice incontournable de toutes les innovations numériques et, de surcroît, le moyen de mieux maîtriser leur empreinte carbone, surtout avec l'accélération du traitement des données due à l'IA. L'Edge Computing constitue le pendant décentralisé du modèle originel du cloud public centralisé, lequel se décline désormais en diverses variantes – cloud distribué, cloud de confiance, multicloud, serverless... – qui permettent de répondre à la multiplicité des besoins et des contraintes.

Voir ce domaine technologique sur le **Tech-Radar**

## Multicloud (NOW)

Le multicloud est une stratégie qui consiste à répondre à la diversité de ses besoins en utilisant les services de différents fournisseurs de cloud public, chacun apportant les niveaux de couverture fonctionnelle, de coûts, de performance et de sécurité adéquats. Selon un *récent rapport d'OVHcloud*<sup>34</sup>, 62% des entreprises ont d'ores et déjà recours au multicloud, en s'appuyant notamment sur l'utilisation de conteneurs qui, en regroupant le code et toutes ses dépendances, permettent à une application de fonctionner sur n'importe quel environnement informatique. Conçu par Google et désormais maintenu par la Cloud Native Computing Foundation (CNCF), Kubernetes s'est imposé comme le standard de cette approche. Fournissant une couche cohérente pour le déploiement et la gestion de conteneurs chez différents fournisseurs de cloud, il permet aux développeurs de gérer et de déplacer leurs applications entre différentes infrastructures, et facilite ainsi les stratégies multicloud.

## Serverless (NOW)

Dans le modèle serverless, le fournisseur de cloud se charge lui-même d'allouer au gré des besoins les ressources d'exécution

nécessaires aux applications. Les développeurs n'ont donc pas à se soucier de ces questions d'infrastructure et peuvent se concentrer exclusivement sur la logique fonctionnelle (d'où le terme de « fonction » couramment employé pour désigner ces programmes). Le bénéfice est triple : des développements accélérés, un passage à l'échelle simplifié, et des coûts ramenés au strict minimum puisque ne sont consommées et facturées que les seules ressources indispensables. Désormais mature, cette approche est par exemple très pertinente pour les applications subordonnées à un évènement particulier (systèmes d'alerte, communications périodiques...). Aujourd'hui, l'ensemble des grands fournisseurs de cloud proposent des offres serverless : AWS Lambda, Microsoft Azure Functions, Google Cloud Functions, IBM Cloud Functions...

## Edge Computing (NEW)

L'Edge Computing désigne l'utilisation d'infrastructures décentralisées pour stocker, gérer ou traiter des données localement, au plus près des utilisateurs, ou directement sur le terrain, en dehors d'un data center ou d'un cloud traditionnel. *Le cabinet Gartner estime qu'en 2025, 75 % des données générées*

34 - <https://corporate.ovhcloud.com/en/newsroom/news/ovhcloud-uk-multicloud/>

par les entreprises seront ainsi créées et traitées en dehors de ces grandes infrastructures centralisées<sup>35</sup>. En rapprochant le calcul des sources des données, en périphérie du réseau, l'Edge Computing permet de réduire la latence, d'éviter les transferts superflus et d'améliorer les performances des applications qui exigent des traitements en temps réel (contrôle et supervision, automatismes, réalité augmentée...). Par exemple, dans l'industrie, l'Edge Computing est utilisé pour traiter les données provenant de capteurs installés dans l'usine, ce qui permet de détecter les problèmes en temps réel et d'optimiser les processus de production, ou encore dans le retail pour analyser les données provenant de capteurs installés dans les magasins afin d'optimiser l'agencement de ces derniers et le positionnement des produits, améliorant à la fois l'expérience des clients et les ventes.

### Distributed Cloud (NEW)

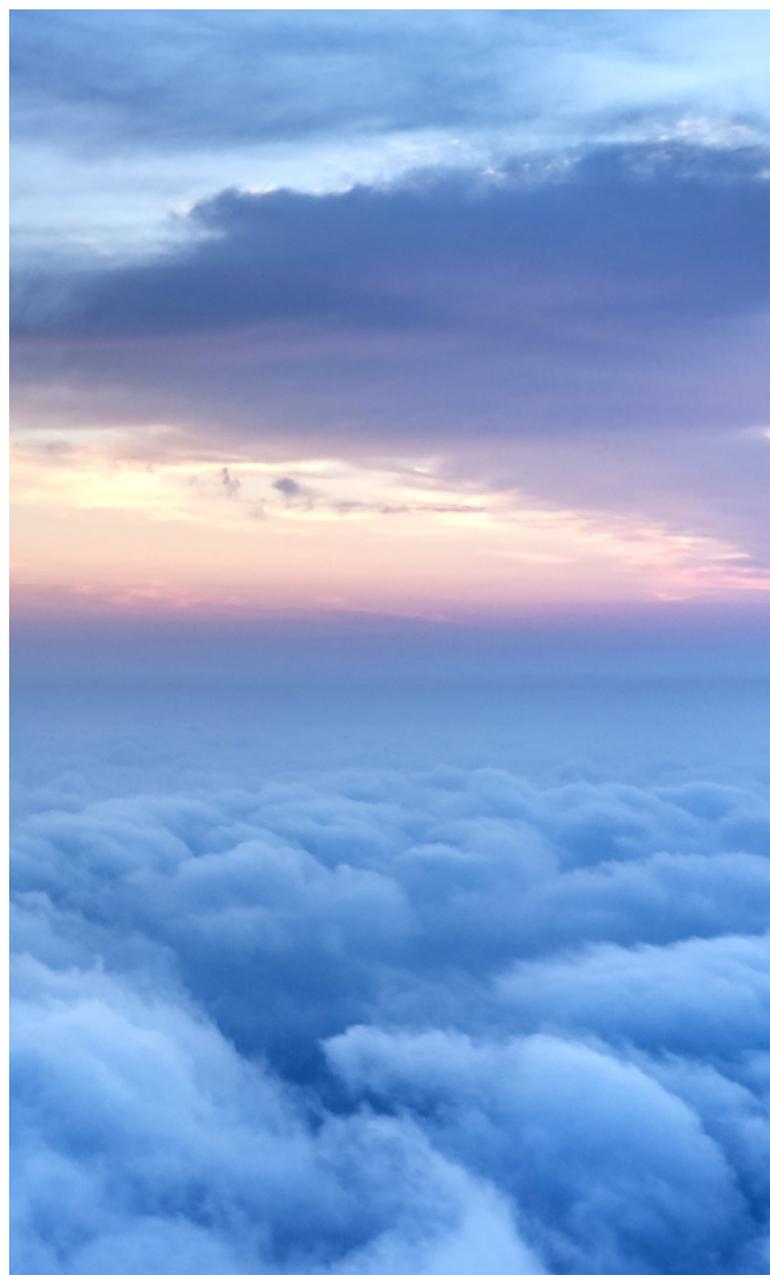
Dans le modèle du cloud distribué, l'infrastructure, les applications et les données se répartissent entre différents emplacements physiques, potentiellement chez le client lui-même. L'exploitation, la gouvernance, les mises à jour et l'évolution des services restent en revanche centralisées et assurées par le fournisseur de cloud public. Cela passe par des solutions matérielles (AWS Outpost, Azure Stack Edge, Google Distributed Cloud) et logicielles (Google Anthos, Azure Arc). Distribuer ainsi les systèmes permet de répondre à des exigences de conformité (localisation des données), de performance (sur le principe de l'Edge Computing) et de sécurité (contrôle des accès physiques) tout en conservant les avantages du cloud public. En levant les contraintes posées par certains sites (usines, par exemple), cette approche, encore émergente, apparaît comme un puissant levier d'adoption du cloud pour de nombreuses entreprises.

