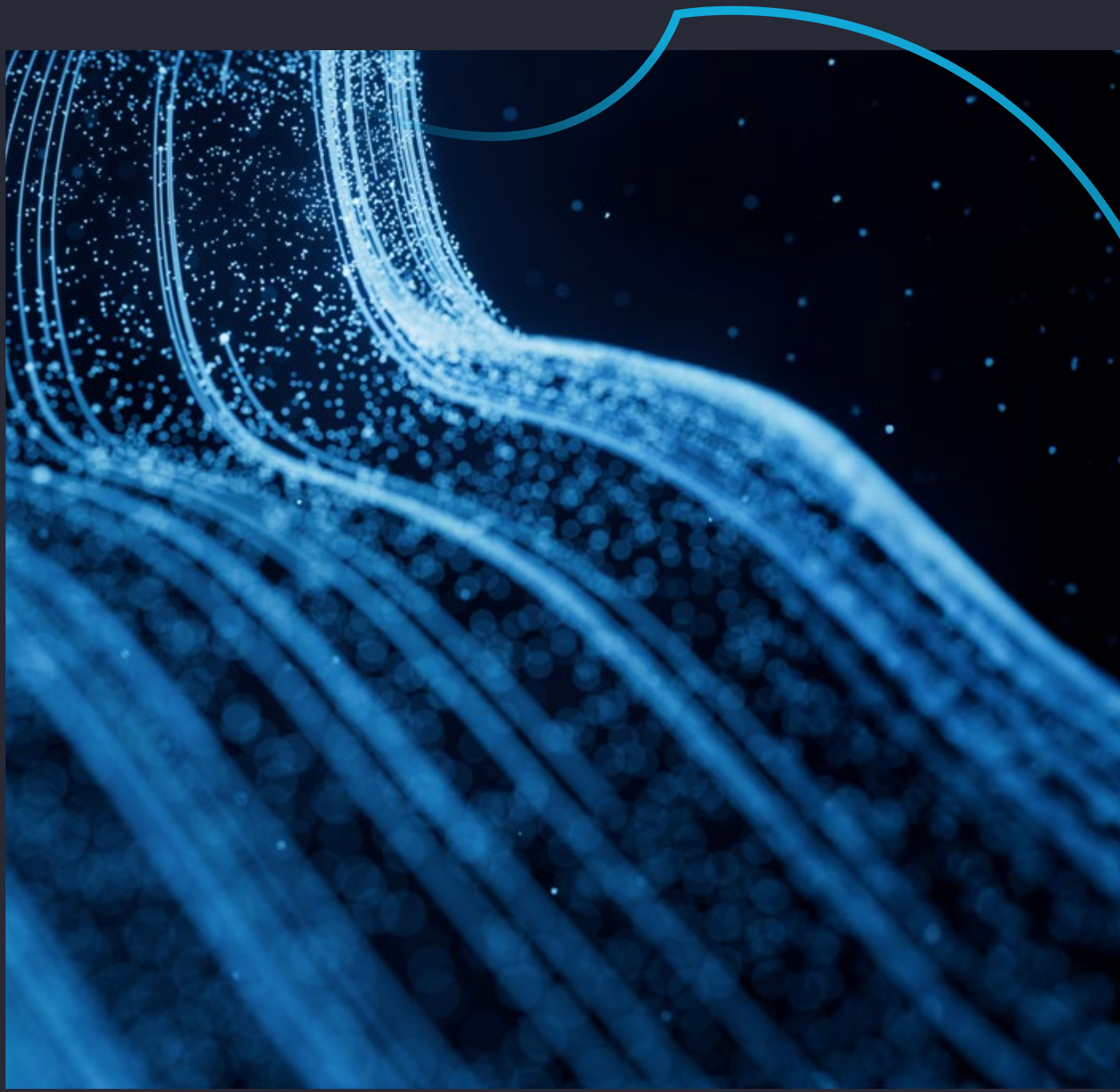
Tech Radar 2025

Décrypter les confluences, anticiper les ruptures.

Capgemini invent



Sommaire

Tech Radar 2025 : l'ère de la convergence technologique 3

La convergence ou comment orchestrer la symphonie technologique 4

Principes et méthodes 6

Tech radar 10

Domaines technologiques 11

- (Gen)AI 11
- Advanced connectivity 15
- Sustainable Tech 18
- Cloud & Edge 23
- Engineering tech 27
- Decentralized tech 31
- Immersive tech 35
- Next-Gen Computing 40
- Tech for Digital Trust 44
- Engineering Biology 49

Au-delà de l'horizon : bâtir la convergence de demain 52

Auteurs 53

Contributeurs 54

Tech Radar 2025 : l'ère de la convergence technologique

L'année 2024 a marqué une transformation profonde de notre paysage technologique. La GenAI, sous toutes ses formes, a redéfini nos pratiques professionnelles et nos modèles économiques, bouleversant les méthodes d'automatisation, de création de contenu et d'assistance aux entreprises. En parallèle, l'essor des technologies immersives a révolutionné nos interactions numériques, tandis que les avancées en calcul quantique commencent à résoudre des problèmes jusqu'alors insolubles dans des secteurs comme la pharmacie ou la science des matériaux. Ce qui était encore inimaginable hier est devenu possible aujourd'hui. Ce qui aurait pris des semaines est désormais réalisable en quelques secondes et, presque du jour au lendemain, un gouffre s'est creusé entre ceux qui maîtrisent ces capacités et les autres.

Face à cette mutation rapide et inéluctable, les décideurs ont massivement réorienté leurs investissements vers les infrastructures technologiques avancées. L'étude annuelle de Capgemini sur l'investissement technologique, présentée lors du Forum économique mondial de Davos, révèle cette tendance avec éloquence : alors même que 56% des décideurs placent la réduction des coûts comme priorité en 2025, 50% de ces mêmes dirigeants prévoient d'augmenter leurs investissements dans les nouvelles technologies[1]. Ce paradoxe apparent illustre une réalité fondamentale : la technologie n'est plus perçue comme un simple outil ou une dépense, mais comme un levier stratégique de compétitivité à long terme.

En 2025, cette dynamique s'intensifie avec la multiplication des innovations à fort impact. Les réseaux 5G continuent de transformer la connectivité industrielle, l'engineering biology permet de programmer le vivant à l'image d'une plateforme technologique. Le domaine de l'IA, à lui seul, illustre parfaitement ce rythme exponentiel avec la sortie de plusieurs modèles bénéficiant de mises à jour fréquentes, ainsi que l'émergence d'architectures et pratiques open-source visant à optimiser la performance ou à offrir des alternatives plus accessibles. Le récent lancement du modèle chinois Deepseek a, quant à lui, suscité de vives réactions tant dans le secteur privé que public, illustrant l'intensification de la compétition technologique mondiale et soulignant l'impératif d'une souveraineté numérique renforcée.

Dans ce contexte où la technologie façonne notre futur, la sécurité des données et la résilience des infrastructures s'imposent comme des enjeux stratégiques majeurs. La transparence et la confiance deviennent indispensables pour transformer ces défis en opportunités de croissance durable, axée sur l'efficacité et garantissant la compétitivité à long terme.

Le Tech Radar se présente ainsi comme une véritable boussole pour les dirigeants en proposant une analyse claire et pragmatique des tendances qui façonneront 2025 et au-delà. Fruit de l'expertise croisée des spécialistes de Capgemini, il identifie les leviers stratégiques essentiels permettant aux entreprises de définir des feuilles de route adaptées et de transformer les mutations technologiques en moteurs de compétitivité.

Pour assurer un équilibre entre rigueur analytique et applicabilité concrète, nous avons, à nouveau cette année, mobilisé notre double expertise business et technologique, enrichie par l'expérience du Groupe Capgemini en s'appuyant sur le cadre de référence offert par le Technovision[2], rapport sur les tendances technologiques majeures publié annuellement. Ainsi, nous avons sélectionné plus de 60 technologies que nous considérons comme déterminantes pour répondre aux défis actuels et anticiper ceux de demain. Notre approche, fondée sur une analyse approfondie de la maturité et du potentiel d'impact positif sur les individus, les objets et l'environnement, offre aux décideurs des repères clairs pour orienter stratégiquement leurs investissements

La convergence entre ces différentes technologies - lorsque l'IA rencontre l'edge computing, quand le spatial computing s'intègre aux jumeaux numériques industriels, ou lorsque les technologies quantiques accélèrent la découverte de nouveaux matériaux - crée des opportunités sans précédent. Ceux qui sauront anticiper et orchestrer ces convergences ne se contenteront pas de suivre le changement, ils en deviendront les architectes et les leaders de l'économie de demain. Car 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.

1 - https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2025/01/Investment-Trends-Report.pdf
2 - https://www.capgemini.com/fr-fr/perspectives/publications/technovision-2024-tendances-pour-les-decideurs/

La Convergence ou comment orchestrer la symphonie technologique

La convergence technologique, phénomène central de notre ère numérique, redéfinit profondément les modes d'innovation et de création de valeur. En 2024, cette dynamique s'est considérablement accélérée, transformant ce qui n'était encore que des tendances isolées en un mouvement systémique. Le Tech Radar 2025 de Capgemini révèle ce que beaucoup d'entre nous soupçonnaient déjà : nous assistons non seulement à l'évolution des technologies individuelles, mais aussi à leur **convergence inévitable et fascinante.** Nous ne vivons pas une simple addition de progrès technologiques, mais une véritable fusion créative qui donne naissance à des innovations de rupture.

L'analyse réalisée par le **Forum économique mondial**, sur la base des réponses à une enquête menée auprès de plus de **2 000 dirigeants**, révèle un schéma clair d'intégration entre huit domaines technologiques fondamentaux : Artificial Intelligence, Omni Computing, Spatial Intelligence, Quantum Technologies, Bioengineering, Robotics, Advanced Materials, et Next Generation Energy. Cette analyse ne se contente pas de mesurer l'évolution de ces technologies individuelles, elle évalue également leur potentiel de collaboration, révélant des synergies inattendues qui conduisent souvent à des **innovations de pointe**.

Le *Tech Radar* identifie dix domaines technologiques distincts. Cependant, qualifier ces domaines de « distincts » semble presque réducteur face à la grande tapisserie qui se déploie en coulisses. Ces domaines ressemblent davantage à des aquarelles qui se mêlent et se fondent les unes dans les autres, créant de nouvelles nuances d'innovation. Prenons l'exemple de la convergence des domaines physiques et numériques : Les robots intègrent des jumeaux numériques, la réalité augmentée enrichit notre perception de l'espace, l'Edge AI insère l'intelligence numérique directement dans le tissu de notre monde physique, l'ingénierie biologique transforme le vivant en plateforme programmable.

Cette convergence n'est pas accidentelle, mais reflète l'évolution naturelle de l'écosystème technologique. Tout comme les systèmes biologiques deviennent plus complexes et interconnectés au fil du temps, notre paysage technologique développe sa propre forme de symbiose. Les technologies climatiques, par exemple, ne se limitent plus aux énergies renouvelables. Elles incarnent une danse sophistiquée mêlant l'optimisation par l'IA, les matériaux avancés et les capacités de l'informatique quantique. Si l'OCDE parle de « transitions jumelles » entre transformation numérique et durabilité, cette dynamique pourrait aussi être vue comme une réunion de famille où toutes les technologies découvrent enfin leur ADN commun.

Pour les décideurs, **cette convergence représente à la fois un défi et une opportunité**. Les investisseurs en capital-risque ne peuvent plus se contenter de parier sur des technologies individuelles ; ils doivent comprendre l'écosystème de l'innovation, où la valeur émerge souvent de combinaisons inattendues. Les stratèges d'entreprise, de leur côté, gagneraient à délaisser une vision d'architectes bâtissant des structures isolées, pour adopter celle de concepteurs d'écosystèmes capables d’intégrer et d'harmoniser différentes technologies

Le secteur public est peut-être confronté au défi le plus intrigant. Comment créer des cadres politiques pour des technologies qui refusent de rester dans les cases qui leur sont assignées ? C'est un peu comme tenter de réguler une rivière qui ne cesse de changer

de cours : nécessaire, mais exigeant une approche fondamentalement nouvelle de la gouvernance.

Ce qui rend ce moment particulièrement captivant, c'est la place centrale qu'occupent la sécurité et la confiance dans ce récit de convergence. Il ne s'agit pas seulement de développer de nouvelles capacités, mais de les développer de manière responsable. L'accent mis par le Tech Radar sur la « technologie pour la confiance numérique » n'est pas simplement un autre domaine d'intérêt. Cela revient à reconnaître que, dans notre avenir technologique interconnecté, la confiance n'est pas facultative, mais fondamentale.

Les implications pour l'avenir sont claires : le succès dans cette nouvelle ère ne viendra pas de la maîtrise des technologies individuelles, mais de la compréhension de leurs points de convergence. Il ne suffit pas de savoir comment fonctionne l'IA, l'informatique quantique ou les matériaux avancés. Les vraies connaissances, les vraies innovations, viendront de la compréhension de la manière dont ces éléments s'assemblent pour résoudre des défis mondiaux de plus en plus complexes.

Nous ne sommes pas face à une simple tendance technologique, mais à une refonte fondamentale de la manière dont l'innovation se produit. À mesure que les technologies continuent de converger, elles créent quelque chose de plus grand que la somme de leurs parties. La question n'est pas de savoir si cette convergence va se poursuivre, mais si nous sommes prêts à adapter notre façon de penser, nos organisations et nos stratégies pour en tirer pleinement parti.

L'ère de la convergence technologique est arrivée. Et bien qu'elle soit plus complexe que les précédentes, elle est aussi infiniment plus fascinante.

Principes et méthodes

L'intelligence collective au service de la décision stratégique

Cette seconde édition du Tech Radar reste fidèle à notre ambition d'origine : offrir aux décideurs un outil de veille pratique, accessible et évolutif afin de les aider à naviguer dans le paysage technologique de plus en plus complexe et interconnecté.

Pour cela, nous avons constitué une communauté encore plus large de spécialistes désireux de partager leurs connaissances, leurs analyses et leurs convictions. Chacun dans leur domaine, nos Tech Heroes se sont entourés d'experts au sein du groupe Capgemini à l'échelle internationale et ont sélectionné les technologies qui leur semblent devoir jouer un rôle déterminant dans le futur. Au total, ce sont ainsi une soixantaine 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.

Le Tech Radar 2025 présente plusieurs évolutions notables par rapport à la version précédente. D'abord, le nombre de technologies analysées a été porté à plus de 60, contre une cinquantaine dans l'édition 2024, reflétant l'accélération de l'innovation et l'émergence de nouvelles solutions structurantes. Les domaines technologiques ont également été affinés pour mieux refléter les dynamiques actuelles du marché : le domaine « Chipsets & Semiconductors » a été intégré au domaine « Engineering Tech », tandis qu'un nouveau territoire d'exploration, « Engineering Biology », fait son entrée. De même, la nomenclature du domaine « (Gen)AI & Computer Vision » évolue en « Data & (Gen)AI », reconnaissant ainsi le rôle fondamental des données dans l'écosystème de l'intelligence artificielle.

Pour obtenir un document synthétique, qui permette d'embrasser rapidement l'état des technologies, mais aussi pour **objectiver l'analyse, approfondir la réflexion** et **dépasser la subjectivité d'un ressenti,** fût-il celui d'un spécialiste, 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 entraîner des conséquences 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 évaluons le potentiel d'impact des technologies émergentes sur **trois dimensions** où s'expriment **la responsabilité et l'engagement des entreprises :**

PLANET La technologie a des conséquences sur l'environnement. Elle peut affecter 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 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…

PRODUCT La technologie a des conséquences sur les objets et les systèmes du monde matériel. Elle peut affecter 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, cette année, nous avons affiné notre grille d'évaluation des impacts pour mieux refléter la réalité des projets technologiques et leurs effets concrets. Notre framework permet désormais de distinguer plus clairement les technologies à fort potentiel positif de celles présentant des risques ou des externalités négatives. Pour chacun des trois axes Planet, People, Product nous avons ainsi élaboré une liste d'une dizaine de questions permettant de couvrir les sujets clés :

PLANET conception, ressource et utilisation

PEOPLE facilitation du quotidien / accessibilité, équilibre / justice / éthique, sécurité / protection

PRODUCT Products : efficacité, sécurité, augmentation / création

Voici quelques exemples de questions « la technologie est-elle conçue de façon durable et responsable ?", " la technologie facilite-t-elle le quotidien des individus ?", avec des réponses s'échelonnant de Low à High selon cette échelle :

- **Low :** Les bénéfices potentiels pèsent moins lourd que les potentiels risques pour le P concerné
- **Medium :** Les bénéfices potentiels sont à peu près équivalents aux potentiels risques pour le P concerné
- **High :** Les bénéfices potentiels pèsent plus lourds que les potentiels risques pour le P concerné

En passant chaque technologie au crible de ce questionnaire, nos Tech Heroes ont ainsi déterminé une **note sur chacun des trois axes considérés.** Ceci permet d'avoir une idée de son impact 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 cette boussole ? Une base de réflexion et de discussion

Cette nouvelle version du Tech Radar, qui présente les **62 technologies retenues** cette année, sélectionnées et analysées par nos **Tech Heroes et leurs contributeurs,** 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, 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.**

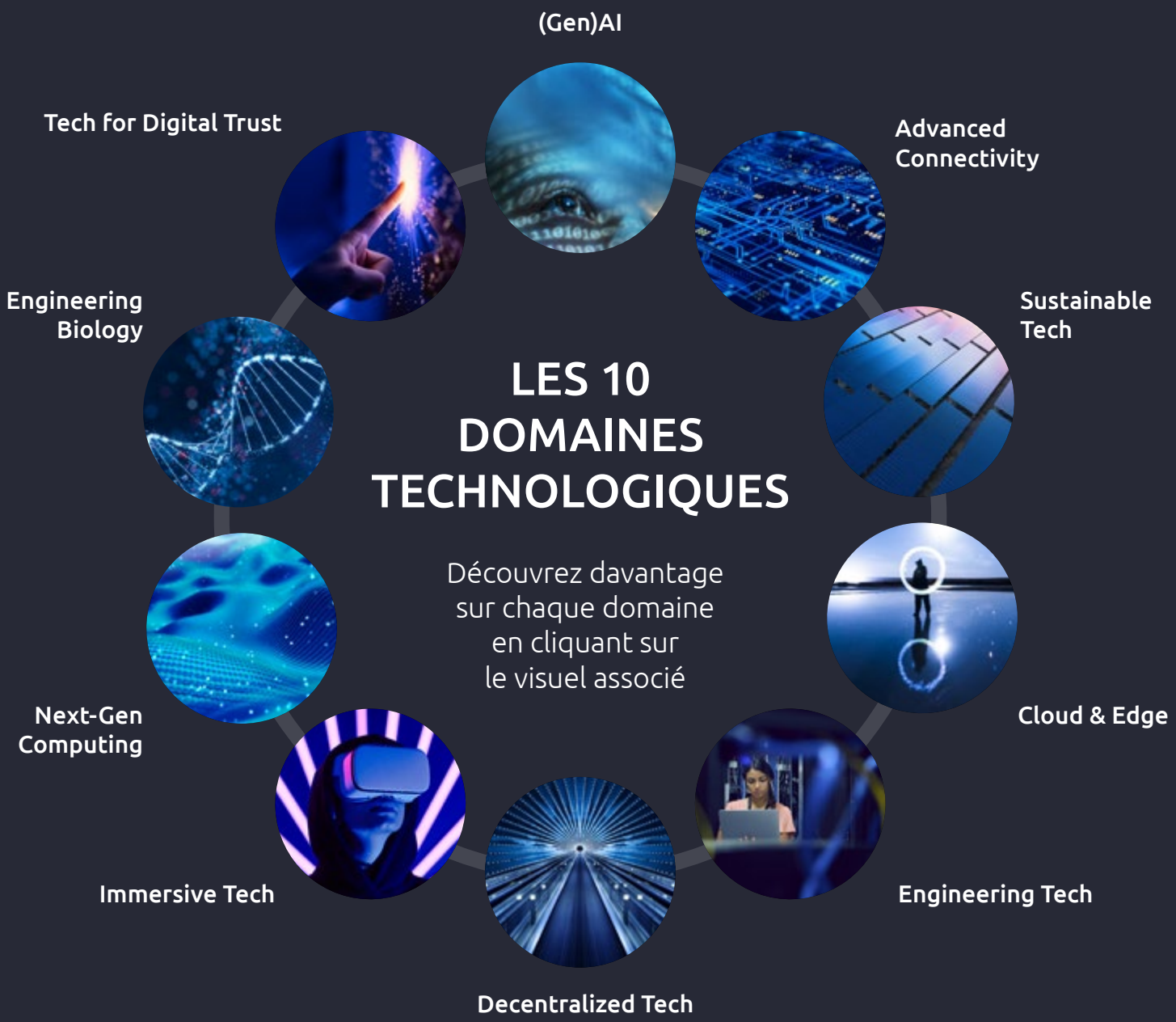
Pour les dirigeants, ce Tech Radar est en effet une base de réflexion, au travers d'informations concises et éclairées. Mais, elle doit également servir **de base de discussion avec vos/nos experts** et, plus largement, avec **toute une communauté** qui pourra se rassembler autour de ce travail. Pour cela nous recommandons de **l'utiliser comme un point de départ** pour construire votre propre **boussole** 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 :