### Trusted Cloud (NEW)

Le cloud de confiance désigne des offres de cloud public répondant à des exigences élevées d'un point de vue juridique, technique et/ou opérationnel. Le cloud de confiance garantit notamment la conformité réglementaire ainsi que la confidentialité, la sécurité et dans certains cas la souveraineté des données. En France, cette appellation est attribuée aux services satisfaisant aux critères du référentiel SecNumCloud de l'ANSSI. Il répond notamment

aux besoins du secteur public (conformément à la doctrine « Cloud au centre » de l'État) et des industries sensibles. L'offre est aujourd'hui constituée de solutions de fournisseurs 100 % français, tels qu'OVH et Outscale, et de solutions hybrides, comme Bleu ou S3ns, qui associent des acteurs français et des technologies d'hyperscalers américains. Leur succès dépendra de leur capacité à proposer à la fois un haut niveau de confiance – en particulier en matière de localisation des données et de protection vis-à-vis des lois extraterritoriales – et un catalogue de services rivalisant avec ceux des hyperscalers. En parallèle, ces mêmes hyperscalers ont développé de nouveaux services pour répondre au besoin de souveraineté : AWS European Sovereign Cloud, Google Distributed Cloud air-gapped ou Microsoft Cloud for Sovereignty.

35 - <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/what-edge-computing-means-for-infrastructure-and-operations-leaders>



# Engineering tech

Les avancées technologiques sont indissociables des progrès des techniques de conception et de production industrielles, repoussant sans cesse les limites du possible dans le bureau d'étude comme dans l'usine. Aujourd'hui, la robotique, les jumeaux numériques, l'impression 3D et les nanotechnologies transforment non seulement la manière dont les ingénieurs travaillent, mais aussi les résultats qu'ils peuvent obtenir, ouvrant de nouveaux champs d'innovation dans tous les domaines de l'ingénierie, notamment les génies industriels, mécaniques, chimiques et civils. Permettant d'imaginer et de fabriquer avec une efficacité sans précédent des produits aux fonctionnalités et aux propriétés inédites, ces technologies de pointe sont d'ores et déjà indispensables pour maintenir son avantage concurrentiel et sa compétitivité.

Voir ce domaine technologique sur le **Tech-Radar**

## 3D-Printing (NOW)



L'impression 3D, ou fabrication additive, consiste à créer un objet tridimensionnel à partir de son modèle numérique par superposition progressive de matériaux. Elle permet de produire rapidement des pièces solides et légères, et de créer des géométries complexes, difficiles, voire impossibles, à obtenir par un autre procédé, stimulant ainsi l'innovation. Elle réduit aussi les délais de réalisation et le gaspillage de matière, favorisant le prototypage rapide, la production à la demande et la personnalisation.

Mature, l'impression 3D accuse encore certaines limitations : choix restreint de matériaux, coûts de pré-traitement et de post-traitement élevés, besoin d'équipements et de compétences spécialisés...

Cependant, les progrès sont constants avec une gamme de plus en plus large de matériaux utilisables, un rendement croissant des machines et une rentabilité en hausse du procédé. L'impression 3D s'impose aussi comme un outil essentiel de la R&D industrielle. Récemment, des chercheurs australiens ont ainsi réalisé une avancée majeure en imprimant en 3D *une structure en titane qui serait 50 % plus résistante que l'alliage le plus solide connu aujourd'hui*<sup>36</sup>.

## Digital Twin (NOW)



Un jumeau numérique est une représentation virtuelle d'un objet ou d'un système physique, avec lequel il reste synchronisé via divers capteurs et autres sources de données, possiblement en temps réel. Cette approche est utilisée dans d'innombrables domaines, de l'industrie à la médecine, de la construction à la logistique, pour simuler le comportement du modèle, prédire et optimiser ses performances, ou encore déterminer l'impact d'un éventuel changement. Les ingénieurs peuvent ainsi conduire des campagnes de tests virtuels, plus poussées et plus rapides que sur une série de prototypes réels, ce qui permet d'améliorer la qualité des produits et d'accélérer leur mise sur le marché. Lors de la conception de systèmes dont la sécurité sera primordiale, on peut aussi évaluer les risques, leurs conséquences et anticiper l'efficacité des mesures à prendre. La maintenance prédictive est une autre application répandue des jumeaux numériques, à l'image de Tesla qui anticipe de la sorte les risques de défaillance de ses véhicules. Comme le fait DHL pour ses opérations, on peut aussi réaliser le jumeau numérique de tout un processus pour l'optimiser, identifier ses inefficiences, ou encore réduire les déchets et la consommation d'énergie. À Shanghai,

36 - <https://interestingengineering.com/news/strongest-metamaterial-3d-printed-australi>

un jumeau numérique de la ville entière facilite la gestion et la planification urbaines<sup>37</sup>.

## Robotics (NEW)



Qu'ils prennent l'apparence d'un humain, d'un chien ou d'un ver de terre, les robots transforment déjà le monde. Et ce n'est qu'un début, la prochaine étape consistant à doter ces robots de capacités avancées issues du domaine de l'IA. *La startup Figure AI, avec son cortège d'investisseurs de premier plan*<sup>38</sup> (Jeff Bezos, Microsoft, OpenAI, Intel...), et Tesla, qui a récemment dévoilé son robot Optimus Gen 2, font la course en tête. Cependant, la robotique n'est pas seulement un sujet fascinant pour les ingénieurs et les passionnés, c'est aussi une technologie cruciale pour répondre à de nombreux défis opérationnels. Les robots sont en effet capables d'effectuer de nombreuses tâches plus vite, moins cher et avec plus de précision et de fiabilité que les humains, et cela sans risque de fatigue, de blessure ou d'exposition dangereuse. Dans des domaines tels que la production et la maintenance industrielles, la construction, la santé, l'énergie et l'environnement, de plus en plus de tâches seront confiées à des robots, dont les capacités et l'autonomie ne cesseront de croître.

## Nanotech (NEXT)



La nanotechnologie est un domaine de la science et de l'ingénierie qui se concentre sur la conception, la production et l'utilisation de structures, de dispositifs et de systèmes réalisés en manipulant des atomes et des molécules à l'échelle nanométrique, soit, en général, 100 nanomètres ou moins. Cette technologie permet de créer des matériaux aux propriétés uniques qui diffèrent sensiblement de leurs équivalents à plus grande échelle en raison du rapport surface-volume élevé des nanoparticules et des effets quantiques à cette échelle. Les nanomatériaux à base de carbone et de métal peuvent ainsi présenter des propriétés électriques, mécaniques, thermiques, magnétiques, chimiques ou optiques remarquables. Domaine de recherche et d'innovation en pleine effervescence, les nanotechnologies pourraient révolutionner des industries entières, comme le génie civil qui voit arriver *les bétons auto-cicatrisants*<sup>39</sup> et les revêtements intelligents. Nanomatériaux à base de carbone, les nanotubes sont particulièrement prometteurs en raison, notamment, de leur conductivité électrique et thermique élevée.



Avec sa résistance exceptionnelle et sa forte conductivité thermique et électrique, le graphène, qui est composé d'une seule couche d'atomes de carbone, se trouve quant à lui déjà dans divers produits, des textiles aux pneus. Et les travaux actuels sur des *nanoparticules à base de silicium pour les batteries lithium-ion*<sup>40</sup> laissent augurer de solutions de stockage d'énergie plus efficaces, cruciales pour l'électrification des véhicules.

37 - <https://www.shine.cn/news/metro/2202151932/>

38 - <https://interestingengineering.com/culture/microsoft-openai-to-invest-500-million-in-ai-robotics-startup-future>

39 - <https://www.besix.com/fr/news/beton-auto-cicatrisant--innover-dans-la-reparation-du-beton#:~:text=Le%20syst%C3%A8me%20d'auto%2Dcicatrisation,pr%C3%A9%2Dperfor%C3%A9s%20recouverts%20de%20g%C3%A9latine.>

40 - [https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/woocommerce\\_uploads/2023/10/Keller-HD-bitnmz.pdf](https://new.societechimiquedefrance.fr/wp-content/uploads/woocommerce_uploads/2023/10/Keller-HD-bitnmz.pdf)

# Decentralized tech

Les technologies décentralisées, basées sur des architectures peer-to-peer (P2P) et des registres distribués, comme la blockchain, révolutionnent la manière dont les personnes interagissent et échangent de la valeur dans l'univers digital. Elles permettent de créer des systèmes plus transparents, inclusifs et sécurisés, sans autorité centrale de contrôle. Elles offrent des solutions innovantes pour la gestion de l'identité numérique, la finance décentralisée (DeFi), la gouvernance transparente et la propriété intellectuelle. Si ces technologies décentralisées et les cryptomonnaies qui les utilisent séduisent de plus en plus de particuliers, elles intéressent également les acteurs traditionnels bancaires et financiers, comme en témoigne la mise sur le marché de produits financiers accessibles (ETF). Cela s'est notamment traduit par la récente et fulgurante hausse du cours du *Bitcoin qui a dépassé sa valeur record historique en mars dernier (> 70 000 \$)*<sup>41</sup>.

Malgré les défis qui accompagnent le développement de ces technologies, comme l'interopérabilité ou l'évolutivité de la réglementation, ces technologies pourraient avoir un impact considérable, au-delà du secteur financier. Les entreprises doivent donc y être très attentives dès aujourd'hui pour rester compétitives demain.

Voir ce domaine technologique sur le **Tech-Radar**

## Blockchain (NOW)

Une blockchain (chaîne de blocs) est un registre distribué, partagé et transparent, qui garantit l'intégrité, la sécurité et la confidentialité des données échangées ou des transactions.

Son mécanisme de vérification par consensus permet de se dispenser d'un tiers de confiance ou d'une autorité de certification. Certaines blockchains comme Ethereum permettent par exemple l'implémentation de contrats intelligents (smart contracts), qui automatisent l'exécution d'une action prédéfinie lorsque sont remplies les conditions convenues entre les parties.

La blockchain est particulièrement adaptée pour des applications nécessitant une traçabilité et une protection renforcées des données. Durant la crise du COVID-19, l'Allemagne et les États-Unis ont ainsi expérimenté des solutions fondées sur la blockchain pour garantir l'authenticité du pass vaccinal. La possibilité s'étend aussi aux titres de propriétés et d'identité (passeport digital). De la même manière, la blockchain peut être

mise au service de l'environnement en assurant une transparence et une traçabilité renforcées des émissions de CO<sub>2</sub>, ou encore la traçabilité de l'eau et du plastique. Elle se doit également d'être de plus en plus « sustainable by design », comme le fait Algorand qui propose des solutions DeFi plus écologiques.

## Tokenized Assets (NEW)

La tokenisation est une représentation virtuelle d'un actif physique ou numérique. Grâce à la blockchain, où tous les échanges sont consignés de façon systématique et sécurisée, ce token (jeton) conserve son unicité et enregistre chaque évolution des attributs de l'actif originel, à commencer par sa valeur et l'identité de son propriétaire. Il est ainsi possible de tokeniser des œuvres d'art, des objets de collection, des portions de bien immobilier ou des personnages de jeu vidéo. La tokenisation est aujourd'hui un enjeu majeur pour les grandes maisons de vente aux enchères car elle certifie la propriété des biens mis en vente, qu'ils soient physiques ou

41 - <https://www.forbes.fr/finance/le-bitcoin-depasse-les-70-000-dollars-mais-ce-rebond-est-il-durable/>

digitaux. Elle est également utilisée dans les programmes de fidélité de nouvelle génération (Starbucks, Lufthansa...), mais aussi pour l'investissement avec la tokenisation de certains actifs financiers. Elle pourrait également s'étendre aux actifs environnementaux comme les crédits carbone afin de faciliter leur échange et leur distribution. *L'ONU soutient ainsi activement l'utilisation de la blockchain dans la lutte contre le changement climatique*<sup>42</sup>.

## DeFi (NEW)

En s'appuyant sur les smart contracts et la blockchain, la finance décentralisée (DeFi) vise à offrir aux particuliers la possibilité de réaliser des opérations financières sans ou avec un minimum d'intermédiaires. Autrement dit, de se passer des acteurs traditionnels, banques et institutions financières, pour réaliser ses transactions librement, en peer-to-peer. Si cette perspective d'un avenir décentralisé, promettant transparence et accessibilité, est de nature à inquiéter le secteur financier, nous sommes au contraire convaincus que celui-ci aura un rôle majeur à jouer dans cette transformation. En élaborant une proposition de valeur DeFi qui leur corresponde et en s'engageant avec les bons partenaires FinTech, les banques poseront les jalons d'un avenir CeDeFi, où cohabiteront finance traditionnelle (centralisée) et décentralisée. Pour certaines, ce futur a déjà débuté avec l'arrivée de custodial wallets (portefeuilles hébergés), qui permettent d'acheter, vendre ou stocker des cryptomonnaies depuis son espace client habituel. De même, les acteurs bancaires se penchent sur les projets de monnaie numérique de banques centrales (CBDC) qui pourraient s'appuyer sur la blockchain et les systèmes DeFi, à l'image du *SandDollar*<sup>43</sup>, monnaie digitale utilisée au Bahamas.

## DAO (NEXT)

Les DAO (Decentralized Autonomous Organization) sont des organisations détenues et gérées collectivement via Internet par leurs membres. Elles disposent par exemple d'une trésorerie intégrée auxquelles personne ne peut accéder sans l'approbation du groupe. Chaque décision émane en effet d'une proposition et d'un vote des membres. Elle est alors inscrite dans un smart contract, puis s'exécute de façon automatique. Concept relativement nouveau, les DAO pourraient révolutionner la façon dont sont

gérées les associations en créant un système de gouvernance plus transparent, plus démocratique et plus décentralisé. Les DAO apportent ainsi une réponse aux enjeux de gestion des communautés en ligne. Dans le monde du sport, les « DAO tokens » deviennent des « fan tokens » qui permettent aux groupes de supporters de devenir plus actifs et transparents en donnant, par exemple, un droit de vote sur les décisions du groupe (animations, banderoles...) ou du club (couleur d'un maillot, homme du match...).