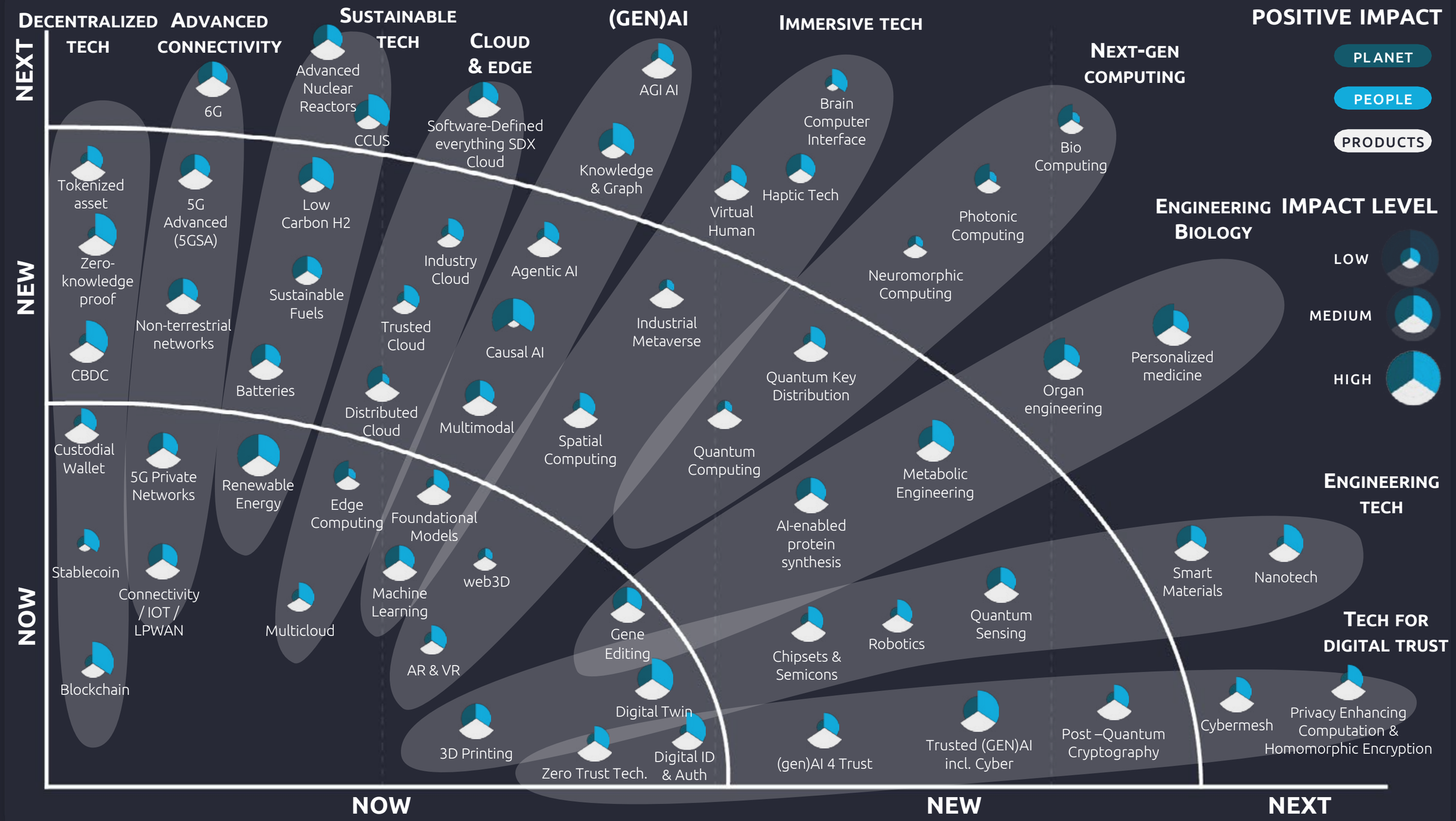
- **Cybersécurité :** existe-t-il des pratiques et des solutions de cybersécurité connues pour cette technologie ?
- **Résilience :** cette technologie est-elle capable de fonctionner dans des conditions complexes et inattendues ?
- **Conformité et lutte contre la fraude :** dans quel cadre législatif 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 ?

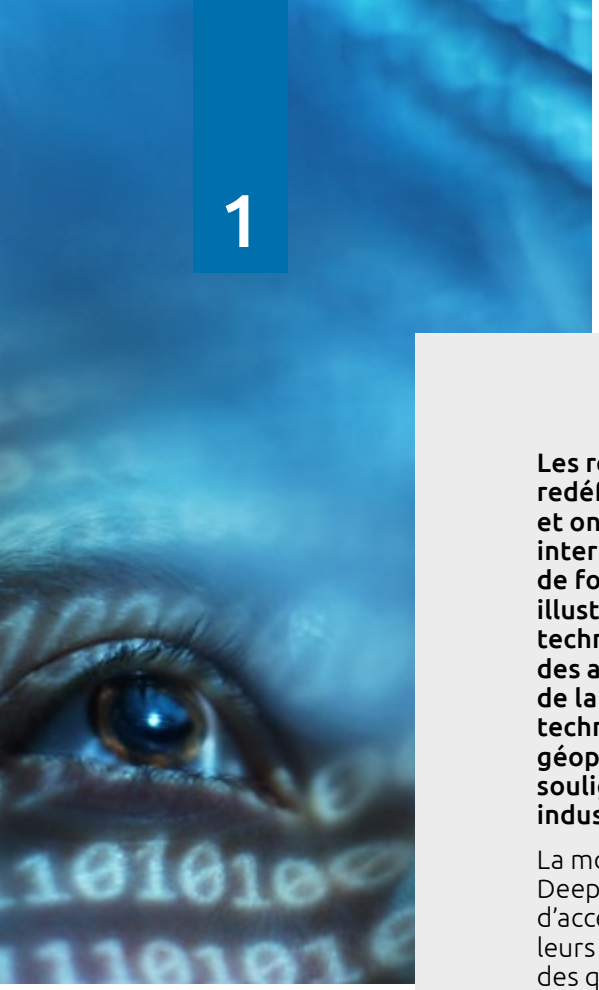
Alors que la technologie s'apprête à façonner notre futur, il est capital que nous nous nourrissions tous de l'expérience et de l'expertise de chacun pour faire les bons choix en toute connaissance de cause.



Tech Radar

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





1 (Gen)AI

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

Les récentes avancées de l'intelligence artificielle ont redéfini les contours de la transformation numérique et ont confirmé l'importance stratégique et la dimension internationale de l'IA. Les progrès rapides des modèles de fondation — comme GPT-4o, Gemini 2.0 ou Sora — illustrent une nouvelle phase de sophistication technologique, marquée par des modèles multimodaux, des agents IA proactifs et une adoption croissante de la GenAI dans les outils métiers. Cette dynamique technologique s'accompagne d'une compétition géopolitique accrue autour de la maîtrise de l'IA, soulignant son rôle structurant dans les équilibres industriels et économiques mondiaux.

La montée en puissance de nouveaux acteurs, comme DeepSeek en Chine, témoigne de la volonté de certains États d'accélérer leur souveraineté technologique en développant leurs propres modèles de fondation. Ces initiatives posent des questions clés sur la provenance et la qualité des données d'entraînement, les biais culturels potentiels intégrés aux modèles, ainsi que les standards de transparence et de sécurité. La rivalité technologique se double d'une bataille sur les données elles-mêmes : qui contrôle la donnée contrôle l'intelligence.

Dans ce contexte, la donnée devient un actif stratégique. L'essor de technologies comme les graphes de connaissances, la RAG (retrieval-augmented generation) ou encore l'IA causale, permet de structurer, contextualiser et rendre explicables les décisions. Le passage à l'échelle est désormais mieux maîtrisé grâce à la montée en compétence des équipes, la simplification des outils et la spécialisation sectorielle de nombreux modèles (SLM, tabulaires, temporels…).

Enfin, l'IA agit de plus en plus comme un catalyseur transversal pour d'autres technologies – qu'il s'agisse de cloud, d'edge computing, de cybersécurité ou encore de jumeaux numériques – renforçant leur impact et accélérant leur adoption. La convergence entre données, IA et infrastructures devient un enjeu clé de compétitivité, de résilience et de souveraineté numérique.

Machine Learning (NOW)

Le Machine Learning (ML), branche de l'IA, permet aux systèmes informatiques **d'apprendre et de s'améliorer à partir de données, sans programmation explicite.** Cette technologie est omniprésente dans notre quotidien : recommandations personnalisées sur les plateformes de streaming, amélioration des assistants vocaux ou encore détection de fraude.

Les applications industrielles du ML se multiplient, portées par la recherche d'efficacité opérationnelle. La montée en puissance de la GenAI, une sous-discipline du ML, transforme de nombreux secteurs. En 2024, Capgemini a observé une adoption significative de la GenAI au sein des organisations. Selon le *Capgemini Research Institute*, 80% des entreprises ont accru leurs investissements dans la GenAI depuis 2023, et 20% les ont maintenus. Par ailleurs,

24% des organisations ont intégré la GenAI dans certaines ou la plupart de leurs fonctions, une progression notable par rapport aux 6% observés l'année précédente[3].

À mesure que le ML gagne en maturité, il se spécialise tant sur le plan sectoriel (santé, finance, mobilité, énergie) que scientifique (GenAI, vision par ordinateur, prévision). Les petits modèles de langage (SLM), conçus pour comprendre et générer du langage dans un domaine spécifique, illustrent cette évolution. Ils offrent ainsi de nombreuses opportunités pour réinventer les modèles d'affaires et les processus opérationnels[4].

Enfin, le passage à l'échelle, autrefois complexe, est désormais mieux maîtrisé, grâce à une gestion plus efficace des données, à la simplification des outils et à la montée en compétence des équipes.

Foundational models (NOW)

Les modèles de fondation représentent une avancée majeure dans le domaine de l'IA. Conçus pour être polyvalents, ils peuvent **s'adapter à une grande variété de tâches sans nécessiter d'entraînement spécifique** pour chacune d'elles.

Ces modèles s'appuient généralement sur des architectures de type *transformer*, utilisant des mécanismes d'attention pour pondérer l'importance des différentes parties des données d'entrée, offrant ainsi une compréhension contextuelle approfondie. Un atout clé de ces architectures réside dans leur recours à l'apprentissage auto-supervisé, qui leur permet d'apprendre de manière autonome à partir de vastes corpus de données. Des modèles comme BERT *(Bidirectional Encoder Representations from Transformers)*[5] ou GPT *(Generative Pre-trained Transformers)* en sont les exemples les plus connus.

Aujourd'hui, ces modèles ont significativement évolué **grâce à l'émergence de nouvelles architectures,** comme le *Mixture of Experts*, et à des techniques d'entraînement innovantes : *reinforcement learning*, RLHF *(Reinforcement Learning with Human Feedback)*, ou encore *supervised finetuning*. Les applications se multiplient, avec des modèles spécialisés dans les séries temporelles (TimeGPT, Chronos), les données tabulaires (TabPFN), les vidéos (Sora), ou encore des modèles multimodaux (GPT-4o, Gemini 2.0 Flash, Pixtral 12B) capables de traiter texte, son et image de façon intégrée.

De nouvelles tendances techniques émergent : modèles basés sur les graphes, distillation de modèles pour réduire leur empreinte énergétique, ou encore exploitation plus fine des données tabulaires. Ces dernières, encore peu matures, nécessitent des expérimentations en conditions réelles. À noter enfin : les exigences de conformité à l'*AI Act* européen, qui entreront en vigueur en août 2025, devront désormais être intégrées à tout développement de modèle de fondation.

Causal AI (NEW)

La plupart des systèmes d'IA traditionnels peinent à distinguer la corrélation de la causalité – comprendre le "pourquoi" derrière les observations. C'est là qu'intervient l'IA causale, une branche émergente visant à doter les machines **d'une compréhension des relations de cause à effet**. L'importance de l'IA causale est immense. Contrairement aux modèles prédictifs classiques qui peuvent échouer si les conditions changent, l'IA causale cherche à modéliser les mécanismes sous-jacents qui génèrent les données. Elle utilise des concepts issus de l'inférence causale, comme les graphes causaux (souvent basés sur les travaux de Judea Pearl, pionnier du domaine) et le raisonnement contrefactuel ("Que ce serait-il passé si...?"). Cela permet de construire des systèmes plus robustes, explicables et capables d'anticiper l'effet d'interventions. Cette capacité est cruciale pour la prise de décision dans des domaines critiques comme la médecine (efficacité des traitements), l'économie (impact des politiques) ou la lutte contre la désinformation.

Développer des systèmes d'IA causale présente des défis notables. L'inférence causale nécessite souvent des hypothèses fortes sur le monde, une connaissance experte du domaine, ou des données issues d'expérimentations contrôlées, qui ne sont pas toujours disponibles. Valider la structure causale apprise reste complexe. Néanmoins, les progrès sont rapides. Des chercheurs développent de nouveaux algorithmes capables **d'inférer des relations causales à partir de données observationnelles,** souvent en les combinant avec le Deep Learning. Des bibliothèques logicielles open-source, comme DoWhy[6], rendent ces techniques plus accessibles.

Dans l'avenir, l'intégration plus poussée avec l'apprentissage par renforcement pourrait mener à des agents capables de planifier des

3 - https://www.capgemini.com/fr-fr/perspectives/publications/ia-generative-organisations-2024/
4 - https://www.capgemini.com/in-en/insights/expert-perspectives/the-next-industrial-revolution-multi-agent-systems-and-small-gen-ai-models-are-transforming-factories/
5 - [1810.04805] bert: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding
6 - https://www.pywhy.org/dowhy/v0.12/

actions en anticipant leurs conséquences réelles (MATMCD[7]: Multi-Modal Integration with Tool-Augmented LLM Agents). La recherche continue, vise à automatiser davantage la découverte causale et à gérer des systèmes de plus en plus complexes. L'IA causale est une étape clé vers une IA qui ne se contente pas de prédire, mais qui comprend véritablement le monde.

Multimodal (NEW)

L'IA multimodale constitue une avancée majeure, en permettant l'intégration et le traitement simultané de plusieurs types de données — texte, image, audio et vidéo. Cette capacité **renforce la compréhension contextuelle,** rapprochant les systèmes d'IA d'une **perception multisensorielle** proche de celle des humains.

L'année 2024 a marqué un tournant avec l'émergence de modèles nativement multimodaux. Le modèle Gemini, développé par Google, a démontré des performances remarquables sur une large gamme de tâches complexes, de la génération créative à l'analyse de données[8]. En parallèle, GPT-4o d'OpenAI s'est illustré par sa capacité à traiter la voix en temps réel avec une faible latence, ouvrant la voie à des applications concrètes dans des domaines comme la relation client.

En 2025, **l'IA multimodale devrait s'intégrer plus largement aux processus métiers.** Ces systèmes deviendront plus proactifs, capables d'anticiper les besoins et de formuler des suggestions avant même qu'une demande ne soit exprimée. Dans le secteur de la santé, par exemple, des modèles spécialisés pourraient révolutionner le diagnostic en combinant analyse d'images radiologiques et données textuelles des dossiers patients[9].

Dans l'automobile, les systèmes de conduite autonome bénéficient d'une meilleure fusion des données issues de capteurs multiples, interprétées en temps réel. La version Gemini 2.0 Flash offre déjà des performances avancées pour le traitement simultané de flux visuels, vocaux et vidéo. Dans la grande distribution, l'IA multimodale optimise la gestion des stocks et enrichit l'expérience client en croisant des données visuelles, textuelles et transactionnelles.

Cette convergence technologique transforme profondément l'interaction homme-machine, ouvrant la voie à des assistants plus intuitifs et à des applications innovantes dans tous les secteurs.

Agentic AI (NEW)

L'année 2024 a été marquée par l'émergence des agents IA comme nouvelle tendance dominante dans l'IA. Contrairement aux simples copilotes ou assistants conversationnels, ces agents se distinguent par leur **capacité à être proactifs, semi-autonomes et à amorcer des actions basées sur des données sans intervention humaine directe**[10]. Par exemple, dans le domaine de l'éducation, ces agents peuvent analyser des réponses à des tests, identifier des lacunes, et proposer des exercices personnalisés pour soutenir l'apprentissage.

Les agents IA devraient franchir une nouvelle étape grâce à deux évolutions majeures : les systèmes multi-agents puis l'auto-apprentissage.

Les systèmes multi-agents permettent à plusieurs agents spécialisés de collaborer pour accomplir des tâches complexes. Un agent principal peut déléguer des sous-tâches à d'autres agents experts (analyse de données, génération de contenu…), créant ainsi un écosystème décentralisé mais coordonné. Cela ouvre la voie à l'automatisation de processus inter-domaines, à une meilleure efficacité opérationnelle et à la réduction des coûts ; la chaîne d'approvisionnement est un cas d'usage approprié faisant intervenir la gestion des stocks, l'optimisation des itinéraires de transport, la prévision de la demande et la coordination de différents acteurs (fournisseurs, fabricants, distributeurs).

Une autre avancée clé est **l'intégration de capacités d'auto-apprentissage**[11]. Les agents IA ne se contenteront plus d'exécuter des tâches prédéfinies ; ils apprendront en continu à partir de leurs interactions avec les utilisateurs et leur environnement. Cela permettra aux entreprises de bénéficier d'agents capables de s'adapter aux préférences spécifiques des utilisateurs ou aux changements contextuels sans nécessiter une reprogrammation constante. Grâce à cela, les agents seront capables de prendre des décisions de manière indépendante, en fonction des objectifs qui leur sont assignés, tout en gérant des situations imprévues et en optimisant leurs performances sans intervention humaine directe.

7 - https://arxiv.org/abs/2412.13667
8 - Google launches gemini 2.5 pro, pushing the boundaries of ai reasoning
9 - https://www.nature.com/articles/s41746-024-01208-3
10 - https://www.weforum.org/stories/2024/12/ai-agents-empower-human-potential-while-mitigating-risks/
11 - https://www.deeplearning.ai/the-batch/issue-281/

Knowledge & Graph (NEXT)

L'adoption des graphes de connaissances progresse rapidement, en particulier dans des secteurs comme la pharmaceutique, où ils facilitent l'analyse et la visualisation de données complexes issues du monde réel. En structurant les informations de manière relationnelle, ces technologies **améliorent la prise de décision** en matière de réglementation, de stratégie commerciale et de développement produit, tout en réduisant le recours à des recherches manuelles chronophages[12]. Certaines entreprises s'en servent, par exemple, pour identifier des relations cachées entre sources de données disparates, optimisant ainsi la conception de nouveaux traitements et la gestion des risques.