## Web 3.0 (NEXT)

Le web décentralisé, ou Web 3.0, est une nouvelle vision d'Internet reposant sur la blockchain et le stockage et le partage décentralisés et sécurisés des données. L'objectif est double : offrir plus d'ouverture et de transparence que le web actuel, et donner aux utilisateurs le contrôle sur leurs données (personnelles et créées). Le Web 3.0 est le web qui accueillera les cas d'usages de tokenisation, de DeFi ou de DAO. Dans l'autre sens, les decentralized apps (dApps) contribuent à la concrétisation de cette ambition du Web 3.0. Uniswap (plateforme d'échange décentralisée de jetons Ethereum sans intermédiaire) ou encore Brave (navigateur web au système de publicité intégré et décentralisé) sont des exemples concrets de dApps contribuant à l'adoption du Web 3.0 par le grand public.

42 - <https://unfccc.int/fr/news/l-onu-soutient-la-technologie-blockchain-pour-l-action-climatique>

43 - <https://www.sanddollar.bs/>



# Immersive tech

Les technologies immersives, qui regroupent la réalité virtuelle (VR), la réalité augmentée (AR) et la réalité mixte (MR), ouvrent la porte à des expériences inédites. En générant des environnements virtuels immersifs ou en intégrant des éléments numériques au monde réel, elles modifient la perception de l'utilisateur ainsi que ses interactions avec son environnement. Déjà, ces technologies bouleversent de nombreux secteurs en répondant de façon originale et pertinente à des enjeux majeurs en matière de formation, de communication, de collaboration, de divertissement et d'opérations industrielles. Elles offrent par exemple des solutions innovantes pour la simulation d'environnements dangereux ou difficiles d'accès, la création d'expériences éducatives engageantes, la collaboration à distance et le développement de produits et de services.

Voir ce domaine technologique sur le **Tech-Radar**

## AR & VR (NOW)

La réalité augmentée (AR) et la réalité virtuelle (VR) sont deux technologies immersives qui créent un environnement simulé avec lequel l'utilisateur peut interagir d'une manière apparemment réelle. Dans le cas de la VR, l'univers proposé est entièrement digital ; dans celui de l'AR, des éléments numériques viennent se superposer au monde réel. La réalité mixte (MR) est une forme hybride, où cohabitent et interagissent objets réels et virtuels. Toutes permettent de créer de nouvelles expériences ludiques, sociales, éducatives ou professionnelles. On voit ainsi se développer de nombreux cas d'usage convaincant, d'AR notamment, dans les domaines de la maintenance, de la santé et de la formation.

Ces réalités virtuelles, mixtes et augmentées, s'appuient sur différents appareils, qui ont évolué au fil du temps depuis les premiers head-up displays d'aide à la conduite.

Du casque Quest 3 de Meta à son concurrent le plus sérieux, le casque de réalité mixte Apple Vision Pro, les GAMA ne cessent d'innover pour apporter le plus d'immersion possible à leurs utilisateurs. Aujourd'hui, si Apple dispose d'un avantage significatif avec son portefeuille d'applications qui peuvent être migrées de

l'iPhone à l'Apple Vision Pro, ce dernier souffre encore de son coût élevé en raison des technologies nécessaires (cartes 3D, batteries, connectivité, rapport poids/puissance...).

## 3D-Avatar (NEW)

Les avatars 3D sont des entités virtuelles qui servent d'interfaces interactives entre les utilisateurs et les univers numériques. Tantôt réalistes et humanisés, tantôt plus abstraits ou stylisés, ils peuvent intégrer un moteur d'intelligence artificielle (IA) capable de leur donner une certaine autonomie et de leur faire prendre vie.

Les avatars 3D sont largement répandus dans les applications utilisant la 3D telles que les jeux vidéo, les mondes immersifs et les réseaux sociaux. Ils renforcent l'engagement dans les processus de collaboration virtuelle et facilitent l'immersion dans les environnements virtuels. Ils peuvent aussi favoriser la diversité et l'inclusion en supprimant certains préjugés dans les interactions entre les personnes.

L'une des solutions d'avatar 3D les plus interopérables du marché est celle de *Ready Player Me*<sup>44</sup> : son moteur de création peut facilement être intégré à des systèmes Unity, Unreal, Web et même aux applications mobiles. Un utilisateur peut ainsi utiliser

44 - <https://readyplayer.me/fr>

son même avatar sur plusieurs plateformes différentes, et ce sont aujourd'hui plus de 9 000 applications ou jeux qui utilisent ce moteur pour la gestion des avatars.

## Metaverse (NEXT)



Le metaverse est un conteneur d'espaces virtuels 2D et 3D, un lieu persistant parallèle au monde physique, qui combine des expériences en ligne avec un sentiment de présence. Le metaverse peut être un outil clé pour la collaboration virtuelle, où l'engagement est essentiel, ainsi que pour la formation et les nouvelles expériences commerciales ou de divertissement. Ces solutions peinent cependant à se généraliser du fait de l'absence de standards, du faible taux d'équipement AR/VR du grand public, et surtout du manque d'applications incontournables et différenciantes. En outre, le coût de mise en œuvre reste élevé, et le ROI aléatoire. De nouvelles avancées technologiques permettront sans doute de lever ces freins pour créer de nouvelles applications et généraliser ce mode d'interaction prometteur. Si l'on peut noter que de nombreuses entreprises ont d'ores et déjà mis un pied dans

le metaverse, *l'investissement d'1,5 Md \$ dans Epic Games annoncé récemment par Disney*<sup>45</sup> est probablement l'initiative la plus significative. Ensemble, les deux géants de l'animation souhaitent créer un « univers de jeux et de divertissement vaste et ouvert » lié à Fortnite, Disney ayant abandonné la construction de son propre metaverse début 2023.

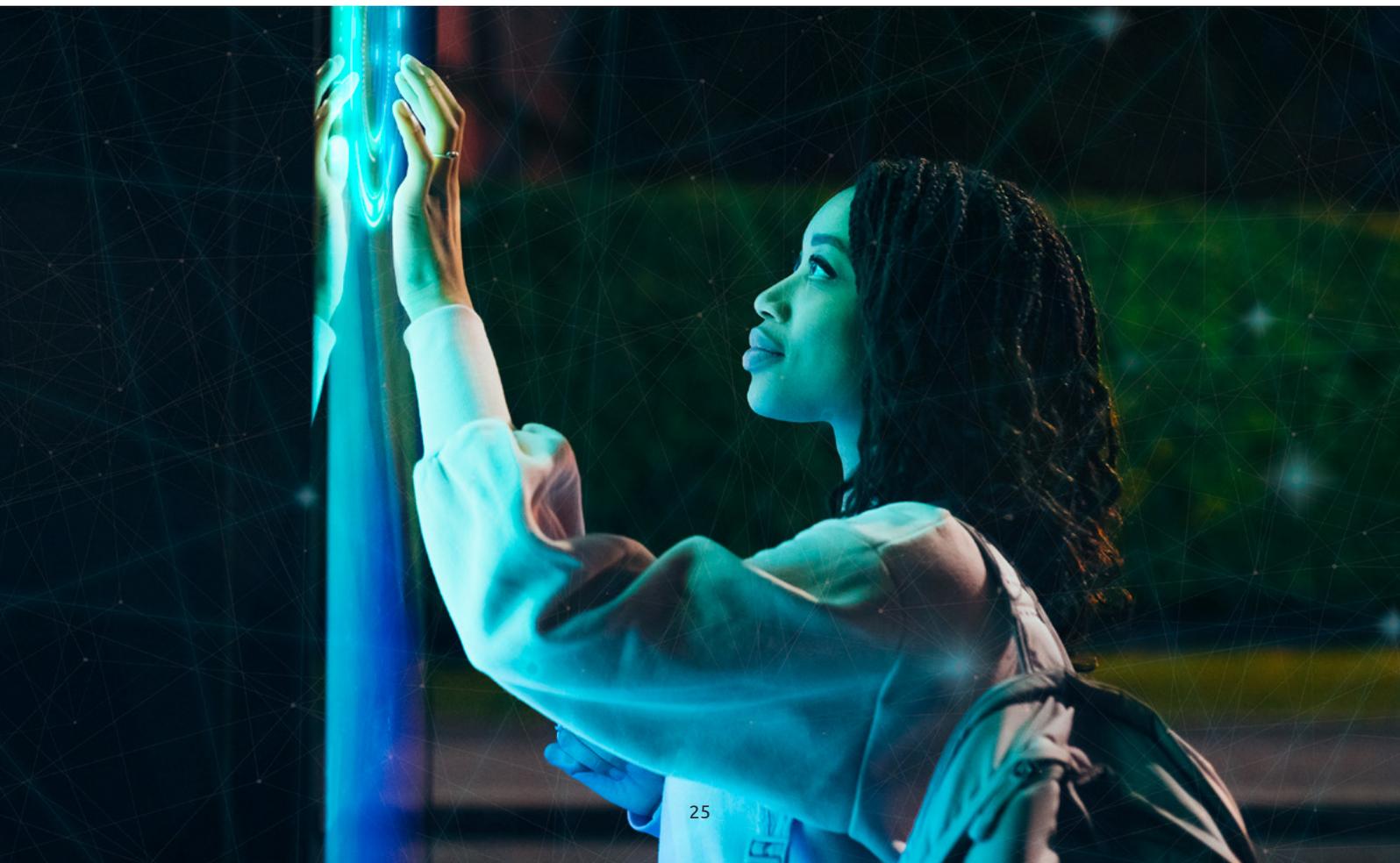
## Spatial Computing (NEXT)



Le Spatial Computing utilise des caméras et des capteurs pour créer les modèles ou les jumeaux numériques d'individus, d'objets, de machines ainsi que des environnements dans lesquels ils se trouvent, de manière à permettre aux utilisateurs d'interagir avec eux. L'informatique spatiale permet d'augmenter les personnes, les choses et les environnements, d'enrichir les expériences, et de renforcer la compréhension mutuelle et la collaboration à distance. L'exemple le plus récent concerne *l'expérience de cinéma proposée par le casque Apple Vision*<sup>46</sup> Pro. Grâce à la compréhension spatiale de la pièce, le casque est capable de restituer un écran de cinéma sur un mur, de façon virtuelle.

45 - <https://techcrunch.com/2024/02/09/epic-games-disney-fortnite-metaverse/?guccounter=1>

46 - <https://www.apple.com/newsroom/2024/01/apple-previews-new-entertainment-experiences-launching-with-apple-vision-pro/>



# Next-gen computing

**Next-Gen Computing désigne le domaine du quantique et de l'informatique de demain. L'informatique quantique, les capteurs quantiques, l'informatique neuromorphique sont autant de technologies émergentes qui promettent de repousser les limites du calcul et de la sécurisation de l'information. Aujourd'hui, la question n'est plus de savoir s'il est possible d'atteindre la suprématie quantique (seuil à partir duquel aucun ordinateur conventionnel, quelle que soit sa puissance, ne peut plus reproduire le fonctionnement d'une machine quantique), mais quand elle adviendra. Bénéficiant en France d'un écosystème particulièrement vivace, ces technologies apporteront des progrès radicaux pour la découverte de nouveaux médicaments, la conception de matériaux avancés, le chiffrement ultra-sécurisé et le développement de systèmes d'intelligence artificielle plus performants et économes en énergie.**

Voir ce domaine technologique sur le **Tech-Radar**

## Quantum Sensing (NEW)



On trouve d'ores et déjà des capteurs quantiques dans des horloges atomiques, des radars, des magnétomètres, etc. Cette autre révolution quantique va permettre d'affiner considérablement les mesures dans de nombreux domaines, ouvrant la voie à de nouveaux cas d'usage exigeant une très haute précision. C'est le cas notamment dans les secteurs de la défense, où certains appareils de détection ou de positionnement peuvent dès à présent intégrer ces technologies, et de l'imagerie médicale.

*L'armée américaine collabore avec la société Rydberg Technologies<sup>47</sup> au développement d'antennes quantiques capables de surpasser les performances actuelles et a réalisé la première communication radio longue portée avec un récepteur quantique atomique (beaucoup plus sensible aux infimes perturbations des champs électromagnétiques), une percée qui pourrait grandement aider à de nouvelles communications à l'épreuve du brouillage ou du piratage. Dans l'aviation, la détection quantique est utilisée pour construire des solutions de navigation magnétique<sup>48</sup>.*

## Post-Quantum Cryptography (NEW)



Avec l'arrivée de machines quantiques capables de briser en temps réel les algorithmes de chiffrement usuels, c'est l'ensemble de nos communications qui est menacé. Et le risque est déjà là, car les pirates pourront déchiffrer demain les données qu'ils collectent aujourd'hui. C'est pourquoi il est nécessaire de repenser dès aujourd'hui la cybersécurité pour se protéger de cette stratégie, dite « harvest now, decrypt later », les données sensibles ayant une longue durée de vie : biométrie, accès aux réseaux de gaz ou d'électricité, voitures autonomes, portefeuille financier... Il existe d'ores et déjà des algorithmes de chiffrement qui seront capables de résister aux ordinateurs quantiques. Depuis plusieurs années, le NIST américain organise une compétition afin d'identifier et de tester des algorithmes qui pourraient devenir des standards. Quatre sont aujourd'hui encore en lice : Kyber, Dilithium, Falcon et Sphincs. Pour se protéger, mais aussi pour anticiper les réglementations et les attentes du marché, il est temps pour les entreprises de tester et d'implémenter ces algorithmes comme l'ont déjà fait Apple, SK Telecom, AWS, ou encore Google.