Parallèlement, les Graph Neural Networks (GNN) renforcent leur compatibilité avec l'IA. Des projets comme GraphCast pour la prévision météorologique ou AlphaChip de Google DeepMind pour la conception de semi-conducteurs illustrent cette convergence. DeepMind a également dévoilé AlphaFold 3, repoussant les limites de la prédiction de structures protéiques avec une précision inégalée.

En 2025, les graphes de connaissances devraient jouer un rôle structurant dans le développement de l'IA, en améliorant la contextualisation, la traçabilité et l'explicabilité des modèles. Leur capacité à relier des données hétérogènes devient stratégique, notamment dans des environnements complexes comme la santé ou l'industrie.

Face à l'épuisement des données publiques, les entreprises se tournent vers leurs propres données internes, dont 80 à 90% sont encore non structurées[13]. L'adoption de techniques comme la RAG (Retrieval-Augmented Generation) devient alors essentielle pour enrichir et valoriser ces actifs.

La convergence entre graphes et IA offre un levier décisif **pour transformer l'information en valeur métier.** Les entreprises qui réussiront à industrialiser ces approches renforceront leur capacité à innover, à prendre des décisions éclairées et à garder une longueur d'avance.

AGI AI (NEXT)

L'intelligence artificielle générale (AGI) — **une IA dotée de capacités cognitives comparables à celles de l'humain** dans divers domaines, capable d'**acquérir de nouvelles compétences au-delà de son entraînement initial** — est devenue un sujet central avec les avancées rapides des modèles génératifs en 2024 et début 2025. Les progrès en matière de raisonnement, d'agenticité et de modèles de fondation ont ravivé les spéculations sur la proximité d'une cognition artificielle de type humain.

Aujourd'hui, les capacités AGI sont évaluées via le benchmark ARC-AGI-1 pour mesurer la capacité d'un modèle à raisonner, s'adapter et résoudre des problèmes généraux[14]. Ce test met en évidence des tâches simples pour un humain mais encore complexes pour une IA, illustrant les limites que la simple montée en échelle ne permet pas de franchir. Entre 2020 et 2024, les performances sont passées de 0% (GPT-3) à 5% (GPT-4o). Début 2025, DeepSeek R1 et OpenAI o1 atteignent 15 à 20%[15]. Un modèle optimisé, DeepSeekGPT-o3, a même atteint 87,5%[16], mais à un coût énergétique et computationnel très élevé. Une nouvelle version du benchmark, ARC-AGI-2[17], a été introduite en réponse : aucun modèle ne s'en approche pour l'instant.

La course à l'AGI s'intensifie, portée par des acteurs comme OpenAI, Google ou Meta. Cette compétition entraîne une **complexification rapide des modèles,** mais soulève aussi des interrogations fondamentales. Pour Yann LeCun (Meta), la simple montée en échelle des LLM ne suffira pas[18]. Il appelle à de nouveaux paradigmes, combinant modélisation du monde, apprentissage hiérarchique et expériences réelles. Sam Altman (OpenAI) défend au contraire l'idée que les capacités matérielles actuelles sont déjà suffisantes pour atteindre l'AGI à court terme[19].

Malgré ces divergences, un consensus se dessine sur l'impact de l'IA en 2025 : les agents IA s'intègrent désormais dans les environnements professionnels, transformant les dynamiques organisationnelles[20]. Cette évolution marque un tournant non seulement technologique, mais aussi sociétal, nécessitant une gouvernance internationale renforcée pour encadrer les enjeux éthiques, industriels et stratégiques liés à l'AGI.

12 - https://arxiv.org/abs/2012.05716
13 - https://www.purestorage.com/fr/knowledge/what-is-unstructured-data-management.html
14 - [1911.01547] on the measure of intelligence
15 - https://arcprize.org/blog/r1-zero-r1-results-analysis
16 - https://arcprize.org/blog/oai-o3-pub-breakthrough
17 - https://arcprize.org/blog/announcing-arc-agi-2-and-arc-prize-2025
18 - https://time.com/6694432/yann-lecun-meta-ai-interview/
19 - https://www.theverge.com/2024/12/4/24313130/sam-altman-openai-agi-lower-the-bar
20 - https://blog.samaltman.com/reflections

2

Advanced connectivity

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

Les réseaux télécoms jouent un rôle fondamental en tant qu'épine dorsale du monde numérique, soutenant nos usages quotidiens, nos expériences, ainsi que l'ensemble des processus métiers et industriels. Ils sont omniprésents et prennent des formes multiples : réseaux fixes et mobiles, publics, privés ou hybrides, ou encore infrastructures spécialisées dans des secteurs critiques tels que le ferroviaire, l'énergie ou la défense.

L'extension de leur couverture, notamment par l'intégration progressive de la connectivité satellitaire, renforce la promesse d'une connectivité ubiquitaire. En parallèle, les réseaux mobiles poursuivent leur évolution (5G, 5G Advanced, 6G), marquée par une montée en puissance continue de la softwarisation — cloudification, edge, virtualisation, désagrégation — et, depuis 2024, par l'introduction croissante de l'IA.

L'édition 2025 du Mobile World Congress a confirmé cette tendance : l'IA devient un levier structurant pour piloter la performance, automatiser la supervision, renforcer la sécurité et améliorer la qualité des services réseau.

Dans un contexte géopolitique tendu, les enjeux de souveraineté — sur les chipsets, le spatial ou encore les standards — s'invitent au cœur des stratégies nationales et sectorielles, laissant entrevoir une possible fragmentation technologique.

Pour les entreprises, et notamment pour les décideurs IT, ces évolutions posent une question stratégique essentielle : quels choix de connectivité adopter pour rester compétitifs, résilients et souverains à long terme ?

Connectivity / IOT / LPWAN (NOW)

L'IoT regroupe l'ensemble des technologies permettant de **connecter des objets physiques à Internet** — capteurs, véhicules, équipements industriels, caméras ou appareils domestiques — dans le but **d'optimiser les opérations, de renforcer la prise de décision et de concevoir des services plus intelligents.**

En 2025, la dynamique reste soutenue, portée notamment par les réseaux à faible consommation énergétique (LPWAN) tels que LoRaWAN ou NB-IoT, qui facilitent la connectivité longue portée tout en limitant la consommation d'énergie. Le déploiement de la 5G RedCap (Reduced Capability) complète cette évolution en proposant une connectivité optimisée pour les objets intelligents, à moindre coût. Par ailleurs, les progrès dans

la récupération d'énergie permettent l'émergence de capteurs autonomes, réduisant ainsi la dépendance aux batteries[21].

Le nombre de dispositifs IoT devrait atteindre 41 milliards d'ici fin 2025, générant un volume massif de données et nécessitant une montée en puissance des capacités de calcul en périphérie de réseau (Edge Computing)[22]. L'intégration croissante de l'IA permet aux objets connectés de s'adapter à leur environnement, d'apprendre de manière continue et de prendre des décisions locales, sur des terminaux de plus en plus compacts et autonomes.

Les cas d'usage se diversifient, combinant données brutes, flux audio ou vidéo, et traitements analytiques réalisés en local. Cette évolution ouvre la voie à une nouvelle génération de systèmes embarqués intelligents, réactifs, et économes, capables de fonctionner sans supervision humaine directe — un levier clé pour l'optimisation des infrastructures critiques et la transformation numérique des territoires, des usines ou du bâtiment.

5G Private Networks (NOW)

Les réseaux 5G privés offrent aux entreprises des solutions de connectivité dédiées, **améliorant la sécurité, la latence et la bande passante pour des applications critiques.** Les déploiements de réseaux 5G privés ont augmenté de manière notable en 2024. Les États-Unis ont enregistré une croissance de 24%, suivis par le Royaume-Uni avec une hausse de 11%. Cette expansion est soutenue par un écosystème de fournisseurs et de prestataires de services, ainsi que par des POC réussies dans des domaines tels que l'industrie manufacturière et la logistique[23].

En 2025, la dynamique des réseaux 5G privés devrait s'intensifier, avec une extension des déploiements et une diversification des cas d'utilisation. Les hyperscalers, proposent désormais des solutions de réseaux mobiles privés, souvent en partenariat avec des opérateurs mobiles ou des fournisseurs de réseaux[24]. L'edge computing et l'intégration de l'IA et du Machine Learning au sein de ces réseaux permettent des applications avancées telles que l'analyse en temps réel et les opérations autonomes[25]. De plus, une attention particulière est portée à la sécurité, à la conformité réglementaire et au développement de modèles de déploiement flexibles et rentables, comme le Network Slicing et les architectures natives du cloud.

Ces avancées positionnent les réseaux 5G privés comme des catalyseurs essentiels de la transformation numérique, **offrant des solutions sur mesure pour répondre aux exigences spécifiques de chaque secteur** tels que l'industrie manufacturière ou elle permet de connecter les usines intelligentes améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle et la santé pour le déploiement de réseaux privés dans les hôpitaux afin de faciliter le diagnostic à distance.

5G Advanced (5G SA) (NEW)

Les réseaux 5G Standalone (5G SA) marquent une étape majeure dans l'évolution des infrastructures télécoms. Contrairement à la 5G non autonome, la 5G SA repose sur une **architecture entièrement indépendante de la 4G,** permettant d'exploiter pleinement les promesses technologiques de la 5G : latence ultra-faible, débits améliorés, qualité de service garantie (QoS) et fonctionnalités avancées comme le Network Slicing ou la VoNR (Voice over New Radio), qui renforce la fluidité et la qualité des appels.

En 2024, les déploiements s'intensifient : 60 opérateurs ont lancé commercialement leurs offres 5G SA dans 34 pays, et 88 autres sont en phase de préparation[26]. L'Europe, jusque-là en retrait, a comblé une partie de son retard avec des lancements au Royaume-Uni, en Allemagne et en Italie. En France, Free Mobile a ouvert la voie avec une offre 5G SA en septembre 2024, mettant en avant les performances de la VoNR pour une expérience utilisateur enrichie. Cette accélération est également portée par la montée en puissance des terminaux compatibles, qui représentent 70 % du parc mobile en juin 2024[27].

Les cas d'usage se diversifient. Aux États-Unis, T-Mobile a lancé "T-Priority", un service de Network Slicing dédié aux services d'urgence à New York et Los Angeles, assurant une connectivité fiable même en période de forte affluence[28]. En Inde, Jio Reliance s'appuie sur la 5G SA pour développer des services de cloud gaming mobile et des accès fixes sans fil ("5G Air Fiber FWA") à destination des zones rurales[29]. Deutsche Telekom et Verizon explorent également de nouveaux usages grand public, comme le streaming vidéo ultra-haute qualité et les appels vidéo renforcés via Network Slicing[30].

21 - redcap, the 5g for wearables and ai, will get its first devices soon | the verge
22 - https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/policies/next-generation-internet-things
23 - https://gsacom.com/paper/private-mobile-networks-september-2024/
24 - https://www.techtarget.com/whatis/feature/5-predictions-about-5g-adoption-in-2021-and-beyond?
25 - https://www.edgecomputing-news.com/news/edge-computing-market-to-be-worth-111-3-billion-by-2028/
26 - faster speeds and the promise of new use cases is driving 5g sa adoption - membership
27 - 5g standalone deployment – mobility report - ericsson
28 - T-Mobile formally launches T-Priority for first responders, powered by 5G network-slicing technology
29 - jio boasts 5g network slices, considers 5g private network uses
30 - verizon is using 5g network slicing for better video calling | the verge

5G Non-Terrestrial Networks (5G NTN) (NEW)

Le développement des constellations de satellites en orbite basse (LEO) transforme la connectivité globale. Des acteurs comme Starlink, OneWeb et le projet Kuiper d'Amazon redéfinissent l'accès à Internet en proposant une **couverture mondiale**, des **débits accrus** et une **latence considérablement réduite** par rapport aux satellites géostationnaires. Ces réseaux offrent une solution concrète pour connecter des zones jusqu'ici exclues des réseaux terrestres, contribuant à combler la fracture numérique.

Starlink, avec plus de 5 000 satellites en orbite, dispose aujourd'hui de la constellation la plus dense, soutenue par des investissements massifs[31]. De son côté, OneWeb a déployé environ 648 satellites[32] pour offrir une couverture globale, tandis qu'Amazon a lancé ses deux premiers satellites de test pour le projet Kuiper à l'automne 2023.

Cette montée en puissance des LEO s'accompagne d'une **convergence croissante avec les réseaux terrestres**, dans le cadre des réseaux non terrestres (NTN). Une avancée notable est le « direct-to-device », qui permet aux smartphones ou capteurs IoT de se connecter directement aux satellites sans modification matérielle. Des cas d'usage concrets émergent, comme le partenariat Apple–Globalstar pour les fonctions SOS de l'iPhone 14[33] ou la collaboration T-Mobile x Starlink pour offrir une couverture directe via satellite.

AST SpaceMobile illustre une approche « pure player » ambitieuse, visant à déployer 60 satellites d'ici 2026 pour offrir une connectivité mobile 5G à l'échelle mondiale[34].

Enfin, cette intégration entre infrastructures terrestres et orbitales se structure à travers les travaux de **normalisation du 3GPP**, qui visent une intégration native de cette convergence dans la future architecture 6G.

6G (NEXT)

La 6G, attendue à l'horizon 2030, constitue une évolution optimisée de la 5G, **améliorant ses performances existantes** plutôt que d'introduire une rupture technologique.

Elle promet **des débits massifs, une latence ultra-faible et une capacité réseau augmentée**, tout en intégrant de nouvelles technologies comme les bandes térahertz (THz) et l'IA pour une gestion plus efficace des ressources.

Aujourd'hui, les recherches sur la 6G se concentrent sur l'exploration de nouvelles bandes de fréquences et l'amélioration de l'interopérabilité des réseaux. Les bandes sub-térahertz (90 GHz à 300 GHz) font l'objet d'études avancées pour offrir des débits inégalés, bien que leur sensibilité aux obstacles pose encore des défis techniques. Par ailleurs, la convergence entre réseaux terrestres, aériens et satellitaires se précise, avec des expérimentations visant à assurer une couverture mondiale homogène, notamment grâce aux constellations de satellites en orbite basse (LEO).

À l'horizon proche, la transition vers la 5G-Advanced sert de tremplin vers la 6G. La recherche s'oriente vers l'optimisation de la latence, visant des délais de transmission de l'ordre de la microseconde, rendant possibles des applications critiques comme les communications industrielles autonomes et la réalité augmentée immersive. L'intégration de l'IA dans la gestion du réseau devient une priorité, avec des algorithmes capables d'optimiser dynamiquement l'allocation des ressources pour réduire l'empreinte énergétique et améliorer l'efficacité spectrale[35].

L'expérimentation des bandes THz permettrait de multiplier par 100 les capacités de transmission par rapport à la 5G, bien que nécessitant des avancées en matériaux et conception d'antennes. En parallèle, les initiatives sur la connectivité omniprésente se développent, avec des projets visant à **intégrer nativement les réseaux NTN (Non-Terrestrial Networks) dans l'architecture 6G** pour une continuité de service sans interruption[36].

31 - https://www.spacex.com/
32 - OneWeb New Batch of Satellites Launched by SpaceX | Space Voyaging
33 - https://www.apple.com/newsroom/2022/09/apple-announces-iphone-14-pro-and-iphone-14-pro-max/
34 - https://ast-science.com/
35 - [2311.01055] from 5g to 6g: revolutionizing satellite networks through trantor foundation
36 - explore the ericsson mobility report november 2024

3

Sustainable Tech

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

Face à l'urgence climatique, à la pression réglementaire croissante et aux tensions géopolitiques sur l'accès aux ressources, le secteur énergétique entre dans une nouvelle ère de transformation systémique. L'année 2024 a été marquée par l'accélération de la décarbonation des mix énergétiques mondiaux, portée par la montée en puissance des énergies renouvelables (solaire, éolien), l'essor de nouvelles filières (carburants durables, hydrogène bas carbone, batteries de nouvelle génération), et l'émergence de technologies de rupture (réacteurs modulaires, CCUS, computing quantique appliqué à l'énergie).

Dans ce contexte, les gouvernements, les industriels et les grands acteurs numériques réorientent massivement leurs investissements vers des solutions bas carbone et résilientes.

L'innovation technologique joue un rôle fondamental pour répondre aux enjeux de flexibilité des réseaux, de stockage, d'optimisation de la production, et de réduction des coûts. L'IA, la modélisation numérique et le quantique deviennent des leviers clés d'optimisation et d'anticipation dans la gestion énergétique.

En parallèle, la souveraineté énergétique prend une dimension stratégique majeure, avec des politiques industrielles favorisant la relocalisation des chaînes de valeur et la sécurisation des approvisionnements critiques. L'avenir énergétique s'écrit désormais à l'intersection de l'innovation, de la durabilité et de l'indépendance, dessinant un paysage technologique en profonde recomposition.

Renewable Energy (Solar, Wind) (NOW)

Les énergies renouvelables, en particulier le solaire et l'éolien, sont des **sources d'énergie propres et inépuisables.** Ils **convertissent l'énergie captée en électricité** via des panneaux photovoltaïques ou des éoliennes, offrant ainsi une alternative durable aux énergies fossiles.

À ce jour, les énergies renouvelables continuent de croître rapidement. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la consommation mondiale d'énergies renouvelables dans les secteurs de l'électricité, du chauffage et des transports devrait augmenter de près de 60% entre 2024 et 2030, portant la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie à près de 20% d'ici 2030, contre 13% en 2023[37].

Les innovations technologiques jouent un rôle clé dans cette croissance. Parmi les avancées notables, citons les panneaux solaires de nouvelle génération, tels que les cellules à pérovskite, qui offrent une efficacité supérieure et des coûts de production inférieurs.

37 - https://www.iea.org/reports/renewables-2024/global-overview

De plus, les parcs éoliens flottants permettent d'exploiter les vents en haute mer, où ils sont plus constants et plus puissants, augmentant ainsi la capacité de production éolienne[38]. Parmi les autres technologies émergentes, citons les systèmes de stockage d'énergie de longue durée et l'intégration de l'IA dans les énergies renouvelables, tant dans les phases de conception que dans la gestion des actifs.

À l'avenir, l'accent sera mis sur l'intégration des réseaux intelligents et du stockage de l'énergie pour gérer l'intermittence des sources renouvelables. Les batteries au sodium, les supercondensateurs, les batteries à flux et le stockage d'énergie par air comprimé (CAES) gagnent en popularité en tant que solutions de stockage efficaces et durables. Dans le même temps, le développement des mini-réseaux et des micro-réseaux facilite l'électrification des zones rurales et isolées, améliorant ainsi l'accès à l'énergie propre. Ces avancées contribueront à **réduire les coûts énergétiques et l'empreinte carbone, tout en augmentant la résilience énergétique**.

De plus, les énergies renouvelables ont un impact croissant sur divers secteurs. Par exemple, les centres de données passent aux énergies renouvelables pour avoir accès à une énergie supplémentaire à faible émission de carbone à court terme, et les véhicules électriques ou les pompes à chaleur stimulent la demande d'énergie propre. Les données et les modèles d'IA seront essentiels pour permettre tous ces nouveaux usages. Alors que le monde poursuit sa transition vers un bouquet énergétique plus durable, les innovations en matière d'énergies renouvelables resteront à l'avant-garde de cette transformation.