47 - <https://www.defenseone.com/technology/2023/12/army-tests-long-range-quantum-radio-communication/392979/>

48 - <https://acubed.airbus.com/blog/quantum/acubed-announces-exploration-of-quantum-sensing-as-an-autonomy-enabler/>

## Quantum Computing (NEXT)

Le quantum computing offre une nouvelle approche pour résoudre des problèmes réputés pour leur complexité comme celui du vendeur itinérant - un défi d'optimisation dans lequel un vendeur doit trouver l'itinéraire le plus court possible pour visiter chaque ville une fois et revenir au point de départ.. Grâce notamment au principe physique de la superposition, qui permet de passer d'une vision binaire de l'information (0 ou 1) à une vision superposée (0 et 1), la puissance de calcul de ces nouvelles machines augmente de façon quadratique. Ceci, combiné à des algorithmes parallèles spécifiques, ouvre la voie à un traitement simultané de l'information, ce qui permettra des optimisations et des simulations jusqu'alors très difficiles, voire impossibles, avec des systèmes classiques. Parmi les applications pratiques envisagées, on peut citer des systèmes de détection de fraudes bancaires, l'optimisation des modèles d'IA de reconnaissance de motifs, ou encore l'accélération de la simulation de molécules pharmaceutique, *projet mené par Pasqal*<sup>49</sup>, une start-up quantique française. Les ordinateurs quantiques doivent encore surmonter des problèmes de taille (correction d'erreur, fiabilité des mesures, utilisation restreinte à des températures très basses, ...) pour être adoptés massivement, mais à mesure qu'ils progresseront et se banaliseront, leur impact sera équivalent à celui des premiers systèmes informatiques dans les années 1960. Les entreprises doivent donc commencer sans tarder à intégrer des talents, organiser leur veille et identifier les futurs cas d'usage les plus pertinents afin de démarrer au plus tôt les expérimentations.

## Quantum Comms (NEXT)

La communication quantique constitue un nouveau moyen de transmettre de manière sécurisée des informations entre deux correspondants. En s'appuyant sur des propriétés quantiques comme la superposition et la décohérence, la distribution quantique de clé (Quantum Key Distribution, QKD) permet

de détecter avec 100 % de fiabilité l'interception d'un message. Cette méthode permet donc de garantir l'intégrité absolue des échanges, posant de ce fait les bases d'un Internet quantique.

*Possible à l'heure actuelle sur des distances de l'ordre de la centaine de kilomètres*<sup>50</sup>, l'essor de cette technique reste toutefois suspendu au développement des répéteurs quantiques, encore à l'état expérimental, qui seront nécessaires pour augmenter la portée des communications. *Orange*<sup>51</sup>, JP Morgan, Nokia, Airbus mais aussi des acteurs académiques comme l'université de York, prennent part à cette course de R&D en réalisant dès à présent des tests pour sécuriser leurs blockchains, leurs communications avec leurs partenaires, ou entre plusieurs pays.

## Neuromorphic Computing (NEXT)

Le Neuromorphic Computing désigne des architectures informatiques qui imitent la structure et le fonctionnement du cerveau humain. En émulant les neurones et les synapses du cerveau, l'objectif est de créer des systèmes capables de traiter à la demande et en parallèle les informations et les données, et ce avec une très faible consommation d'énergie. Pour cela, à la différence des réseaux de neurones traditionnels qui fonctionnent en continu, on utilise des systèmes de Spiking Neural Networks (SNN), à base de signaux discrets ou d'impulsions, qui permettent de réaliser des traitements parallèles grâce à l'action simultanée de nombreux neurones. Ces systèmes sont par ailleurs complétés par de puissants algorithmes qui leur permettent d'apprendre, de s'adapter et d'améliorer leurs performances au fil du temps.

*Intel a récemment annoncé*<sup>52</sup> avoir construit le plus grand système neuromorphique au monde, Hala Point. Hala Point intègre 1152 processeurs Loihi 2. Le système prend en charge jusqu'à 1,15 milliard de neurones et 128 milliards de synapses sur 140 544 cœurs de traitement neuromorphiques, consommant un maximum de 2 600 watts d'énergie. Il comprend également plus de 2 300 processeurs x86 intégrés pour les calculs auxiliaires.

49 - <https://www.pasqal.com/news/pasqal-and-qubit-pharmaceuticals-partnership/>

50 - <https://interestingengineering.com/innovation/quantum-key-distribution-distance-record>

51 - <https://newsroom.orange.com/frances-industry-quantum-startups-academic-and-institutional-players-join-forces-to-build-the-future-of-the-french-quantum-internet-communication-system/>

52 - <https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/intel-builds-worlds-largest-neuromorphic-system.html#gs.a63tso>

# Tech for digital trust

Le domaine Tech for Digital Trust regroupe un ensemble de technologies destinées à renforcer la sécurité et la confiance dans le cyberspace, qu'il s'agisse des interactions en ligne, des transactions électroniques, de l'utilisation et de l'échange des données... Dans un contexte marqué par l'ultra-digitalisation des activités quotidiennes et la multiplication des menaces et des inquiétudes (cyberattaques, bulles de filtre, deepfakes...), il convient plus que jamais de renforcer la confiance numérique pour encourager l'adoption et l'utilisation des technologies. L'IA de confiance, le chiffrement homomorphe, le cyber mesh, le SASE, l'identité numérique, sont autant de technologies qui peuvent contribuer à faire de l'univers digital un espace sûr, fiable, sécurisé, contrôlé. En bref, les technologies qui contribueront à construire un écosystème digital de confiance.

Voir ce domaine technologique sur le **Tech-Radar**

## Zero trust & SASE (NOW)

Le Zero Trust est un paradigme de cybersécurité articulant cinq domaines technologiques : la gestion des identités et des accès aux ressources numériques, la sécurisation des appareils utilisés pour solliciter ces accès, la protection rapprochée des données, la sécurité des applications/API/ environnement cloud et la sécurité des réseaux (micro-segmentation, accès locaux/distants...). Parmi les domaines suivis du Zero Trust, figure le Secure Access Service Edge (SASE) qui est un modèle d'architecture réseau combinant diverses technologies cloud-natives de sécurité et de réseau (CASB, SDWAN, ZTNA...). Dans le SASE, les points d'accès au réseau et les contrôles de sécurité ne sont plus positionnés au niveau du datacenter comme dans le modèle « traditionnel », mais des utilisateurs et des appareils. Le SASE est une réponse aux enjeux de sécurité des environnements distribués, qui se caractérisent par une multiplicité d'utilisateurs, d'appareils et de lieux. Cela reste une approche délicate, qui nécessite de mettre en regard les bénéfices attendus (simplification de gestion, harmonisation de l'expérience utilisateur, fonctions de sécurité avancées...) et les risques potentiels

(confidentialité, conformité des données, résilience des services de sécurité cloud, complexité de la migration, manque d'interopérabilité...). Aujourd'hui, de nombreux fournisseurs de technologies et de services tels que Cisco, VMware, ou Fortinet, proposent déjà des solutions SASE.

## Digital Identity & Authentication (NOW)

L'identité numérique recouvre l'ensemble des éléments qui permettent d'établir un lien unique entre une entité physique (personne, organisation, objet, appareil...) et sa représentation virtuelle. Elle désigne plus particulièrement la solution qui permet d'identifier cette entité de façon irréfutable et de lui rattacher ses informations personnelles. Pour cela, elle s'appuie sur des outils de gestion des identités et des accès, des moyens d'authentification (double facteur, biométrie) ou encore des technologies de sécurisation et de traçabilité des données (blockchain). Indispensable pour dématérialiser certains processus nécessitant une identification formelle de l'utilisateur (opérations bancaires, démarches administratives...), l'identité numérique se doit d'être hautement régulée.