Sustainable Fuels (Biofuels, Synthetic Fuels) (NEW)

Les carburants durables, tels que les biocarburants et les carburants synthétiques, représentent des **alternatives prometteuses aux combustibles fossiles traditionnels**. Produites à partir de biomasse ou par des procédés chimiques utilisant des sources renouvelables, elles offrent des **solutions pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et diversifier les sources d'énergie**. Ils jouent un rôle clé dans la transition énergétique, notamment dans les secteurs difficiles à électrifier, comme l'aviation et le transport maritime.

À l'échelle mondiale, la production de biocarburants s'est considérablement développée. Le Brésil, par exemple, s'attend à atteindre 32,5 milliards de litres d'éthanol par an, tandis que la production de biodiesel a augmenté de 18 % pour atteindre 8,9 milliards de litres[39]. Ces progrès sont dus à des réglementations plus strictes sur les émissions de CO_2 et à des incitations gouvernementales.

Les carburants synthétiques, produits par le biais de technologies telles que Fischer-Tropsch et Power-to-Liquid, deviennent une solution clé pour le secteur de l'aviation. Cependant, leur adoption est limitée par les coûts de production élevés et les besoins énergétiques élevés[40]. Les progrès récents en matière de captage et d'utilisation du CO_2[41] améliorent l'efficacité de la production de carburants synthétiques, ce qui permet à l'industrie aérienne de tester des mélanges contenant jusqu'à 50 % de carburants synthétiques[42], ce qui constitue une étape importante vers la décarbonisation du transport aérien.

Les biocarburants avancés de deuxième génération, issus de la biomasse non alimentaire (résidus agricoles et forestiers), gagnent en popularité. Leur marché devrait croître de 27,9 %, pour atteindre 13,48 milliards de dollars[43]. Cette croissance est tirée par l'augmentation des investissements et les avancées technologiques qui réduisent les coûts de production. Des entreprises comme Chevron, par exemple, investissent dans la production de 22 000 barils par jour de biocarburants avec son projet Geismar[44].

Low carbon Hydrogen (NEW)

L'hydrogène à faible teneur en carbone est de l'hydrogène produit à partir d'une gamme de sources dont le dénominateur commun est que l'empreinte carbone globale est **inférieure d'au moins 70%** à celle de l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles et que le dioxyde de carbone n'est pas séquestré[45]. Dans ce cadre vert, l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité zéro carbone est un outil clé pour décarboner les secteurs industriels et énergétiques. Dans l'ensemble, l'hydrogène vert réduit la dépendance aux combustibles fossiles et, dans des domaines tels que l'industrie lourde, les transports et le stockage de l'énergie joueront un rôle interdépendant aux côtés des énergies renouvelables et des batteries.

38 - *Énergie éolienne : technologies innovantes en production - France renouvelables*
39 - *les préoccupations en matière de sécurité énergétique stimuleront-elles la croissance des biocarburants en 2023 et 2024 ?*
mise à jour du marché des énergies renouvelables - juin 2023 – analyse - aie
40 - *climat : les « carburants durables » peuvent-ils remplacer le pétrole dans les avions ?*
41 - *https://www.mdpi.com/2673-3994/5/3/28*
42 - *https://www.catf.us/resource/decarbonizing-aviation-enabling-technologies-net-zero-future/*
43 - *Second Generation Biofuels Market Size & Forecast to 2029*
44 - *les majors pétrolières misent sur les biocarburants : 43 projets annoncés d'ici 2030 - energynews*
45 - *Hydrogène bas carbone : la définition du Parlement européen favorise le nucléaire – Euractiv FR*

Au cours de l'année écoulée, l'hydrogène vert s'est développé rapidement, soutenu par des **politiques publiques ambitieuses et une baisse des coûts des électrolyseurs**. BloombergNEF indique cependant que la baisse des coûts de l'hydrogène vert ne se concrétisera pas avant 2050[46]. L'Europe et l'Asie accélèrent leurs investissements dans les usines de production d'hydrogène et les infrastructures de transport.

Les innovations se concentreront sur l'amélioration des technologies d'électrolyse, telles que les électrolyseurs à oxyde solide (SOE) et les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM), qui offrent des rendements plus élevés et des coûts réduits, parallèlement à la voie d'innovation continue dans l'électrolyseur alcalin (AEL). De plus, l'intégration de systèmes énergétiques hybrides sera cruciale pour optimiser la production. Par exemple, Air Liquide prévoit de construire à Rotterdam un électrolyseur de 200 MW, capable de produire jusqu'à 23 000 tonnes d'hydrogène renouvelable par an, pour alimenter des plateformes industrielles comme celle de TotalEnergies[47].

Les grands projets industriels se multiplient. Par exemple, H2 Global Energy développe une usine d'hydrogène vert et d'ammoniac au Maroc, d'une production estimée à 28 000 tonnes par an, alimentée par 700 MW d'énergie solaire et éolienne[48].

L'hydrogène vert permet non seulement de **réduire les émissions de CO_2**, mais aussi de **stimuler la croissance économique** et de créer des emplois dans les secteurs des énergies renouvelables et de l'industrie chimique. Cependant, des défis persistent, notamment la réduction des coûts de production et le développement des infrastructures de distribution. Notre dernière étude souligne un potentiel de réduction de 9 à 12 % du LCOH en tirant parti du numérique et de l'IA[49]. Des investissements importants et des partenariats public-privé, ainsi que l'adoption de techniques numériques dans un secteur numériquement immature, seront nécessaires pour exploiter pleinement son potentiel.

Batteries (NEW)

Les batteries sont essentielles au **stockage de l'énergie et au développement des véhicules électriques** (VE), permettant de **stocker l'énergie chimiquement** et de la **libérer électriquement** en cas de besoin. L'évolution des technologies de batteries est donc un levier clé pour la transition énergétique et la réduction des émissions de CO_2.

Aujourd'hui, les batteries lithium-ion restent dominantes, avec des progrès en matière de sécurité et de densité énergétique. L'émergence des batteries à électrolytes à l'état solide marque une amélioration significative, offrant une plus grande autonomie, une charge plus rapide, une longévité accrue et éliminant le risque de fuite des électrolytes liquides. Cependant, ils sont encore en phase de développement, la première version étant annoncée pour 2027. Les batteries sodium-ion gagnent également du terrain en tant qu'alternative économique, en particulier pour le stockage stationnaire, en raison de l'abondance et du faible coût du sodium[50].

Demain, les technologies des batteries continueront d'évoluer avec l'introduction des batteries lithium-soufre et silicium-anode. Ces innovations visent à augmenter la densité énergétique et à réduire les coûts de production. Les batteries lithium-soufre, par exemple, offrent une densité d'énergie théorique plus élevée, tandis que les anodes en silicium peuvent stocker plus d'ions lithium que les anodes en graphite traditionnelles. Verkor, soutenu par Capgemini, construit à Dunkerque une gigafactory qui produira des batteries lithium-ion haute densité pour 300 000 véhicules électriques par an d'ici 2025. Le projet met l'accent sur la durabilité et le recyclage des batteries[51].

L'informatique quantique est en train de devenir un outil puissant pour concevoir de nouveaux matériaux de batterie. Des projets tels que l'initiative DARPA QUAMELEON[52] aux États-Unis explorent la manipulation des matériaux quantiques à l'aide de champs électromagnétiques pour découvrir de

46 - https://www.bloomberg.com/news/newsletters/2024-12-23/green-hydrogen-hype-is-giving-way-to-reality
47 - air liquide annonce des investissements majeurs pour soutenir la décarbonation de l'europe en collaboration avec totalenergies | air liquide
48 - https://fuelcellsworks.com/2025/02/03/hydrogen/h2-global-energy-finalizes-initial-studies-for-green-hydrogen-and-ammonia-plant-in-morocco
49 - https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2024/06/Accelerating-low-carbon-hydrogen-and-cutting-costs-with-digital-technology-2.pdf
50 - tendances de l'industrie des batteries à surveiller en 2025
51 - moteur du changement : comment les batteries peuvent favoriser la révolution des véhicules électriques - capgemini france
52 - https://idstch.com/technology/materials/darpa-quameleon-project-unlocking-quantum-materials-engineering-with-electromagnetic-fields/

nouvelles phases de la matière et améliorer les propriétés des matériaux. Cela pourrait conduire à des percées en matière de supraconductivité et de magnétisme, ce qui pourrait profiter aux technologies de batterie en améliorant la conductivité et l'efficacité. En Europe, le consortium EQUALITY de Capgemini, qui fait partie d'un projet Horizon Europe, vise à améliorer huit cas d'utilisation industriels complexes grâce à une accélération quantique, ce qui pourrait stimuler la compétitivité de l'industrie européenne et faire progresser les technologies à zéro émission[53].

De plus, **les systèmes intelligents de gestion des batteries sont de plus en plus sophistiqués**, ce qui permet d'optimiser en temps réel les performances et la durée de vie des batteries. Notons également que le recyclage et la seconde vie des batteries deviennent un enjeu industriel majeur, pour réduire la dépendance aux matières premières et optimiser leur impact environnemental.

CCUS (NEXT)

Le captage, l'utilisation et le stockage du carbone (CCUS) sont des technologies clés pour **réduire les émissions de CO_2** provenant des activités industrielles et énergétiques. Ils consistent à **capturer le dioxyde de carbone émis**, puis à le **stocker en toute sécurité** ou à l'utiliser dans diverses applications industrielles.

Récemment, le CCUS a connu une croissance notable, grâce à un soutien politique important et à une augmentation de l'activité des projets. Cependant, moins de projets que prévu ont atteint des décisions finales d'investissement en raison de la complexité des processus d'autorisation et des risques liés aux projets. Malgré ces défis, plus de 41 projets commerciaux de CUSC sont opérationnels et près de 400 autres sont en cours de développement aux États-Unis, en Europe, en Afrique et au Moyen-Orient[54].

Les technologies de capture directe dans l'air (DAC) gagnent en popularité, offrant des solutions pour extraire le CO_2 directement de l'atmosphère. Dans le même temps, de nouvelles méthodes de stockage du CO_2 sont à l'étude pour améliorer l'efficacité et la sécurité des opérations. Les politiques de soutien et les réglementations se multiplient, notamment aux États-Unis et en Europe, pour favoriser l'adoption de ces technologies[55].

Désormais, l'accent est mis sur la mise en œuvre concrète des projets et la maturation des technologies CCUS. Le transport commercial de CO_2 par bateau devient une réalité, facilitant le transport du dioxyde de carbone vers des sites de stockage appropriés. Les fusions et acquisitions dans le secteur s'intensifient, les entreprises cherchant à consolider leurs positions et à optimiser leurs chaînes de valeur. Les tendances régionales en matière de stockage se précisent, avec des projets majeurs en Amérique du Nord et en Europe, reflétant une répartition géographique stratégique des initiatives de CCUS. Northern Lights en Norvège, menée par Equinor, Shell et TotalEnergies, vise à stocker jusqu'à 1,5 million de tonnes de CO_2 par an sous la mer du Nord. Il s'agit d'une initiative pionnière dans le stockage géologique du carbone en Europe[56].

Les progrès en matière de CCUS sont essentiels pour atteindre les objectifs de neutralité carbone. En capturant et en stockant le CO_2, ces technologies contribuent à une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre, atténuant ainsi les effets du changement climatique.

Du point de vue de l'amélioration technologique, bien qu'elle ne soit pas encore directement appliquée au CCUS, l'informatique quantique pourrait potentiellement **améliorer la science des matériaux et l'optimisation des technologies de capture du carbone en simulant des interactions moléculaires complexes**. Capgemini s'est associé à la DARPA dans le cadre d'un projet visant à tirer parti de l'informatique quantique pour améliorer l'efficacité du captage et du stockage du carbone (CCUS), dans le but de faire progresser les efforts de développement durable et de promouvoir un avenir plus vert[57].

53 - https://www.capgemini.com/about-us/who-we-are/innovation-ecosystem/quantum-technologies/
54 - Large-scale CCS projects globally by status 2024 | Statista
55 - capgemini.com/us-en/wp-content/uploads/sites/30/2024/09/168550993_energy_-_emissions_capture_v03.pdf
56 - northern lights : premier projet industriel majeur de captage et stockage de carbone en norvège | totalenergies.com
57 - https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2024/05/05_29_capgemini-press-release_darpa.pdf

Advanced nuclear reactors (NEXT)

Les réacteurs nucléaires avancés, en particulier les petits réacteurs modulaires (PRM), représentent une nouvelle génération de technologies nucléaires conçues pour être **plus sûres, plus souples et adaptées aux besoins énergétiques d'aujourd'hui.** Leur conception compacte et modulaire facilite la construction et l'intégration dans une variété d'environnements, y compris les zones isolées ou les réseaux électriques à petite échelle.

Les PRM ont gagné en popularité ces dernières années, avec plusieurs projets pilotes en cours aux États-Unis, en Chine et en Europe. Cette tendance est soutenue par des investissements croissants, des politiques favorables et des partenariats public-privé visant à diversifier les sources d'énergie et à réduire les émissions de CO_2. Les applications envisagées pour les PRM sont variées, notamment la production d'électricité, l'approvisionnement en chaleur industrielle et le dessalement de l'eau.

En Amérique du Nord, Ontario Power Generation termine la préparation du site pour soutenir le lancement de la construction du premier PRM en Amérique du Nord à sa centrale nucléaire de Darlington en 2025[58]. OPG prévoit jusqu'à quatre unités, et de nombreux services publics américains ont exprimé un vif intérêt pour le développement de PRM avec divers projets en phase de pré-autorisation[59].

Cependant, les SMR sont limités aux services publics et, récemment, les SMR ont attiré une attention considérable des Hyperscalers pour alimenter les centres de données. Les progrès de l'IA entraînant une demande importante du marché pour l'IA, ce qui nécessite à son tour une nouvelle génération importante pour alimenter les centres de données, la plupart des Hyperscalers ont lancé des plans pour les SMR. Par exemple, en octobre 2024, Amazon a annoncé un investissement de 500 millions de dollars dans la start-up X-Energy pour développer des SMR afin d'alimenter ses centres de données avec de l'énergie propre[60]. Cette initiative vise à déployer 5 GW d'énergie nucléaire d'ici 2039, démontrant ainsi l'engagement des géants de la technologie en faveur de solutions énergétiques durables.

Les investissements dans cette technologie s'accélèrent, soutenus par des politiques publiques favorables et des partenariats public-privé. Les applications des PRM vont de la production d'énergie et de la chaleur industrielle au dessalement de l'eau.

Au cours des prochaines années, le secteur des PRM va progresser sur plusieurs fronts, **notamment en matière de réglementation et de financement**. L'objectif est d'accélérer le déploiement commercial d'ici la fin de la décennie. Les PRM offrent la possibilité de diversifier les sources d'énergie tout en réduisant les émissions de CO_2. Leur conception modulaire permet une meilleure gestion des ressources énergétiques et une réduction des déchets nucléaires. De plus, leur flexibilité d'utilisation les rend adaptés à une variété d'environnements, y compris les zones reculées nécessitant une source d'énergie fiable et propre.

L'industrialisation des PRM représente un défi technique et économique, mais leur adoption généralisée pourrait transformer le paysage énergétique mondial. Les efforts sont axés sur **l'amélioration de la sécurité passive et la réduction des coûts de construction.**

58 - first phase of site preparation completed for darlington smr project - nuclear engineering international
59 - https://www.opg.com/projects-services/projects/nuclear/smr
60 - amazon mise sur les petits réacteurs nucléaires pour alimenter ses centres de données - forbes france

4

Cloud & edge

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

En 2024, les technologies Cloud et Edge ne se limitent plus à un rôle d'infrastructure : elles s'affirment comme des leviers stratégiques de compétitivité, d'innovation et de souveraineté numérique. Le multicloud s'impose comme le modèle de référence, combinant résilience, agilité et performance. En parallèle, l'edge computing connaît une adoption rapide, dopée par la 5G et les besoins croissants en traitement local des données, notamment dans l'industrie, la santé ou les transports autonomes.

Dans un contexte marqué par l'explosion des volumes de données et l'essor de l'IA générative, les architectures se complexifient et donnent naissance à de nouveaux paradigmes : cloud distribué pour rapprocher les traitements des usages tout en garantissant la conformité, cloud de confiance pour répondre aux exigences de souveraineté, ou encore industry cloud pour verticaliser les offres et optimiser la valeur métier.

Parallèlement, de nombreuses organisations amorcent un passage en mode plateforme, adoptant une approche infrastructure as a product pour accélérer la vélocité des développeurs et industrialiser les cycles de mise en production (DevX, IdP, Platform Engineering).

L'Europe accélère sa stratégie en la matière, avec des initiatives comme Microsoft Bleu, S3NS ou OVHcloud, visant à bâtir une alternative crédible aux hyperscalers et à renforcer sa souveraineté numérique.

Ces nouvelles infrastructures deviennent le socle critique du déploiement de l'IA, avec des besoins accrus en capacité de calcul, en orchestration distribuée et en sécurité avancée.
Un écosystème hybride émerge, combinant cloud centralisé, edge intelligent et exigences sectorielles, redéfinissant en profondeur les priorités des DSI et des décideurs stratégiques.

Multicloud (NOW)

Le multicloud s'impose comme une approche stratégique incontournable pour les entreprises souhaitant tirer parti des atouts combinés de plusieurs fournisseurs de cloud public. En diversifiant leurs dépendances, **les organisations renforcent leur résilience, leur agilité opérationnelle et leur capacité à optimiser les coûts et les performances.** Selon Gartner, d'ici 2027, 90% des entreprises adopteront une stratégie hybride, et 70% mettront en œuvre une approche multicloud, afin de sécuriser leurs opérations, accélérer l'innovation et limiter les risques liés à la dépendance à un unique fournisseur[61].

L'essor du edge computing a renforcé cette dynamique. En rapprochant les capacités de traitement des sources de données, le edge répond aux besoins de **latence faible, de fiabilité et de traitement localisé**, particulièrement dans l'industrie manufacturière, la santé ou la grande distribution. Cette évolution pousse les entreprises à concevoir des architectures distribuées, intégrant cloud centralisé, edge intelligent et environnements on-premise pour améliorer la performance et la résilience des services.

61 - https://www.gartner.com/en/doc/375973-comparing-multicloud-management-and-governance-approaches

En 2025, un nouveau défi émerge : intégrer la GenAI dans les environnements multicloud. Cela nécessite une réinvention de la gestion des charges de calcul et des flux de données, ainsi qu'une montée en compétence des équipes IT pour orchestrer des workflows complexes à l'échelle. L'IA devient un levier d'automatisation, de performance et d'optimisation des coûts, mais impose une évolution des modèles techniques et organisationnels.

Dans le même temps, les enjeux de cybersécurité prennent une ampleur nouvelle. Face à la fragmentation croissante des environnements cloud, les architectures traditionnelles montrent leurs limites. Les modèles Zero Trust s'imposent, avec un recentrage sur la gestion des identités, le contrôle des accès et la supervision des flux inter-clouds.

Dans ce contexte, **l'adoption de plateformes d'orchestration multicloud sécurisées et de solutions de gouvernance unifiée devient essentielle**[62]. Elles constituent le socle d'une approche cloud durable, conforme, performante et alignée avec les nouveaux standards de souveraineté et de sécurité.

Edge computing (NOW)

À mesure que les applications critiques exigent **plus de réactivité, de localisation et de résilience**, l'edge Computing s'impose comme un pilier stratégique des architectures numériques de nouvelle génération. En rapprochant les capacités de calcul, de stockage et d'intelligence au plus près des sources de données (capteurs, équipements médicaux, machines industrielles, véhicules connectés), il **réduit la latence**[63]**, désengorge les réseaux et permet un traitement local sécurisé des données sensible**s.

Longtemps considéré comme une simple extension du cloud, l'Edge devient une brique technologique à part entière, notamment dans les environnements où la souveraineté des données, la décision temps réel ou la continuité de service sont critiques. Santé, énergie, manufacturing, logistique ou défense : les cas d'usage se multiplient — de la maintenance prédictive à la vidéosurveillance intelligente, jusqu'aux systèmes autonomes embarqués.

L'essor de la 5G, couplé à la prolifération des objets connectés, favorise cette évolution. Il permet le déploiement de micro-data centers et de nœuds de calcul embarqués, interconnectés au cloud central dans une logique de continuum numérique. Ce modèle hybride redéfinit les architectures IT, avec de nouveaux enjeux en matière d'orchestration, de supervision distribuée et de cybersécurité locale.

Les fournisseurs cloud traditionnels adaptent leurs offres à cette nouvelle donne : AWS Outposts, Azure Stack Edge ou Google Distributed Cloud Edge proposent des environnements d'exécution managés, alliant puissance du cloud et proximité de l'Edge. De leur côté, les industriels développent des solutions verticalisées, souvent pour des environnements contraints ou isolés.

En 2025, **l'Edge sera au cœur des infrastructures intelligentes, notamment pour les systèmes autonomes**, l'IA embarquée ou la cybersécurité proactive. Les architectures Zero Trust et les solutions SASE s'imposent pour sécuriser les échanges en périphérie. Enfin, la généralisation des micro-data centers permettra de rapprocher le traitement des besoins métier, tout en réduisant l'empreinte carbone grâce à une meilleure efficacité énergétique[64].

Distributed cloud (NEW)

Le cloud distribué est un modèle de cloud computing public qui permet de **déployer l'infrastructure cloud dans divers emplacements**, tels que les datacenters de votre fournisseur de cloud, ceux d'autres fournisseurs, des datacenters tiers, ainsi qu'en local. Ce service est administré de manière centralisée, offrant aux entreprises la possibilité de déployer et d'exécuter des applications ou des composants d'application individuels dans un ensemble d'emplacements et d'environnements cloud. Cela permet d'optimiser le traitement au plus près des données et de répondre efficacement aux exigences de performance et de conformité réglementaire[65].

Le cloud distribué a gagné en popularité, notamment avec l'adoption croissante de l'IA et de l'edge computing. Les entreprises utilisent des **stratégies multicloud et hybrides** pour éviter de dépendre d'un unique fournisseur, tout en gérant la sécurité et les coûts croissants des infrastructures numériques[66].

Des géants du cloud comme AWS, Microsoft Azure et Google Cloud offrent désormais des solutions de cloud distribué pour améliorer

62 - https://www.verizon.com/business/en-gb/products/networks/connectivity/multi-cloud-orchestration/?msockid=1cdd5f04481a6e28233c4c384c1a65fa
63 - https://www.capgemini.com/insights/expert-perspectives/edgeops-the-future-of-edge-computing/
64 - https://www.forrester.com/report/the-future-of-edge-computing/res176023
65 - https://www.techtarget.com/searchcloudcomputing/definition/what-is-distributed-cloud-and-how-does-it-work
66 - https://intellias.com/hybrid-cloud-and-multi-cloud-future-of-enterprise

la résilience et la performance des applications. Par exemple, une entreprise de commerce électronique peut utiliser le cloud distribué pour gérer les pics de trafic pendant les périodes de forte demande, tandis que les systèmes de santé adoptent cette approche pour traiter les données des patients en temps réel et améliorer les soins[67].

Dans un contexte où les systèmes opérationnels métiers intègrent de plus en plus de briques d'informatique IT (conteneurs, etc.) et qu'il faut les sécuriser, le cloud distribué est aussi stratégique dans les usines. On parle alors de convergence IT/OT (Technologies de l'Information / Technologies Opérationnelles), visant à améliorer l'efficacité opérationnelle, la prise de décision et la sécurité. Le cloud distribué joue un rôle clé dans cette intégration en offrant une **infrastructure flexible et résiliente, déployable au plus près des sources de données ou des applications**[68].

Dans les années à venir, le cloud distribué devrait continuer à se renforcer : intégration plus poussée de l'IA, sécurisation renforcée, et durabilité accrue. Surtout, **il s'adaptera vers des solutions de cloud plus intégrées et spécifiques à chaque industrie**.

Trusted cloud (NEW)

Le Cloud de Confiance est devenu un enjeu stratégique pour assurer la souveraineté numérique face aux cybermenaces croissantes et aux législations extraterritoriales. La **qualification SecNumCloud**, développée par l'ANSSI, garantit un **haut niveau de sécurité et de résilience** pour les entreprises et les administrations publiques, protégeant les données sensibles contre les ingérences étrangères[69]. Cette certification, en adéquation avec les attentes des Organismes d'Importance Vitale (OIV), s'accompagne d'un Visa de Sécurité, assurant une conformité stricte aux exigences réglementaires françaises et européennes.

En 2024, plusieurs fournisseurs de services cloud ont obtenu ou sont en passe d'obtenir la certification SecNumCloud pour un nombre croissant de services. Parmi eux, Bleu, s'appuyant sur la technologie Microsoft, S3NS, développé en partenariat avec Google Cloud et Thales, ainsi que OVHcloud poursuivent leur engagement vers une infrastructure souveraine. Leur adoption repose sur leur capacité à concilier protection des données, indépendance vis-à-vis des lois extraterritoriales et compétitivité des services face aux hyperscalers. En parallèle, ces derniers ont déployé des solutions adaptées aux exigences européennes. AWS a annoncé son European Sovereign Cloud, conçu pour répondre aux impératifs de souveraineté, tandis que Google a lancé le Distributed Cloud air-gapped, garantissant une gestion indépendante des données. Microsoft Cloud for Sovereignty vient compléter ces initiatives en ciblant les gouvernements et institutions publiques.

En 2025, l'adoption du European Union Cloud Services (EUCS), développé par l'ENISA, **harmonisera les critères de sécurité cloud à l'échelle européenne**[70]. Cette réglementation vise à renforcer la transparence et la compétitivité des solutions européennes, tout en instaurant une confiance accrue dans l'hébergement des données. Les fournisseurs certifiés SecNumCloud, poursuivent leur expansion avec des offres alignées sur ces nouvelles exigences, garantissant une conformité stricte et une protection renforcée contre l'extraterritorialité des lois étrangères.

Industry cloud (NEW)

Les Industry Clouds, ou clouds sectoriels, s'imposent comme des **plateformes verticalisées** conçues pour répondre aux besoins spécifiques de secteurs comme la santé, la finance, l'industrie ou les services publics. Ces solutions intégrées combinent IaaS, PaaS et SaaS avec des modèles de données dédiés, des règles métiers préconfigurées et des standards de conformité (RGPD, PCI-DSS, HDS…). Elles permettent ainsi **d'accélérer le time-to-market, d'uniformiser les pratiques et de faciliter l'innovation** en capitalisant sur des composants mutualisés.

L'intégration native de briques technologiques comme l'IA, l'automatisation ou l'analytique avancée renforce leur valeur ajoutée, tout en assurant l'interopérabilité avec les systèmes existants. Ces clouds permettent également une meilleure conformité dans des environnements complexes et fortement régulés.

67 - https://cloud.google.com/docs/get-started/aws-azure-gcp-service-comparison
68 - https://www.paloaltonetworks.com/cyberpedia/what-is-it-ot-convergence
69 - secnumcloud pour les fournisseurs de services cloud | anssi
70 - eucs – cloud services scheme | enisa

En 2024, les grands fournisseurs — AWS, Microsoft et Google Cloud — ont accéléré le développement de ces offres, souvent en partenariat avec des acteurs sectoriels. Par exemple, Microsoft Cloud for Healthcare[71] facilite l'intégration de données médicales pour améliorer la prise en charge des patients, tandis que Google Cloud[72] propose des environnements spécialisés pour le manufacturing, la logistique ou les services financiers.

Cette évolution transforme le rôle de la DSI, désormais moteur de la plateforme métier, en étroite collaboration avec les équipes opérationnelles. Elle requiert également un renforcement des compétences sectorielles pour piloter des intégrations complexes dans des contextes multi-cloud.

En 2025, **les Industry Clouds devraient jouer un rôle structurant dans les stratégies numériques des organisations**. Dans un contexte de pression réglementaire accrue, ils permettent non seulement de sécuriser les données sensibles, mais aussi d'intégrer les contraintes métiers dans les architectures cloud, combinant souveraineté, conformité et performance.

Software- defined everything (SDX) (NEXT)

Face à l'accélération des transformations numériques et à la complexité croissante des environnements IT, les entreprises adoptent massivement une approche Software-Defined Everything (SDx). Cette logique **vise à abstraire, virtualiser et piloter par logiciel l'ensemble des composants de l'infrastructure** — réseaux (SDN), stockage (SDS), sécurité (SD-Sec), data centers (SDDC) — pour en faire des ressources programmables et orchestrables dynamiquement, en cohérence avec les exigences du cloud moderne[73].

En s'affranchissant des contraintes physiques et des architectures rigides, **le SDx permet de gagner en agilité, de réduire les délais de provisioning, et d'adapter finement les ressources aux besoins métiers en temps réel**. Il devient un levier clé pour automatiser les déploiements, améliorer la disponibilité, et optimiser l'utilisation des infrastructures, aussi bien dans des environnements multicloud que dans des architectures hybrides ou distribuées.

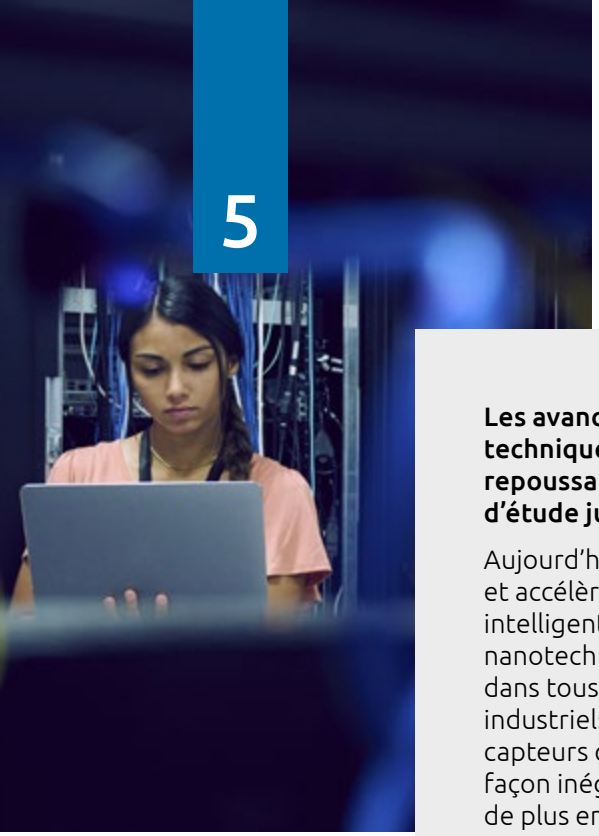
Dans le domaine du réseau, les solutions SDN permettent une gestion centralisée, flexible et sécurisée des flux, essentielle pour supporter la montée en charge des applications critiques et des usages Edge. Côté stockage, les architectures SDS offrent une meilleure élasticité et simplifient la gestion de volumes hétérogènes, tout en facilitant la réplication et la résilience multi-sites.

La sécurité, quant à elle, s'inscrit dans une dynamique similaire avec l'essor du SDS qui rend possible le déploiement de politiques de contrôle et de segmentation dynamique, en lien avec les approches Zero Trust et SASE. L'infrastructure devient ainsi plus proactive, résiliente et auto-adaptative, capable de répondre aux menaces en temps réel tout en respectant les contraintes de conformité.

Cette transformation vers des infrastructures "as code", pilotées via des API et intégrées aux chaînes CI/CD, ouvre la voie à la mise en place d'Internal Developer Platforms (IDP). En capitalisant sur les fondations SDx, les IDP offrent aux développeurs des environnements standardisés, reproductibles et sécurisés, accessibles en self-service, tout en masquant la complexité sous-jacente des infrastructures multicloud ou hybrides.

Cette logique de "platform engineering" favorise le passage en mode produit, renforce la collaboration entre équipes développement et opérations, et contribue à accélérer la vélocité tout en garantissant la conformité et la sécurité des déploiements. Le SDx devient ainsi **un socle essentiel à l'industrialisation du delivery applicatif et à la montée en maturité des organisations** vers une IT plus agile, composable et résiliente.

71 - https://www.microsoft.com/en-us/industry/health/microsoft-cloud-for-healthcare
72 - https://cloud.google.com/docs/get-started/aws-azure-gcp-service-comparison
73 - https://www.vmware.com/topics/glossary/content/software-defined-everything.html



5

Engineering tech

Les avancées technologiques sont indissociables des progrès des techniques de conception et de production industrielles, repoussant sans cesse les limites du possible depuis le bureau d'étude jusque dans l'usine.

Aujourd'hui, les jumeaux numériques ou l'impression 3D transforment et accélèrent les méthodes de conception qui deviennent optimisées, intelligentes et itératives; les matériaux intelligents et les nanotechnologies vont eux ouvrir de nouveaux champs d'innovation dans tous les domaines de l'ingénierie, notamment les génies industriels, mécaniques, chimiques et civils et enfin, la robotique et les capteurs quantiques permettront de transformer et automatiser de façon inégalée les processus industriels afin de rendre la fabrication de plus en plus autonome, efficiente et intelligente.

Ces technologies permettent déjà d'imaginer et de fabriquer des produits aux fonctionnalités et aux propriétés inédites. Tous ces éléments 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 d'un modèle numérique **en superposant progressivement des couches de matière.** Cette technologie permet la production rapide de pièces légères et solides, ainsi que la fabrication de géométries complexes qui ne peuvent être réalisées par d'autres procédés. Elle favorise ainsi l'innovation industrielle, le prototypage rapide, la production à la demande et la personnalisation. Malgré sa maturité, certaines limites subsistent, telles que le choix limité de matériaux, les coûts élevés de pré et post-traitement et la nécessité de compétences et d'équipements spécialisés. Aujourd'hui, l'impression 3D ne cesse de se développer grâce à l'élargissement de la gamme de matériaux utilisables, à l'amélioration de l'efficacité des machines et à l'augmentation de la rentabilité des processus. Cette technologie est en train de devenir un outil clé pour la recherche et le développement industriels, permettant des avancées significatives dans de nombreux secteurs. Par exemple, des chercheurs australiens ont récemment mis au point une structure en titane imprimée en 3D qui offre une résistance supérieure de 50 % à celle de l'alliage le plus résistant connu, ouvrant ainsi de nouvelles opportunités dans les domaines de l'aéronautique et de l'ingénierie biomédicale[74]. Au cours des prochaines années, l'évolution de matériaux tels que les polymères conducteurs, les plastiques biodégradables et les alliages métalliques avancés **étendra les applications de l'impression 3D aux domaines de l'électronique, des soins de santé et de la fabrication durable.** L'intégration de l'IA et de l'apprentissage automatique optimise la précision d'impression, réduit le gaspillage de matériaux et améliore les vitesses de production. De plus, l'impression multi-matériaux, qui permet de **combiner différents matériaux dans une même fabrication**, ouvre la voie à des objets plus fonctionnels et complexes. L'impression à grande vitesse devient également un facteur clé, accélérant la production de pièces industrielles et permettant des délais de fabrication encore plus courts.

Avec des processus plus rapides, une plus grande diversité de matériaux et une meilleure intégration de l'IA, l'impression 3D s'impose comme une technologie clé pour l'industrie du futur. Il joue un rôle majeur dans

74 - *Les usines spatiales se rapprochent de la réalité alors que les nouvelles technologies d'impression 3D sont prometteuses*

l'optimisation des lignes de production, l'accélération de la personnalisation des produits et la réduction de l'empreinte écologique des processus de fabrication[75].

Digital twin (NOW)

Le jumeau numérique désigne une **réplique virtuelle d'un objet ou d'un système physique**, alimentée en temps réel par des capteurs et diverses sources de données. Déjà largement adoptée dans des secteurs comme l'industrie, la santé, la construction ou la logistique, cette technologie permet de simuler, prédire et optimiser les performances d'un modèle. Elle **facilite les tests virtuels, raccourcit les délais de mise sur le marché et contribue à l'amélioration de la qualité des produits**. Les jumeaux numériques s'imposent également comme un levier central de la maintenance prédictive.

En 2024, leur usage s'est renforcé autour de l'optimisation des processus et de la gestion d'infrastructures complexes. À Shanghai, un jumeau numérique urbain a été déployé pour accompagner les décisions d'urbanisme et améliorer la gestion des ressources, notamment dans les transports[76]. Dans la logistique, DHL s'appuie sur cette technologie pour fluidifier ses opérations, détecter les inefficacités et réduire sa consommation énergétique[77]. L'industrie manufacturière y voit un moyen de simuler les chaînes de production, surveiller en continu l'état des équipements et anticiper les besoins de maintenance.

En 2025, la convergence des jumeaux numériques avec l'IoT accélère leur évolution. L'edge computing s'impose comme un catalyseur, en permettant le traitement des données au plus près de leur source. Cette approche réduit la latence et renforce l'agilité décisionnelle. Par ailleurs, de nouveaux secteurs comme le commerce de détail, l'agriculture ou la logistique adoptent progressivement cette technologie pour optimiser les chaînes d'approvisionnement et diminuer leur impact environnemental.

La montée en puissance des jumeaux numériques soulève toutefois des enjeux éthiques et de cybersécurité, notamment en matière de confidentialité et de protection des données. Dans une dynamique de durabilité, leur développement s'oriente vers une meilleure efficience des ressources et une empreinte écologique réduite. **Grâce à une interopérabilité accrue, les jumeaux numériques s'imposent désormais comme un pilier structurant de la transformation digitale des organisations.**

Chipsets & semicons (NEW)

L'industrie des semiconducteurs traverse une transformation profonde avec l'émergence de l'architecture **Chiplet**, une évolution majeure identifiée comme une discontinuité industrielle clé et notamment pour l'écosystème. Ce concept bouleverse les paradigmes traditionnels de conception et de production des processeurs avancés. Depuis les débuts des semiconducteurs, l'intégration dans des solutions monolithiques était la norme.

Pourquoi les chiplets ? Cette approche modulaire repose sur **l'assemblage de blocs de silicium indépendants, chacun optimisé pour des fonctions spécifiques** (CPU, GPU, accélérateurs IA, interfaces réseau ou « Central Chiplet / Domain-specific »). Ce modèle réduit significativement (ou partage) les coûts de fabrication tout en améliorant la flexibilité et la capacité d'intégration de nouvelles technologies. Les chiplets facilitent également la miniaturisation et optimisent la performance énergétique, répondant aux exigences croissantes de secteurs tels que l'automobile, la santé, l'aérospatial et la défense.

Historiquement, cette avancée a été initiée par des acteurs majeurs comme Intel[78], Nvidia et AMD, qui ont développé des solutions chiplet propriétaires pour répondre à leurs besoins internes. Cependant, l'industrie se tourne désormais vers un modèle plus ouvert, comparable à un jeu de Lego, où plusieurs chiplets standardisés et interopérables peuvent être combinés pour créer des architectures personnalisées.

En 2024, de nombreuses initiatives visent à structurer cet écosystème et à standardiser les interfaces. IMEC[79] travaille sur des chiplets dédiés à l'automobile, tandis que des collaborations s'intensifient dans les secteurs de la défense, des télécommunications et de la recherche médicale. L'initiative UCIe[80] joue un rôle clé dans la standardisation.