Pour répondre à ce besoin, l'ANSSI a notamment mis en place un Visa attestant du niveau de sécurité des solutions d'identité numérique<sup>53</sup>. Toutefois, des efforts restent à faire pour lutter contre l'utilisation malveillante de l'IA générative qui pourrait faciliter le piratage d'éléments de reconnaissance biologiques tels que la voix ou les traits du visage.

## Trusted & Safe AI (NEW)

L'IA responsable désigne un développement et une utilisation de l'IA éthiques et sécurisés. Elle touche notamment aux questions de qualité et de sécurité des données ainsi que de performance, de robustesse, d'équité et de contrôle des modèles. Le déploiement d'une IA responsable se doit donc d'intégrer plusieurs « paquets technologiques » : les technologies liées à l'explicabilité pour révéler son chemin de décision (explainable AI) ; les méthodes de détection des biais comme le Fair Learning ; les solutions de sécurité pour protéger les données et les systèmes d'IA comme celles décrites dans le guide du projet Purple Llama de Meta ou les recommandations du NIST ; ou encore des outils de certification des modèles...

L'IA ne sera toutefois responsable que si chaque étape de son cycle de vie est guidée par des pratiques saines, si les acteurs (concepteurs, développeurs, utilisateurs...) sont formés à ses enjeux, et s'il existe un moyen technologique de signaler ses interventions (par exemple, *via l'étiquetage des métadonnées à l'instar du « Imaginé par l'IA » de Meta*<sup>54</sup>) de sorte qu'il soit possible d'encadrer ses usages et de tracer ses décisions.

## Deepfakes fighting (NEW)

Le deepfakes fighting n'est pas tant une technologie unique qu'en ensemble de technologies qui permettront demain de se prémunir plus activement contre la prolifération des deepfakes. *Dans un futur proche, 90% des contenus disponibles en ligne seront issus de l'IA générative*<sup>55</sup>, et avec la propagation de fake news que cela devrait engendrer, le niveau de confiance des utilisateurs s'en verrait fortement impacté. Aujourd'hui, les technologies de lutte contre les deepfakes s'organisent en 2 grandes catégories : la traçabilité et la détection. Les outils de traçabilité des contenus visent à marquer la provenance d'un contenu ou à empêcher sa manipulation a posteriori de sa

création. Le Digital watermarking, par exemple, injecte des marqueurs d'authenticité dans les contenus. La blockchain, autre exemple, peut également être utilisée pour horodater la création ou modification authentique malgré la distribution massive d'un contenu. Pour détecter les fakes, les technologies de fact-checking vont quant à elles entraîner des IA à reconnaître les éléments qui différencient ces deepfakes des contenus authentiques. Comment ? en analysant des images, des vidéos et contenus audio montrant des signaux incohérents : confusion dans la gestuelle, les mimiques, l'expression orale, la pixellisation d'une image... La lutte technologique contre les deepfakes deviendra ainsi un champ à part entière de la confiance numérique.

## Digital Resilience (NEW)

La résilience devient la priorité de nombreux secteurs qui souhaitent rassurer sur leur capacité à résister aux chocs externes quels qu'ils soient : cyberattaque, catastrophe naturelle, crise sociale ou politique, guerre... Parce que les organisations sont de plus en plus interconnectées, une défaillance d'un acteur peut avoir des effets systémiques, entraînant l'augmentation des réglementations sectorielles (DORA dans le secteur financier par exemple) ou régionales (Cyber-Resilience Act en Union européenne).

Les technologies de résilience proposent désormais de déployer des environnements techniques isolés, à côté des systèmes d'information de tous les jours, et sur lesquels pourront continuer à fonctionner les minimum viable businesses des entreprises en cas de crise. Ces environnements isolés hébergeront le cœur d'activité critique des entreprises pendant la crise pour éviter toute interruption ou contrecarrer le phénomène de black-out numérique. Les Environnements Isolés de Reconstruction font intervenir des technologies comme les coffres immuables de données qui permettent d'empêcher l'altération ou l'infection des données une fois sauvegardées, qui seront donc utilisables pour basculer une activité impactée par un ransomware. Les Restart Rooms garantissent quant à elles des espaces sains de redémarrage. Ces environnements technologiques isolés sont considérés comme une voie fiable pour diminuer l'impact des attaques par ransomware et renforcer la confiance dans la résistance numérique d'une organisation.

53 - <https://cyber.gouv.fr/le-visa-de-securite>

54 - <https://about.fb.com/fr/news/2024/02/identifier-les-contenus-generes-par-lia-sur-facebook-instagram-et-threads/>

55 - [https://www.europol.europa.eu/cms/sites/default/files/documents/Europol\\_Innovation\\_Lab\\_Facing\\_Reality\\_Law\\_Enforcement\\_And\\_The\\_Challenge\\_Of\\_Deepfakes.pdf](https://www.europol.europa.eu/cms/sites/default/files/documents/Europol_Innovation_Lab_Facing_Reality_Law_Enforcement_And_The_Challenge_Of_Deepfakes.pdf)

## Homomorphic encryption (NEXT)

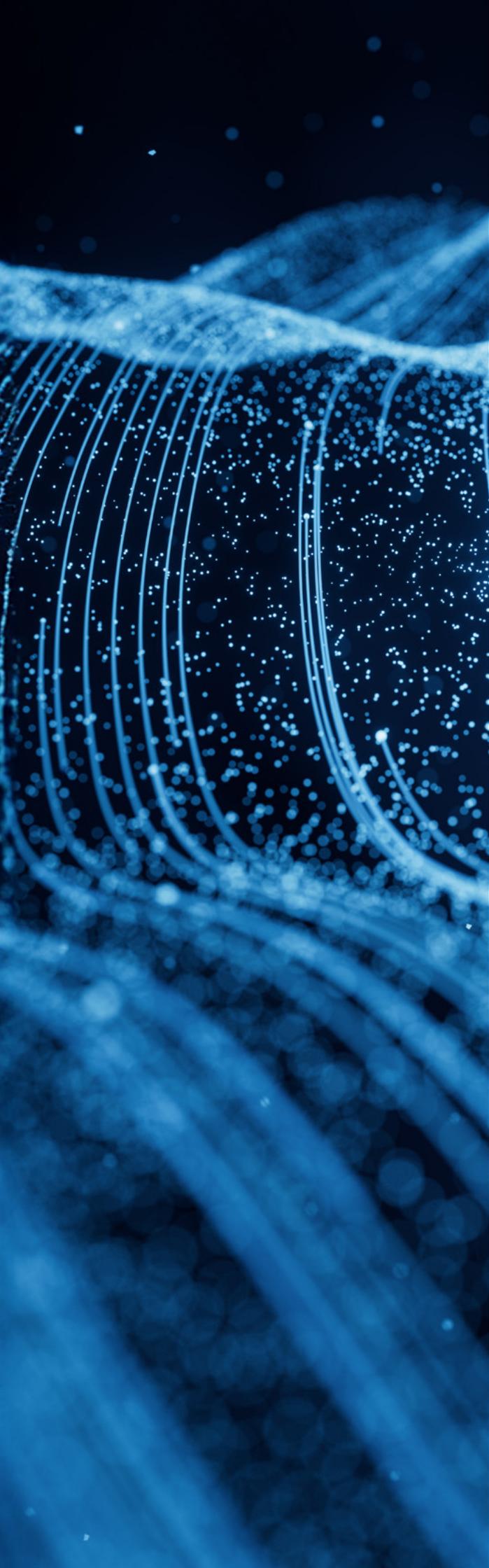
Le chiffrement homomorphe permet de travailler directement sur des données chiffrées sans avoir à les déchiffrer au préalable. Un institut de recherche peut ainsi réaliser des études statistiques sur des données partagées par un organisme de santé sans jamais avoir accès au moindre contenu confidentiel. C'est aussi un moyen de renforcer la sécurité des données dans le cloud en facilitant la mise en œuvre d'une gestion des données conforme à la réglementation (RGPD notamment) et aux standards de sécurité. Certaines entreprises développent et proposent déjà des solutions, comme le Fully Homomorphic Encryption Toolkit d'IBM ou le SEAL (Simple Encrypted Arithmetic Library) de Microsoft. Cependant, les cas d'usage sont encore limités et demeurent complexes à mettre en œuvre. Quelques acteurs spécialisés dans les services de cybersécurité (Enveil, Duality...) ont commencé à l'utiliser dans le but de renforcer leurs services de protection des données sensibles. Le chiffrement homomorphe rassure les utilisateurs, mais il permet aussi de laisser des tiers gérer ses environnements, ou y accéder, d'une façon simple et parfaitement sécurisée. Son utilisation dépendra donc du contexte et de la criticité de l'information concernée.

## Cybermesh (NEXT)

Abordant la cybersécurité de façon globale, la Cybersecurity Mesh Architecture (CSMA) vise à établir un cadre unifié et flexible pour mieux faire collaborer les divers composants de sécurité face à des menaces évolutives. Il s'agit notamment de consolider et mettre en cohérence les politiques de sécurité, les tableaux de bord, la collecte et l'analyse des données... La CSMA s'adresse tout particulièrement aux organisations possédant des environnements informatiques complexes et distribués, sur lesquels interviennent de nombreux outils de sécurité. Par exemple, l'armée américaine développe un système de cyberdéfense baptisé « Joint Cyber Warfighting Architecture » (JCWA) basé sur l'architecture cybermesh. Cela lui permettra notamment d'améliorer la coordination de ses branches armées avec une résilience renforcée, pour une meilleure détection et une réaction plus rapide en cas de cyberattaque. Par ailleurs, se développent des initiatives communautaires, comme l'Open Cybersecurity Alliance, afin de promouvoir et faciliter l'interopérabilité entre les outils de cybersécurité, tendant de fait vers la CSMA. La CSMA doit être adoptée en bonne intelligence et faire l'objet de premiers pilotes traitant les complexités et les biais opérationnels tout en s'intégrant aux infrastructures IT existantes et en respectant la conformité réglementaire.







# Un point de départ

**En redéfinissant le possible, les nouvelles technologies, IA en tête, font entrer les entreprises dans une nouvelle ère. Désormais, la technologie n'est plus un moteur auxiliaire du business, mais bien son moteur principal, celui qui lui donne son orientation et sans lequel il est impossible de réussir et de durer dans un environnement de plus en plus turbulent et concurrentiel.**

Dans ce monde de technologie, dense, complexe, mouvant, les dirigeants ont besoin d'un guide, d'une boussole, d'un panorama clair et accessible afin de s'orienter et de prendre les bonnes décisions quant aux technologies à prioriser et à adopter : telle est la vocation de ce Tech Radar élaboré par notre communauté d'experts.

Ce document n'est cependant qu'un point de départ. La technologie évolue sans cesse, tout comme les enjeux des entreprises, et notre Tech Radar n'a de sens que s'il accompagne ces mutations pour rester pertinent. C'est pourquoi il va vivre, évoluer, s'enrichir au fur et à mesure que se dévoileront de nouveaux horizons technologiques. Viendront aussi s'y ajouter des contenus plus spécifiques, apportant un éclairage approfondi sur certains domaines technologiques ou secteurs d'activité.

Pour les décideurs, et tous ceux qui s'intéressent au potentiel des avancées technologiques pour relever les défis de notre époque, nous espérons que la publication de ce Tech Radar sera le début d'une fructueuse conversation. Ayons-la ensemble.

# Auteurs



**Manon Briole**  
CTO Office Coordinator  
[manon.briole@capgemini.com](mailto:manon.briole@capgemini.com)



**Philippe Cordier**  
(Gen)AI  
[philippe.a.cordier@capgemini.com](mailto:philippe.a.cordier@capgemini.com)



**Adil Hihi**  
Decentralized Tech  
[adil.hihi@capgemini.com](mailto:adil.hihi@capgemini.com)



**Gabrielle Desarnaud**  
Climate Tech  
[gabrielle.desarnaud@capgemini.com](mailto:gabrielle.desarnaud@capgemini.com)



**Clément Brauner**  
Next-Gen Computing  
[clement.brauner@capgemini.com](mailto:clement.brauner@capgemini.com)

**Nicolas Gaudillière**  
Chief Technology Officer  
[nicolas.gaudilliere@capgemini.com](mailto:nicolas.gaudilliere@capgemini.com)



**Pierre Fortier**  
Advanced Connectivity  
[pierre.fortier@capgemini.com](mailto:pierre.fortier@capgemini.com)



**Maud Picq**  
Computer Vision  
[maud.picq@capgemini.com](mailto:maud.picq@capgemini.com)



**Guillaume Renaud**  
Cloud & Edge  
[guillaume.renaud@capgemini.com](mailto:guillaume.renaud@capgemini.com)



**Erwan Moysan**  
Immersive Tech  
[erwan.moysan@frog.co](mailto:erwan.moysan@frog.co)



**Jeanne Heuré**  
Tech 4 Digital Trust  
[jeanne.heure@capgemini.com](mailto:jeanne.heure@capgemini.com)



## À propos de Capgemini Invent

Capgemini Invent est la marque d'innovation digitale, de design et de transformation du groupe Capgemini, qui permet aux dirigeants de façonner l'avenir de leurs entreprises. Etablie dans plus de 30 studios et plus de 60 bureaux dans le monde, elle comprend une équipe de plus de 12 500 collaborateurs, composée d'experts en stratégie, de data scientists, de concepteurs de produits et d'expériences, d'experts en marques et en technologie qui développent de nouveaux services digitaux, produits, expériences et modèles d'affaire pour une croissance durable.

Capgemini Invent fait partie du groupe Capgemini, partenaire de la transformation business et technologique de ses clients, les accompagne dans leur transition vers un monde plus digital et durable, tout en créant un impact positif pour la société. Le Groupe, responsable et multiculturel, rassemble 340 000 collaborateurs dans plus de 50 pays. Depuis plus de 55 ans, ses clients lui font confiance pour répondre à l'ensemble de leurs besoins grâce à la technologie. Capgemini propose des services et solutions de bout en bout, allant de la stratégie et du design jusqu'à l'ingénierie, en tirant parti de ses compétences de pointe en intelligence artificielle, en cloud, et en data, ainsi que de son expertise sectorielle et de son écosystème de partenaires. Le Groupe a réalisé un chiffre d'affaires de 22,5 milliards d'euros en 2023.

Get the future you want\*

Plus d'informations sur [www.capgemini.com](http://www.capgemini.com)

*\*Réalisez le futur que vous voulez*