2025 pourrait être une année charnière pour l'adoption massive des chiplets. Il existe aussi une valeur significative à explorer **la convergence intersectorielle (« Cross-Verticals »)**, notamment entre l'aéro/défense

75 - L'avenir de l'impression 3D 2024 : l'enquête menée auprès des dirigeants de l'industrie de l'impression 3D - 3D Printing Industry
76 - https://futuretransport-news.com/leveraging-digital-twins-to-improve-urban-transport/
77 - https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-digital-twins-in-logistics.pdf
78 - https://www.eenewseurope.com/en/intel-launches-its-chiplet-based-cpu-and-gpu/
78 - automotive chiplet forum | imec
80 - home | ucie consortium

et l'automobile, en se concentrant sur des besoins communs : performance, architecture et sûreté/sécurité. Par exemple, les besoins technologiques d'un drone industriel, d'un hélicoptère léger et d'une voiture autonome peuvent converger. Cette convergence pourrait aboutir à la **création de chiplets communs pour des applications variées**, tout en réduisant significativement les coûts, les investissements pour ces processeurs se situant généralement entre 50 M€ et 100 M€[81].

Robotics (NEW)

L'écosystème robotique connaît une montée en puissance de l'intelligence et de la collaboration. Portés par l'intégration de l'IA et de l'apprentissage automatique, **les robots atteignent aujourd'hui un nouveau degré d'autonomie** : ils interprètent les données, prennent des décisions en temps réel et contribuent à la maintenance prédictive. Si les robots humanoïdes captent souvent l'attention, ce sont les bras robotiques[82] qui restent les piliers de l'industrie, plébiscités pour leur fiabilité, leur efficacité et leur rentabilité dans des tâches telles que l'assemblage, le soudage ou la fabrication de précision.

Les **robots collaboratifs** – ou **cobots** – transforment la relation homme-machine. Grâce à leur capacité à opérer en toute sécurité aux côtés des humains, à leur autonomie croissante et à des interfaces de programmation simplifiées, ils deviennent accessibles même aux petites et moyennes entreprises.

L'émergence de l'IA générative ouvre la voie à des systèmes robotiques plus avancés. Tandis que la GenAI se concentre sur la génération de contenu, l'IA agentique pousse cette logique plus loin, en orchestrant de manière autonome des flux de travail complexes. Ce rapprochement entre IA et automatisation marque un tournant : il associe adaptabilité, créativité et précision d'exécution. L'apprentissage par la vision s'impose comme un vecteur clé d'évolution. En permettant aux robots de percevoir et d'interpréter leur environnement via des données visuelles en temps réel, cette technologie remplace les approches classiques fondées sur le code, et favorise une prise de décision plus fine et contextuelle.

La sortie récente par NVIDIA de l'Isaac GR00T N1[83], premier modèle de base ouvert et personnalisable conçu pour le raisonnement et les compétences humanoïdes, constitue une avancée majeure. Cette innovation vise à accélérer le développement de solutions robotiques pour répondre à des pénuries de main-d'œuvre estimées à plus de 50 millions de personnes à l'échelle mondiale.

Les évolutions à venir devraient amplifier cette dynamique, avec l'intégration de capteurs de nouvelle génération pour affiner la perception des robots et leur permettre d'exécuter des tâches complexes exigeant une sensibilité accrue. La robotique exploitera également davantage l'intelligence collective via les essaims de robots dans les environnements dangereux, et renforcera les capacités humaines grâce aux exosquelettes, notamment dans l'industrie et la santé.

À l'intersection de l'IA, de l'automatisation et de la robotique, se dessine un horizon où les gains d'efficacité, d'agilité et d'innovation redéfinissent en profondeur les chaînes de valeur.

Quantum sensing (NEW)

La détection quantique repose sur les principes de la mécanique quantique pour **mesurer des grandeur**s physiques avec une précision inégalée. Ces capteurs, capables de détecter d'infimes variations de champs magnétiques, de température, d'accélération ou de pression, dépassent largement les performances des capteurs traditionnels. Ils s'appuient sur des phénomènes tels que la superposition, l'intrication ou encore la cohérence quantique pour révéler des signaux jusqu'alors imperceptibles.

Leur intégration progresse dans des secteurs stratégiques comme la santé, la navigation ou la défense. Ces capteurs ouvrent la voie à une imagerie médicale plus précise et moins coûteuse, permettent une géolocalisation sans GPS et renforcent la fiabilité des systèmes de guidage. Dans le domaine environnemental, ils facilitent une surveillance avancée des séismes ou des tsunamis, contribuant à une meilleure anticipation des catastrophes.

La convergence de la détection quantique avec le calcul et les télécommunications quantiques constitue une dynamique émergente. Elle améliore la précision des mesures tout en renforçant leur fiabilité. Par ailleurs, l'apparition de capteurs fonctionnant à température ambiante – en particulier ceux basés sur des systèmes à diamant – marque une avancée clé, en éliminant le recours à des dispositifs de refroidissement complexes et en facilitant leur intégration à grande échelle.

81 - https://semiengineering.com/how-much-will-that-chip-cost/
81 - construire des bras robotiques plus intelligents en 2025
83 - NVIDIA Announces Isaac GR00T N1 — the World's First Open Humanoid Robot Foundation Model — and Simulation Frameworks to Speed Robot Development | NVIDIA Newsroom

La miniaturisation des capteurs ouvre de nouvelles perspectives, notamment dans le domaine de la santé avec l'émergence de dispositifs médicaux portables. Parallèlement, les progrès en matière de sensibilité et de précision, portés par de nouveaux algorithmes quantiques et des techniques de correction d'erreurs[84], élargissent encore le champ des applications.

Portée par des investissements croissants dans les technologies quantiques, la détection quantique se déploie dans des domaines variés : véhicules autonomes, imagerie médicale de nouvelle génération ou encore surveillance environnementale, **consolidant son rôle dans les infrastructures critiques de demain.**

Smart materials (NEXT)

Les matériaux intelligents sont conçus pour réagir de manière adaptative à des stimuli externes tels que la température, la lumière ou la pression. Déployés dans des secteurs variés comme la construction, la médecine ou l'électronique, ils représentent une **avancée stratégique en matière d'efficacité énergétique et de durabilité des infrastructures.**

Leur adoption s'intensifie, portée notamment par les progrès du béton auto-cicatrisant, capable de réparer ses fissures grâce à l'activation de bactéries[85] ou de capsules de polymère. D'autres innovations émergent, comme les matériaux thermochromiques ou les hydrogels réfrigérants, qui contribuent à renforcer l'efficacité énergétique et le confort thermique dans les bâtiments et les textiles intelligents. L'essor des nanotechnologies ouvre par ailleurs la voie à des matériaux aux propriétés physiques augmentées, facilitant leur intégration industrielle.

Le béton auto-cicatrisant s'impose comme une solution pour prolonger la durée de vie des infrastructures et réduire les coûts de maintenance. Les fenêtres thermochromiques ajustent leur teinte en fonction de la température, optimisant ainsi la transmission de la chaleur et de la lumière. Dans le domaine médical, les alliages à mémoire de forme gagnent du terrain, notamment pour des dispositifs comme les stents, grâce à leur capacité à s'adapter et à renforcer la précision et la durabilité des implants.

À l'horizon 2025, **l'intégration des nanotechnologies et de la fabrication additive accélère la création de matériaux encore plus réactifs et performants**. Les polymères supramoléculaires et les composites nanostructurés se distinguent par leur robustesse et leur adaptabilité face aux contraintes mécaniques ou environnementales. Les applications médicales se diversifient également, avec l'émergence d'implants capables de s'ajuster en temps réel aux conditions physiologiques du corps humain.

Nano technologies (NEXT)

Les **nanotechnologies** exploitent les propriétés singulières des **matériaux à l'échelle nanométrique** (inférieure à 100 nm), où les effets quantiques et le rapport surface/volume confèrent des performances accrues en termes de résistance, de conductivité et d'efficacité énergétique. Ces caractéristiques en font un levier de transformation pour de nombreux secteurs industriels.

En 2024, les nanomatériaux poursuivent leur diffusion dans des domaines clés, de la santé aux énergies renouvelables. Dans la construction, le béton auto-cicatrisant, enrichi de capsules polymères ou de bactéries, émerge comme une solution pérenne pour prolonger la durée de vie des infrastructures. Les nano-revêtements hydrophobes et autonettoyants, quant à eux, se généralisent pour protéger les surfaces industrielles de l'usure et des conditions climatiques extrêmes.

Dans l'automobile, des acteurs comme BMW ou Tesla investissent dans les nanomatériaux pour optimiser les performances des batteries lithium-ion. L'intégration de silicium nanostructuré dans les anodes permet d'augmenter la capacité de stockage tout en réduisant le temps de recharge. En parallèle, les pneus intégrant des nanomatériaux offrent une meilleure durabilité et une résistance au roulement réduite, contribuant à une consommation d'énergie plus efficace[86].

Les nanotechnologies **contribuent ainsi activement à l'amélioration de la performance industrielle et à l'accélération de la transition vers des modèles plus durables**. L'usage de nanocomposites – tels que les nanotubes de carbone ou les nanoparticules de magnésium et d'aluminium – permet la conception de matériaux plus légers et robustes, au service de l'aéronautique, de l'automobile et de l'électronique. Appliquées aux polymères, les nanostructures renforcent également les capacités de filtration de l'eau et de réduction des polluants. De leur côté, les nanocapteurs augmentent la précision et l'efficacité des procédés industriels.

En combinant performance, durabilité et légèreté, les nanotechnologies s'imposent comme un moteur d'innovation à fort potentiel pour les prochaines décennies.

84 - Qu'est-ce que la détection quantique et comment fonctionne-t-elle ?
85 - https://www.researchgate.net/publication/254887823_un_nouveau_beton_auto-cicatrisant_grace_a_l%27incorporation_de_bacteries
86 - automotive engineering with nanotechnology

6

Decentralized tech

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

Les technologies décentralisées se réfèrent à des systèmes et réseaux où l'autorité de prise de décision et le contrôle sont distribués entre plusieurs nœuds, plutôt que centralisés sous une seule entité. Par leur nature transparente et sécurisée, elles continuent de transformer les services financiers et au-delà, en réinventant les modèles de confiance et d'échange de valeur.

La blockchain, pierre angulaire de cette révolution, évolue vers des infrastructures plus scalables, interopérables et durables. Soutenue par des protocoles tels que les zero-knowledge proofs, elle parvient à concilier confidentialité et transparence. L'essor des stablecoins et des monnaies numériques telles que les MNBC souligne la volonté des acteurs privés et publics de s'emparer de et d'accélérer la digitalisation des moyens de paiement. Les custodial wallets se positionnent ainsi au cœur du réacteur des institutions financières, facilitant l'accès aux actifs numériques dans un cadre sécurisé et réglementé. C'est notamment dans ce contexte que la tokenisation d'actifs s'affirme comme un levier de liquidité et d'automatisation innovant.

Dans ce chapitre, nous explorerons ces avancées qui redéfinissent les interactions économiques et pourraient accélérer l'adoption massive des technologies décentralisées dans les années à venir.

Blockchain (NOW)

La blockchain est un registre distribué, partagé et transparent, conçu pour garantir l'intégrité, la sécurité et la confidentialité des échanges de données. Son mécanisme de validation par consensus **supprime la nécessité d'un tiers de confiance**, posant les bases d'une alternative décentralisée aux systèmes traditionnels. Si les blockchains publiques – comme Bitcoin ou Ethereum – permettent des transactions totalement décentralisées, les réseaux privés et autorisés, tels que Hyperledger Fabric, Corda ou Hyperledger Besu, répondent aux besoins des environnements d'entreprise en offrant un accès contrôlé.

Initialement associée aux crypto-monnaies, la blockchain s'est progressivement imposée dans des secteurs variés comme la finance, l'immobilier, l'énergie ou la gestion des chaînes d'approvisionnement. Les blockchains de deuxième génération, à l'image d'Ethereum, ont introduit les contrats intelligents, capables d'exécuter automatiquement des actions dès lors que certaines conditions sont réunies. Cette avancée a permis l'émergence de cas d'usage structurants : **finance décentralisée (DeFi), identités numériques ou encore gestion d'actifs tokenisés.**

L'adoption de la blockchain s'accélère, portée par des **efforts croissants en matière d'évolutivité, d'interopérabilité et de durabilité.** La transition vers des mécanismes de consensus basés sur la preuve d'enjeu (Proof of Stake – PoS) a réduit la consommation énergétique de plus de 99 %[87], atténuant les préoccupations environnementales.

87 - https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/articles/2022/9/ethereum-s-99-cut-in-energy-use-will-curb-crypto-s-climate-footprint-72145342#:~:text=ethereum's%2099%25%20cut%20in%20energy%20use%20will%20curb%20crypto's%20climate%20footprint,-by%20zack%20hale&text=the%20ethereum%20network's%20previous%20consensus,laptops%20and%20stable%20internet%20connections

Les solutions de couche 2, telles que Polygon, et les protocoles à faible impact énergétique, comme Algorand ou Solana, contribuent à une blockchain plus efficiente.

Les cas d'usage clés continuent de se structurer autour de quatre piliers : la tokenisation (transformation d'actifs physiques ou numériques en jetons échangeables), la finance décentralisée (transactions sans intermédiaire), l'identité décentralisée (gestion autonome de l'identité), et les contrats intelligents (automatisation de processus métiers).

Malgré les **défis persistants liés à la régulation, à la complexité technique et à l'adoption à grande échelle**, la blockchain redéfinit les modèles transactionnels et les architectures économiques. Son évolution actuelle, portée par l'intégration de l'IA agentique[88], la montée des actifs tokenisés du monde réel et l'émergence d'infrastructures financières décentralisées, annonce une nouvelle phase d'innovation au cœur de l'économie numérique.

Custodial wallet (NOW)

Les portefeuilles de garde (custodial wallets) s'imposent comme un levier stratégique dans l'adoption institutionnelle des crypto-actifs. Les banques et acteurs financiers traditionnels investissent progressivement ce champ, en s'appuyant sur leur expertise en conformité et en gestion des risques pour **proposer des solutions sécurisées de stockage d'actifs numériques.** Cette évolution participe à la structuration et à la légitimation du marché des cryptomonnaies, en l'alignant sur les standards réglementaires et financiers existants.

En 2024, des institutions majeures comme JPMorgan[89] et BNY Mellon[90] ont lancé des services de conservation d'actifs numériques, marquant une étape significative dans l'intégration des cryptomonnaies au sein du système bancaire. Ces solutions contribuent à renforcer la protection des investisseurs tout en répondant aux obligations réglementaires telles que les normes KYC (Know Your Customer) et AML (Anti-Money Laundering).

Les banques adoptent des approches variées pour se positionner sur ce marché : acquisition de fournisseurs spécialisés, développement de solutions propriétaires ou partenariats avec des dépositaires expérimentés. À titre d'exemple, Vaultody[91] propose des solutions de conservation et de co-conservation adaptées aux exigences institutionnelles, permettant aux banques d'accélérer leur mise sur le marché sans lourds investissements techniques.

À l'horizon 2026, les établissements bancaires devront déclarer leur exposition aux crypto-actifs, renforçant la transparence du marché et accélérant le recours à des services de garde règlementaires[92]. Dans ce contexte, les institutions conçoivent des architectures hybrides combinant sécurité on-chain et contrôle institutionnel, optimisant ainsi la gestion des actifs numériques.

La convergence entre actifs traditionnels et crypto-actifs s'accélère. Les investisseurs, particuliers comme institutionnels, bénéficient désormais de plateformes unifiées leur permettant de gérer monnaies fiduciaires et cryptomonnaies au sein d'un même environnement bancaire sécurisé.

Stablecoins (NOW)

Les **stablecoins** occupent une place centrale dans l'écosystème financier numérique, en apportant une alternative stable aux crypto-actifs volatils. Utilisés dans les paiements, la finance décentralisée (DeFi), les transferts internationaux ou encore le financement du commerce, ils permettent des **transactions rapides et peu coûteuses**, tout en favorisant l'inclusion financière. Dans les économies marquées par l'instabilité monétaire, ils constituent une solution de préservation du pouvoir d'achat.

Leur adoption s'intensifie, notamment du côté des banques et institutions financières. La FV Bank, par exemple, a intégré les stablecoins à ses solutions de paiement, permettant aux entreprises d'effectuer des transactions sans nécessiter une expertise blockchain[93]. Pour son PDG, Miles Paschini, ces actifs représentent un complément naturel aux systèmes de paiement existants, facilitant l'intégration de la blockchain dans les services financiers traditionnels.

Les banques perçoivent également dans les stablecoins un levier d'innovation : réduction du coût des transactions transfrontalières de titres, démocratisation de l'usage de la blockchain auprès des PME, ou encore accélération de l'adoption de services financiers décentralisés. En 2025, la distinction entre stablecoins et CDBC devient un enjeu structurant. Tandis que les États-Unis poursuivent leur développement autour des

88 - https://www.fintechfutures.com/ai-in-fintech/agentic-ai-and-the-future-of-fintech-and-banking-automation
89 - https://www.jpmorgan.com/kinexys/index
90 - bny mellon s'apprête à prendre les cryptomonnaies de ses clients | plongée bancaire
91 - Advanced Solutions for Secure Digital Asset Management
92 - l'organisme mondial de normalisation bancaire approuve le cadre de déclaration de transparence pour les expositions aux cryptomonnaies
93 - fv bank - services bancaires aux entreprises pour les petites et moyennes entreprises

stablecoins, l'Europe accélère la mise en œuvre de sa propre CBDC. Contrairement aux monnaies numériques émises par les banques centrales, les stablecoins représentent une version tokenisée d'une monnaie fiduciaire, émise par des acteurs privés et utilisée comme référence stable dans un environnement crypto volatil.

Sur le marché, plusieurs stablecoins se distinguent. Tether (USDT) domine en capitalisation, Circle (USDC) se positionne sur la transparence avec des attestations de réserves hebdomadaires, PayPal USD (PYUSD), lancé en partenariat avec Paxos, cible les paiements numériques, tandis que Paxos Dollar (USDP) publie des rapports mensuels garantissant la fiabilité de ses réserves[94].

Alliant stabilité, rapidité et faible coût, **les stablecoins devraient poursuivre leur intégration dans les systèmes financiers mondiaux**. Leur montée en puissance s'accompagnera d'une régulation accrue et d'un élargissement progressif des cas d'usage, notamment dans les paiements internationaux et le financement du commerce.

CBDC (NEW)

Face à une demande croissante de solutions de paiement numérique souveraines, plus de 130 pays envisagent aujourd'hui le lancement de CBDC[95] . Ces initiatives visent à garantir des services de paiement universels, favoriser l'inclusion financière et renforcer la souveraineté monétaire. Dans un contexte où les frais imposés par les grands réseaux de paiement internationaux – tels que Visa et Mastercard – ne cessent d'augmenter, les CBDC apparaissent également comme **une alternative plus économique pour les consommateurs**.

On distingue deux grandes catégories de CBDC : les CBDC de détail, destinées au grand public pour les paiements du quotidien, et les CBDC de gros, conçues pour les transactions interbancaires. Les premières offrent une version numérique sécurisée de la monnaie centrale, limitant les risques liés aux monnaies numériques privées. Les secondes visent à fluidifier les paiements entre institutions financières, en assurant des transactions continues (24/7), une interopérabilité accrue et une réduction significative des coûts opérationnels. Si la blockchain et les technologies de registre distribué (DLT) sont souvent mises en œuvre, d'autres architectures techniques sont également à l'étude.

Plusieurs pays ont déjà franchi le cap. Les Bahamas ont lancé le Sand Dollar dès 2019, devenant la première CBDC officiellement déployée en 2020. Le yuan numérique chinois (e-CNY), également initié en 2019, a connu une adoption rapide, atteignant 1 800 milliards de yuans de transactions en juin 2023[96].

En Europe, la Banque centrale européenne a lancé en octobre 2023 un projet d'euro numérique, avec pour objectif de définir les cadres technologiques et réglementaires de cette monnaie. À ce stade, la solution ne s'appuie pas sur les technologies de registre décentralisé. La décision de lancement est attendue fin 2025 ou début 2026, pour un déploiement potentiel à l'horizon 2028. Ce projet suscite néanmoins des interrogations du côté des banques commerciales, qui anticipent un impact sur leur stabilité financière, en particulier sur les revenus issus des dépôts et des services de paiement[97].

À l'horizon 2025, **l'adoption des CBDC devrait s'accélérer sous l'effet conjugué des avancées réglementaires et technologiques**. Elles joueront un rôle croissant dans les paiements internationaux, la gestion des flux de capitaux et la consolidation des souverainetés monétaires dans l'économie numérique.

Tokenized asset (NEW)

La tokenisation d'actifs consiste **à convertir des actifs réels** – immobiliers, actions, obligations, matières premières, crédits carbone ou objets de collection – **en jetons numériques** sur une blockchain ou un registre distribué. Cette transformation facilite leur division, leur échange et leur transfert, tout en réduisant les délais de règlement et en renforçant la liquidité et la gestion des actifs.

La tokenisation gagne du terrain dans les secteurs financiers, portée par les gains d'efficacité liés à l'automatisation. En supprimant les intermédiaires traditionnels, elle permet des économies substantielles et introduit des mécanismes de règlement instantané ou programmé, à l'image du Delivery vs Payment (DvP). **Ces opérations automatisées remplacent les processus de compensation complexes et multi-acteurs**, qui s'étendent souvent sur plusieurs jours.

94 - stablecoin paypal | crypto-monnaie en dollar américain | paypal états-unis
95 - effects-of-a-digital-euro-on-financial-stability-and-consumer-welfare_ce-report_december2023.pdf
96 - China's digital yuan transactions seeing strong momentum, says cbank gov Yi | Reuters
97 - Study shows 130 countries exploring central bank digital currencies | Reuters

Plusieurs grandes institutions ont déjà engagé des initiatives ambitieuses dans ce domaine. Goldman Sachs a structuré une division dédiée aux actifs numériques et développé ses comptes de dépôt tokenisés (JPMC). Standard Chartered a lancé Libeara, une plateforme de tokenisation pour les marchés financiers[98]. De son côté, HSBC étend la portée de sa plateforme d'obligations tokenisées, Orion, en s'implantant sur le marché Asie-Pacifique avec le soutien d'acteurs comme l'Autorité monétaire de Hong Kong (HKMA)[99].

L'année 2025 pourrait marquer une accélération de ces initiatives, notamment aux États-Unis, où les efforts de clarification réglementaire portés par la SEC devraient faciliter l'intégration des actifs tokenisés dans les portefeuilles institutionnels. Cette évolution réglementaire pourrait ouvrir la voie à des marchés financiers plus fluides, automatisés et intégrés.

Cependant, la généralisation de la tokenisation reste freinée par le manque d'interopérabilité entre les différentes infrastructures blockchain. Cette fragmentation limite la fluidité des transactions et complique la gestion des actifs numériques d'une plateforme ou d'un prestataire à l'autre. Sans convergence mondiale vers des normes de tokenisation communes et une meilleure interconnexion des écosystèmes, l'adoption restera concentrée sur des initiatives institutionnelles privées.

Zero-Knowledge Proof – ZKP (NEW)

Les **preuves à divulgation nulle de connaissance sont des protocoles cryptographiques** permettant de **prouver la validité d'une information sans en révéler le contenu**. Fondées sur trois principes – exhaustivité, solidité et non-divulgation – elles offrent une réponse efficace aux enjeux de confidentialité et de sécurité dans les échanges numériques.

Dans un contexte marqué par le renforcement des réglementations sur la protection des données, telles que le RGPD en Europe, les ZKP se positionnent comme un levier stratégique pour la validation d'identité et la protection des données personnelles. Par exemple, lors d'un processus KYC pour l'ouverture d'un compte bancaire, un client peut démontrer sa majorité sans révéler sa date de naissance ni son identité complète. Seul le résultat de la vérification (positif ou négatif) est partagé, préservant ainsi la confidentialité des informations sensibles[100].

L'adoption des ZKP s'accélère dans l'écosystème blockchain. Ces protocoles permettent de valider des transactions ou d'authentifier des identités sur la chaîne sans exposer d'informations confidentielles. Alors que la blockchain garantit transparence et traçabilité, elle souffre de limitations en matière de confidentialité : les ZKP viennent pallier cette lacune, en renforçant la sécurité des données tout en étendant les cas d'usage dans des environnements où la discrétion est essentielle, comme la finance ou les chaînes d'approvisionnement[101].

Dans le secteur financier, les ZKP permettent notamment de valider des transactions sans révéler ni l'émetteur, ni le destinataire, ni le montant échangé – une avancée majeure pour les applications de paiement confidentielles.

À l'horizon 2025, **les ZKP devraient s'imposer comme un vecteur d'interopérabilité entre blockchains et systèmes traditionnels**, facilitant des interactions sécurisées, auditées mais non intrusives. Portées par des avancées techniques en matière de performance et d'accessibilité, elles pourraient transformer durablement la gestion de l'identité numérique et la confidentialité des échanges.

Malgré leur potentiel, leur déploiement à grande échelle reste **freiné par la complexité technique et les exigences élevées en puissance de calcul**. Toutefois, les efforts de recherche et les optimisations en cours ouvrent la voie à des implémentations plus légères et plus rapides, favorisant leur intégration progressive dans les secteurs industriels et financiers.

98 - https://www.rwa.world/projects/Libeara%20(by%20Standard%20Chartered)
99 - https://www.gbm.hsbc.com/en-gb/insights/financing/first-multi-currency-digital-bond-offering
100 - https://www.circularise.com/blogs/zero-knowledge-proofs-explained-in-3-examples
101 - https://www.understandingrecruitment.com/knowledge-hub/blog/how-can-zero-knowledge-zkp-and-blockchain-interlock

7

Immersive tech

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

Si les expériences de réalités virtuelles, augmentées ou mixtes constituent le cœur de notre domaine technologique, nous adoptons désormais une compréhension plus vaste du concept d'immersion. Nous incluons à présent les notions de sensations, de contrôle et d'interactions plus larges, permises notamment par les technologies haptiques ou encore les interfaces cerveau-ordinateur (BCI).

Cette année, les technologies immersives séduisent essentiellement le milieu de la formation, avec des modules de plus en plus sophistiqués, réalistes et dynamiques, notamment enrichis par l'IA générative. Ces formations simulent des environnements complexes ou à risque et peuvent notamment faciliter l'accueil de nouveaux opérateurs dans une ligne de production. Le milieu médical s'y penche également sérieusement, du fait de son potentiel pour la formation des jeunes chirurgiens ou pour l'enrichissement des diagnostics et imageries.

Au-delà de la formation, les industriels adoptent progressivement les technologies immersives pour l'interconnexion de leurs jumeaux numériques, créant ainsi un « métavers industriel », où toutes les virtualisations des produits et chaînes de productions sont liées et paramétrables, permettant d'en tester les impacts dans le virtuel avant de les appliquer au monde réel.

AR & VR (NOW)

La **réalité augmentée et la réalité virtuelle** poursuivent leur déploiement à grande échelle, en particulier dans les secteurs où **l'immersion, la visualisation et l'interaction** jouent un rôle stratégique. Historiquement associées au divertissement, ces technologies ont aujourd'hui trouvé leur place dans des usages professionnels matures, notamment pour la formation, la maintenance, la collaboration à distance et la conception industrielle.

En 2024, les casques VR haut de gamme sont de plus en plus utilisés dans les environnements industriels pour simuler des procédures complexes, optimiser la formation en conditions immersives, ou encore faciliter la modélisation 3D collaborative. En parallèle, les solutions AR s'allègent et montent en puissance. Des dispositifs comme Meta Aria[102] ou les prototypes du projet Orion visent une meilleure intégration à l'environnement de travail, avec des applications concrètes en support opérationnel ou en guidage temps réel.

La tendance s'accompagne de l'intégration progressive de moteurs 3D et d'outils d'IA générative dans les pipelines de production de contenus immersifs. Unreal Engine et Unity expérimentent déjà des outils permettant de générer dynamiquement des scènes, avatars

102 - https://www.projectaria.com/

ou scénarios interactifs, réduisant la charge de conception tout en enrichissant l'expérience utilisateur.

Enfin, pour soutenir l'écosystème logiciel, des plateformes comme Android XR ou Horizon OS[103] se développent pour offrir un socle unifié aux développeurs AR/VR, avec un focus sur l'optimisation des performances, la compatibilité matérielle et la simplification du déploiement multi-appareils.

Loin des promesses futures du spatial computing, AR et VR incarnent déjà **une réalité industrielle avec des cas d'usage éprouvés, des outils de création stabilisés et une trajectoire d'adoption continue** dans les environnements professionnels.

Web 3D (NOW)

Le **Web 3D** désigne l'**intégration d'éléments tridimensionnels interactifs et immersifs dans les interfaces web**, avec pour objectif d'**offrir des expériences en ligne plus engageantes et dynamiques**. Contrairement aux interfaces 2D classiques, le Web 3D permet aux utilisateurs de naviguer dans des environnements animés, proches de l'expérience spatiale réelle, favorisant ainsi l'interaction avec les objets et les contenus.

Ce nouvel espace web s'appuie sur un socle technologique robuste : l'API WebGL pour le rendu graphique, ainsi que des frameworks comme Three.js, Babylon.js ou PlayCanvas qui simplifient la conception de scènes et d'animations 3D. À cela s'ajoutent des interfaces comme WebXR (ex-WebVR) permettant l'intégration de contenus en réalité virtuelle et augmentée directement dans les navigateurs.

Depuis mi-2024, l'introduction de WebGPU[104] marque une évolution majeure. Déployée progressivement dans les principaux navigateurs modernes et intégrée à la dernière version du moteur Unity[105], cette nouvelle API offre un gain significatif en performance. Elle réduit la charge JavaScript tout en multipliant par trois la vitesse d'inférence de modèles de machine learning, grâce à une programmation GPU plus directe et flexible.

Le Web 3D trouve des applications concrètes dans le e-commerce, où l'affichage de produits en 3D permet une meilleure visualisation, et peut améliorer les taux de conversion jusqu'à 250 %, selon la plateforme Threekit[106]. Des entreprises comme IKEA proposent désormais des modules de configuration 3D, renforçant l'engagement avant l'achat[107]. D'autres secteurs s'en emparent également : l'éducation, la formation professionnelle ou encore les jeux en ligne tirent parti des simulations interactives qu'offre cette technologie.

Malgré ces avancées, le Web 3D reste confronté à plusieurs défis. **La compatibilité entre navigateurs, les exigences matérielles et les contraintes de bande passante peuvent encore limiter l'expérience utilisateur**. Les développeurs doivent aussi composer avec des enjeux de performance en temps réel – notamment avec WebXR – ainsi qu'avec des normes de sécurité renforcées pour les contenus dynamiques.

À mesure que les technologies se stabilisent et que les navigateurs évoluent, le Web 3D s'affirme comme un levier d'innovation pour les interfaces numériques, avec un fort potentiel dans la création d'expériences immersives à forte valeur ajoutée.

Spatial computing (NEW)

Le **spatial computing** désigne **une nouvelle génération d'interaction entre le monde numérique et l'environnement physique**. Là où l'AR ajoute des éléments virtuels statiques et la VR plonge l'utilisateur dans un univers entièrement numérique, le spatial computing fusionne ces deux approches. Il projette des objets numériques dynamiques dans le monde réel en s'appuyant sur une analyse en temps réel de l'environnement via un réseau de capteurs et une puissance de calcul avancée. Les interactions s'effectuent par gestes, commandes vocales ou suivi du regard, renforçant l'immersion et l'intuitivité de l'expérience. En complément, l'IA Générative qui permet la création dynamique d'environnements, d'avatars, d'objets 3D et de scénarios adaptatifs, contribue à rendre ces expériences interactives infiniment personnalisables.

103 - Introducing Our Open Mixed Reality Ecosystem | Meta
104 - https://developer.chrome.com/docs/web-platform/webgpu/overview?hl=fr
105 - https://unity.com/solutions/web
106 - https://www.lepoint.fr/stories/developpement-web-3d-comment-la-france-peut-elle-saisir-cette-revolution-digitale-13-09-2024-2570166_3919.php#11
107 - https://www.ikea.com/fr/fr/planners/

Au-delà de l'aspect immersif, **le contenu est continuellement enrichi par GenAI**. En supprimant les limites du codage prédéfini, cette approche permet, ouvrant la voie à des expériences interactives infiniment personnalisables.

Le lancement officiel de l'Apple Vision Pro en juin 2024 marque une avancée majeure dans la démocratisation du spatial computing. Ce positionnement stratégique a entraîné une intensification des initiatives chez les grands acteurs technologiques : Meta a dévoilé les capacités étendues de son Quest 3S lors du Meta Connect 2024, et Samsung a présenté son projet Moohan au Mobile World Congress 2025.

Les cas d'usage se multiplient : optimisation des opérations, simulations immersives, formations professionnelles, ou encore création d'environnements collaboratifs… Dans le secteur de la santé, les chirurgiens de l'UC San Diego utilisent l'Apple Vision Pro depuis près d'un an[108] pour former les étudiants en médecine. L'appareil améliore la précision des gestes, permet l'affichage des signes vitaux sans détourner le regard du champ opératoire et facilite l'analyse anatomique avec des solutions comme celles proposées par Siemens Healthineers.

Le marché du spatial computing bénéficie de perspectives solides, avec une croissance annuelle estimée à plus de 20 % d'ici 2030[109]. La technologie figure également parmi les dix innovations disruptives à suivre en 2025 selon le magazine Forbes[110]. Ces signaux confirment son potentiel à transformer durablement l'interaction homme-machine, malgré des défis encore présents en matière de connectivité, d'interopérabilité, d'ergonomie et de coût.

Industrial metaverse (NEW)

Le **métavers industriel** constitue un véritable changement de paradigme dans la manière dont les entreprises conçoivent, pilotent et optimisent leurs opérations. Il s'agit d'un **environnement virtuel interconnecté**, dans lequel des **représentations numériques d'actifs physiques, de processus et de systèmes industriels interagissent en temps réel**. Ce nouvel espace numérique, alimenté par les données, associe simulations, modèles virtuels et espaces collaboratifs pour favoriser l'innovation et la performance opérationnelle.

Considéré comme l'évolution naturelle des jumeaux numériques, **le métavers industriel en étend la portée**. Là où un jumeau numérique se limite souvent à un actif ou processus isolé, le métavers industriel combine plusieurs jumeaux avec d'autres sources de données dans un environnement commun. Il donne ainsi naissance à une forme d' « Internet of Twins »[111], offrant une vision plus holistique, interconnectée et dynamique des systèmes industriels. Cette approche permet des simulations plus avancées, des analyses croisées à grande échelle et une prise de décision optimisée à l'échelle de l'entreprise.

En 2024, bien que la technologie reste émergente, de nombreuses entreprises ont déjà engagé des investissements stratégiques dans la construction de ces écosystèmes numériques industriels. Selon un rapport de S&P 451 Research en partenariat avec Siemens, 81 % des entreprises interrogées déclarent avoir initié des projets liés au métavers industriel[112]. Environ deux tiers d'entre elles ont déjà mis en œuvre des cas d'usage dans l'ingénierie produit, les opérations, le support aux équipes ou encore la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Le rapport souligne également une accélération des investissements, avec 62 % des entreprises ayant augmenté leurs budgets dans ce domaine en 2024.

L'usine Siemens d'Erlangen, en Allemagne, illustre les bénéfices de cette approche. Reconnue par le Forum économique mondial comme « usine phare numérique »[113], elle s'appuie sur une combinaison de jumeaux numériques, d'IA et de robotique. Résultat : une hausse de 69 % de la productivité, une réduction de 42 % de la consommation énergétique sur quatre ans, et un modèle de

108 - https://www.popsci.com/technology/apple-vision-pro-surgery/
109 - https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/spatial-computing-market-report
110 - https://www.forbes.com/councils/forbesbusinesscouncil/2025/02/21/disruptive-technology-trends-to-watch-in-2025/
111 - https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2025/01/Internet-of-Twins.pdf
112 - https://www.siemens.com/global/en/company/insights/the-state-of-the-industrial-metaverse.html
113 - https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-electronics-factory-erlangen-awarded-digital-lighthouse-world-economic-forum#:~:text=The%20World%20Economic%20Forum%20(WEF,application %20quatrième %20industrielle %20révolution %20technologies

référence pour le développement du métavers industriel.

Ces premiers résultats confirment le potentiel de cette technologie à transformer en profondeur les environnements industriels, **à condition de relever les défis liés à l'interopérabilité, à la normalisation des données et à la sécurité des systèmes virtuels**.

Haptic tech (NEXT)

Les **technologies haptiques** désignent l'ensemble des **dispositifs permettant de restituer des sensations tactiles telles que la vibration, la pression, le retour de force ou le toucher**. Déployées aussi bien dans des environnements virtuels que dans des applications physiques, elles simulent textures, chocs ou mouvements, **enrichissant l'expérience utilisateur** par un retour sensoriel immersif.

La majorité des dispositifs actuels repose sur des méthodes mécaniques, comme les moteurs haptiques présents dans les smartphones, les actionneurs à masse rotative excentrique (ERM) ou les actionneurs résonants linéaires (LRA), offrant des vibrations plus sophistiquées. D'autres approches plus avancées explorent l'électrostimulation musculaire (EMS) ou la stimulation nerveuse électrique transcutanée (TENS), pour reproduire des sensations plus complexes.

Ces technologies peuvent être embarquées dans les objets eux-mêmes ou intégrées à des équipements portables tels que des gants, des vestes (comme la Skinetic d'Atronika[114]) ou des combinaisons immersives (à l'image de la Teslasuit[115]). En introduisant une dimension tactile dans les interactions numériques, elles renforcent la mémorisation et l'impact émotionnel dans des contextes tels que la formation.

Les cas d'usage se multiplient. Les simulateurs de vol ou de conduite utilisent un retour de force plus réalistes, comme ceux proposés par les actionneurs D-BOX[116]. Dans l'industrie, les technologies haptiques facilitent l'usage d'outils mécanisés en production ou maintenance. Le secteur médical français explore également ces dispositifs pour renforcer l'efficacité de ses programmes de formation immersive.

Cependant, leur adoption à grande échelle reste freinée par **la complexité des composants nécessaires à la reproduction réaliste des sensations**, et en particulier leur robustesse et leur accessibilité. Il faudra encore quelques années d'optimisation avant que ces technologies ne se démocratisent au sein des environnements professionnels.

Brain-Computer Interface – BCI (NEXT)

Les neurotechnologies offrent une interaction directe entre le cerveau et un environnement numérique ou physique, dépassant les interfaces traditionnelles (claviers, écrans, manettes) **pour plonger l'utilisateur dans une expérience sensorielle, cognitive ou motrice inédite**.

A ce titre, les interfaces cerveau-machine connaissent un **essor fulgurant du fait des avancées majeures en ingénierie embarquée et en IA**. Si Neuralink a fait les gros titres en raison de son fondateur controversé, d'autres entreprises - dont Precision, Blackrock Neurotech, Paradromics et Inbrain Neuroelectronics - ont également progressé dans le développement des ICM. Ces-dernières reposent sur trois étapes clés : (1) l'enregistrement de l'activité cérébrale via des capteurs (EEG, implants) ; (2) le traitement des signaux par des algorithmes permettant d'identifier l'état neurocognitif de l'utilisateur ; (3) la conversion de cet état neurocognitif en une commande digitale interprétable par un programme ou une machine.

Ces technologies révolutionnent la médecine, notamment pour restaurer l'autonomie des patients en situation de handicap. En 2023,

114 - Skinetic by Actronika - Immersive Haptics for VR and Gaming
115 - Teslasuit | Meet our Haptic VR Suit and Glove with Force Feedback
116 - https://www.d-box.com/en/haptic-technology

le CEA de Grenoble et l'EPFL ont ainsi permis à un homme paraplégique de remarcher grâce à deux implants WIMAGINE positionnés au niveau du cerveau et de la moelle épinière du patient[117].

Mais les ICM ne se limitent plus aux usages médicaux et s'ouvrent au grand public dans des domaines comme le divertissement, le bien-être ou la formation. **Les dispositifs non-invasifs deviennent plus ergonomiques**, comme en témoignent le récent brevet déposé par Apple, portant sur des écouteurs EEG intra-auriculaires, ou le bandeau connecté de l'entreprise américaine Muse, qui analyse le sommeil et optimise la méditation[118].

Au-delà du suivi neurocognitif et du contrôle d'objets par la pensée, les neurotechnologies investissent également le champ de la neurostimulation, afin de moduler directement des états mentaux (douleur, stress, fatigue) via des impulsions électriques ciblées, à l'instar du matériel proposé par StenUp[119].

Les ICM et les cas d'usages associés n'ont donc cessé de se développer depuis 10 ans et leur avenir semble plus que prometteur. Notamment, l'usage de cette technologie dans un contexte « Intelligent Industry » est aujourd'hui particulièrement scruté tant il pourrait optimiser la sécurité du travailleur, son bien-être et sa productivité. Cependant, **l'adoption massive des neurotechnologies soulève des défis majeurs en matière d'éthique et d'acceptabilité**, notamment en raison de la sensibilité des données cérébrales collectées, qui nécessiteront des protocoles de sécurisation renforcés.

Virtual human (NEXT)

Les humains virtuels sont des **représentations numériques hyperréalistes conçues pour simuler le comportement, l'expression et l'interaction humaine.** Pilotés par des intelligences artificielles avancées, ces agents numériques encodent savoir-faire, traits de personnalité et intentions comportementales, leur permettant de mener des conversations naturelles, d'exprimer des émotions, de conseiller en temps réel et d'accomplir des tâches.

Au-delà de leur intelligence, leur apparence visuelle – leur « corps » numérique – bénéficie des dernières avancées en modélisation 3D. Chaque micro-expression, mouvement du visage ou intention devient perceptible, renforçant ainsi l'authenticité des interactions et le sentiment de présence.

Déployés dans des environnements immersifs ou semi-immersifs, les humains virtuels peuvent endosser diverses casquettes : assistant administratif, conseiller en service client, compagnon social ou encore influenceur virtuel[120]. Ces usages trouvent une résonance particulière dans les secteurs du divertissement, de la formation ou de la publicité.

Un exemple emblématique de cette tendance est la collaboration entre Nvidia et l'entreprise japonaise Aww Inc., annoncée en juin 2024[121]. Ce partenariat vise à renforcer les capacités d'imma AI, version automatisée de l'influenceuse virtuelle imma, permettant aux utilisateurs d'interagir en temps réel avec une version alimentée par IA.

Malgré leur potentiel, les humains virtuels soulèvent des questions éthiques sensibles : manipulation émotionnelle, gestion de la vie privée[122], confusion entre réel et simulé. Sur le plan technique, leur fonctionnement nécessite une forte puissance de calcul, des capacités de stockage élevées et une connectivité fiable. Pour favoriser leur adoption à grande échelle, **des avancées technologiques continues devront s'accompagner d'une gouvernance éthique rigoureuse.**

117 - https://www.chuv.ch/fr/chuv-home/espace-pro/journalistes/communiques-de-presse/detail/une-personne-paraplegique-retrouve-un-controle-naturel-de-ses-jambes-par-la-pensee
118 - https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US402825807&_cid=P10-LRT3OJ-01103-1https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US402825807&_cid=P10-LRT3OJ-01103-1
119 - https://www.stenup.com/fr/256-stimulation-nerf-vague
120 - https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/14695405221117195
121 - NVIDIA Corporation - NVIDIA Releases Digital Human Microservices, Paving Way for Future of Generative AI Avatars
122 - https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0747563223002480

8

Next-gen computing

Les technologies quantiques redéfinissent en profondeur les capacités technologiques à travers l'ensemble des secteurs industriels. Les capteurs quantiques, exploitant des phénomènes tels que la superposition et l'intrication, offrent des niveaux de précision inégalés pour des applications allant de la navigation autonome à l'imagerie médicale avancée. Le calcul quantique, quant à lui, promet de résoudre des problématiques d'optimisation ou de simulation moléculaire bien au-delà des capacités des architectures classiques. En parallèle, la communication quantique et le développement de réseaux quantiques permettent d'envisager des transmissions ultra-sécurisées, répondant aux menaces émergentes que font peser les ordinateurs quantiques sur les systèmes de chiffrement asymétrique actuels.

D'autres approches de rupture progressent en parallèle. Le computing neuromorphique, inspiré de l'architecture du cerveau humain, s'impose comme une piste prometteuse pour le traitement en temps réel de données complexes, tout en réduisant considérablement la consommation énergétique. Le computing photonique, en exploitant les propriétés de la lumière pour le traitement de l'information, ouvre la voie à des performances accrues en matière de vitesse et de bande passante, en particulier pour les charges liées aux données massives. Enfin, le biocomputing, à la croisée de la biologie synthétique et de l'informatique, explore l'utilisation de structures biologiques comme l'ADN pour des applications innovantes en calcul et en stockage de l'information.

En 2024, ces technologies entrent dans une phase de consolidation avec les premiers déploiements en conditions réelles. Elles s'imposent désormais comme des leviers stratégiques au cœur des enjeux de souveraineté technologique, de performance industrielle et de compétitivité à long terme.

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

Quantum Key Distribution (QKD) (NEW)

La distribution quantique de clés repose sur les principes de la physique quantique pour sécuriser les communications. **Elle permet l'échange de clés cryptographiques de manière inviolable** : toute tentative d'interception modifie le signal et est immédiatement détectée. Considérée comme une réponse stratégique aux futures menaces liées aux ordinateurs quantiques, cette technologie vise à **pallier la vulnérabilité des algorithmes de chiffrement classiques**.

En 2024, plusieurs entreprises et centres de recherche ont lancé des preuves de concept pour explorer la faisabilité d'un déploiement à grande échelle. La société canadienne Quantized Technologies Inc. (QTi) développe une solution combinant QKD matérielle et cryptographie post-quantique logicielle, facilitant une transition sécurisée vers des protocoles résistants aux attaques quantiques[123]. En parallèle, en partenariat avec Hispasat, le projet QKD-GEO explore la

123 - https://www.quantizedtech.com/solutions

transmission de clés quantiques depuis l'orbite géostationnaire, avec pour ambition de sécuriser les communications entre la Terre et l'espace[124]. Ce projet, soutenu par des financements européens, illustre l'intérêt stratégique porté à la cybersécurité quantique.

Le développement de la QKD repose aujourd'hui sur une approche hybride : combiner les systèmes quantiques avec les infrastructures classiques afin de faciliter leur adoption progressive. Face à l'émergence des risques liés aux ordinateurs quantiques, les entreprises et institutions se préparent à la transition vers la cryptographie post-quantique. Dans ce contexte, les régulateurs commencent à imposer des échéances pour l'abandon des algorithmes vulnérables, accélérant l'intérêt pour des solutions telles que la QKD.

Cependant, la technologie reste confrontée à plusieurs freins. Les limitations de distance pour la transmission des photons quantiques et les coûts élevés liés aux infrastructures ralentissent son adoption. Des efforts importants sont encore nécessaires pour industrialiser les dispositifs, en particulier pour les adapter à des cas d'usage au-delà des environnements expérimentaux.

Au cours de la prochaine décennie, la QKD pourrait s'imposer comme une brique incontournable dans les architectures de cybersécurité des infrastructures critiques. Son évolution dépendra des avancées techniques, mais aussi de la coordination réglementaire et de la maturité du marché.

Quantum computing (NEW)

L'informatique quantique repose sur les principes de la mécanique quantique — notamment la superposition et l'intrication — pour exécuter des calculs à des vitesses hors de portée des ordinateurs classiques. **En exploitant des qubits capables de représenter simultanément plusieurs états**, ces systèmes ouvrent des perspectives majeures dans des domaines comme la simulation de matériaux, l'optimisation combinatoire ou encore l'IA.

L'année 2024 a été marquée par plusieurs avancées significatives. En Australie, PsiQuantum[125] a obtenu un investissement de 940 millions AUD du gouvernement dans le cadre de la stratégie "Future Made in Australia", pour le développement d'un ordinateur quantique commercialement viable à Brisbane. Aux États-Unis, Quantinuum – filiale de Honeywell – a levé 300 millions USD[126], atteignant une valorisation de 5 milliards USD, avec le soutien d'investisseurs stratégiques comme JPMorgan Chase. En parallèle, le gouvernement américain a imposé des restrictions d'exportation à QuantumCTek, une startup chinoise active dans les technologies de communication quantique, illustrant les enjeux croissants de souveraineté et de contrôle technologique dans ce domaine[127].

En 2025, les efforts du secteur se concentreront sur l'amélioration de la correction d'erreurs et le développement de systèmes modulaires plus robustes. IBM prévoit d'optimiser la performance et l'évolutivité de ses plateformes quantiques[128], tandis que NVIDIA étend sa présence dans l'écosystème via CUDA-Q[129], intégré à Amazon Braket, et renforce ses liens avec Google Quantum AI.

L'adoption progressive de l'informatique quantique **dépendra autant des avancées technologiques que de la capacité à construire des partenariats industriels et des cadres réglementaires adaptés**. À moyen terme, les entreprises devront surveiller de près ces évolutions pour anticiper les ruptures à venir dans la cryptographie, la modélisation scientifique et l'optimisation algorithmique.

Malgré son potentiel, **le développement des ordinateurs quantiques reste limité par des contraintes techniques importantes**, parmi lesquelles la décohérence, la correction d'erreurs et la stabilisation des qubits. Ces défis freinent encore l'industrialisation de la technologie à grande échelle.

Neuromorphic computing (NEXT)

L'informatique neuromorphique s'inspire de l'architecture et du fonctionnement du cerveau humain pour concevoir des circuits électroniques capables de traiter et de stocker l'information de manière distribuée et parallèle. Contrairement aux architectures

124 - Thales Alenia Space et Hispasat lancent le développement de la première capacité mondiale d'un système de distribution quantique de clés depuis l'orbite géostationnaire | Thales Alenia Space
125 - https://www.photonics.com/Articles/Related_PsiQuantum_to_Build_Utility-Scale/ar69946
126 - Honeywell Announces the Closing of $300 Million Equity Investment Round for Quantinuum at $5B pre-money valuation
127 - U.S. Commerce Department Imposes Strict Export Controls on Chinese Quantum Leader QuantumCTek
128 - IBM_Quantum_Developmen_&_Innovation_Roadmap_Explainer_2024-Update.pdf
129 - Accelerated Quantum Supercomputing with the NVIDIA CUDA-Q and Amazon Braket Integration | NVIDIA Technical Blog

traditionnelles, **cette approche bio-inspirée permet d'améliorer l'efficacité énergétique, la rapidité de traitement et l'adaptabilité des systèmes**, ouvrant de nouvelles perspectives dans le domaine de l'IA. Toutefois, son développement reste freiné par la complexité des conceptions, les coûts de fabrication élevés et l'absence de standards industriels unifiés.

En 2024, plusieurs initiatives ont illustré les avancées significatives dans ce domaine. La NASA, en partenariat avec plusieurs universités américaines, a développé le projet Martian Flight, qui intègre des réseaux neuronaux impulsionnels pour améliorer la navigation autonome de drones martiens[130]. En s'appuyant sur une caméra événementielle neuromorphique, cette technologie optimise le traitement visuel tout en limitant la consommation énergétique – un avantage crucial pour les missions spatiales dans des environnements contraints.

Intel poursuit également ses efforts avec la puce Loihi 2[131], conçue pour exécuter des tâches cognitives telles que la reconnaissance de motifs et l'apprentissage en ligne. Cette puce constitue le cœur du système Hala Point, un supercalculateur neuromorphique développé par les Sandia National Laboratories. Doté de 1,15 milliard de neurones artificiels répartis sur 1 152 puces Loihi 2 , ce système affiche une performance dix fois supérieure et une densité quinze fois plus élevée que son prédécesseur. Il vise à démocratiser l'informatique inspirée du cerveau pour des usages allant de la simulation scientifique à des applications militaires ou médicales avancées.

Parallèlement, IBM explore des architectures neuromorphiques à travers son système TrueNorth[132], tandis que le CEA-Leti[133], en collaboration avec STMicroelectronics, développe des puces bio-inspirées et des solutions d'IA embarquée, avec un accent particulier sur les architectures hybrides neuromorphiques.

Ces initiatives démontrent le potentiel croissant de cette approche, à la croisée de l'IA et des neurosciences. Toutefois, **l'industrialisation de l'informatique neuromorphique reste conditionnée par la mise en place d'un écosystème de standardisation et d'outils de développement adaptés** à ces nouvelles logiques de calcul.

Photonic computing (NEXT)

L'informatique photonique repose sur l'utilisation de photons – plutôt que d'électrons – pour réaliser des calculs, apportant des gains significatifs en vitesse de traitement et en efficacité énergétique. Grâce à leur vitesse de déplacement bien supérieure à celle des électrons, les photons permettent d'envisager des systèmes ultra-rapides et moins énergivores, notamment dans les centres de données où les connexions optiques remplacent progressivement les câbles en cuivre. Cette approche **ouvre également des perspectives prometteuses pour l'émergence d'un internet quantique**, basé sur l'interconnexion de processeurs quantiques via des réseaux en fibre optique.

L'année 2024 a été marquée par plusieurs avancées majeures dans ce domaine. Intel a présenté son premier chiplet d'entrée/sortie optique entièrement intégré, capable de supporter 64 canaux de transmission à 32 gigabits par seconde, dans chaque direction, sur une distance allant jusqu'à 100 mètres de fibre optique[134]. Cette innovation vise à répondre aux besoins croissants des infrastructures d'IA, en matière de bande passante, de réduction de la consommation énergétique et d'extension de la portée des connexions.

En parallèle, IBM, en collaboration avec le MIT, a franchi une étape décisive en développant un processeur photonique entièrement intégré capable d'exécuter toutes les opérations d'un réseau neuronal profond directement via des circuits optiques, sur une seule puce[135]. Cette approche pourrait **transformer l'apprentissage profond en le rendant plus rapide et plus économe en énergie**, avec des applications potentielles dans des domaines critiques comme la télédétection laser ou les télécommunications à très haut débit.

En Europe, la société française Quandela, spécialisée dans l'informatique quantique photonique, a lancé Lucy[136], un processeur

130 - Neuromorphic Computing for Space: Recognized Innovation at DASC 2024 | Parallax Research
131 - Intel and Sandia National Labs Roll Out 1.15B Neuron "Hala Point" Neuromorphic Research System
132 - https://www.wired.com/story/ibm-brain-like-chip/
133 - https://www.leti-cea.fr/cea-tech/leti/Documents/presse/DP_IA_FR_2023.05.pdf
134 - Intel Demonstrates First Fully Integrated Optical I/O Chiplet - Newsroom
135 - MIT Researchers Unveil Photonic Processor for Faster, Energy-Efficient AI
136 - https://www.quandela.com/qpus/lucy

quantique photonique, marquant une avancée significative dans la structuration d'un écosystème technologique européen autour du calcul photonique.

Ces développements illustrent le potentiel croissant de l'informatique photonique pour répondre aux exigences futures de calcul intensif, en particulier dans l'IA, la médecine, les télécoms ou encore le calcul quantique. À mesure que la technologie se stabilise et que les cas d'usage industriels se multiplient, elle pourrait redéfinir les standards de performance dans des environnements critiques.

Bio computing (NEXT)

Le bio-computing – ou informatique biologique – désigne l'utilisation de molécules vivantes (ADN, ARN, protéines) et de cellules pour coder, stocker et traiter de l'information. Cette approche, **à l'intersection de la biologie synthétique, de l'IA et de l'informatique non conventionnelle**, ouvre la voie à une nouvelle génération de systèmes de calcul massivement parallèles, à **faible consommation énergétique et à densité de données inégalée**.

Contrairement aux architectures électroniques classiques, les bio-ordinateurs reposent sur des mécanismes biochimiques naturels. Ils se distinguent par leur capacité à effectuer des calculs adaptatifs et leur potentiel dans des domaines tels que la détection précoce de maladies, la bioproduction ou encore l'informatique embarquée dans des environnements extrêmes.

En 2024, plusieurs projets ont démontré la viabilité de ces technologies. Cortical Labs[137] a conçu un système hybride intégrant 800 000 neurones humains et de souris capables d'apprendre à jouer à *Pong*[138], illustrant une capacité d'apprentissage en temps réel. FinalSpark[139], de son côté, a développé un processeur biologique composé de 16 organoïdes cérébraux interconnectés, offrant une efficacité énergétique supérieure à celle des processeurs numériques. CATALOG Technologies a également mis au point un système de calcul à base d'ADN, capable d'exécuter des fonctions logiques complexes.

L'ADN est par ailleurs exploré comme média de stockage à ultra-haute densité. Microsoft et l'Université de Washington travaillent à miniaturiser ces dispositifs pour les rendre exploitables à l'échelle industrielle[140]. En parallèle, des projets de type NeuroCloud[141] visent à rendre ces ressources biologiques accessibles à distance, suivant un modèle cloud partagé.

Malgré leur potentiel, ces technologies font face à des défis majeurs : fabrication complexe, faible standardisation, contraintes environnementales et enjeux éthiques liés à la manipulation du vivant. À mesure que ces verrous seront levés, le bio-computing pourrait **redéfinir les paradigmes du calcul, au service d'une informatique plus durable et plus adaptative.**

137 - https://www.nature.com/articles/s41928-023-00953-5
138 - DishBrain: Are pong-playing neurons the future of AI? - Microscopy Australia
139 - Scientists Connect 16 Mini Brains Made of Human Tissue to Create a "Living Computer"
140 - https://www.microsoft.com/en-us/research/project/dna-data-storage/
141 - https://www.neurocloud.es/en

9

Tech for digital trust

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

En 2025, le numérique est devenu un élément structurant de nos vies personnelles, professionnelles et sociétales. Il occupe le devant de la scène médiatique, s'ancre dans les politiques publiques, influence les rapports géopolitiques et suscite un intérêt constant de la part des chercheurs comme des décideurs. Dans cet environnement toujours plus interconnecté, les technologies de confiance numérique constituent le socle fondamental de notre capacité à évoluer sereinement dans l'écosystème digital. Elles jouent un rôle central dans la consolidation de la cyber-résilience, la lutte contre la fraude, le déploiement d'une IA éthique et la mise en conformité avec des réglementations toujours plus exigeantes.

Face à l'accélération des menaces et à l'évolution rapide des cadres légaux, la capacité d'anticipation devient une exigence stratégique. Elle implique une veille technologique rigoureuse pour identifier les signaux faibles, intégrer les innovations de rupture et renforcer les dispositifs de protection. La confiance numérique s'appuie ainsi sur plusieurs piliers technologiques complémentaires : les solutions d'identité numérique assurent l'authenticité des interactions, tandis que les architectures Zero Trust redéfinissent les périmètres de sécurité en les adaptant à une logique de vérification continue.

Des approches émergentes comme la cryptographie post-quantique ou le Cybersecurity Mesh transforment en profondeur les stratégies défensives. En parallèle, les technologies de préservation de la vie privée, telles que le Privacy Enhancing Computation ou le chiffrement homomorphique, permettent de concilier exploitation des données et respect de la confidentialité. Enfin, les avancées en IA, si elles ouvrent de nouvelles perspectives opérationnelles, soulèvent également des enjeux critiques en matière d'éthique et de sécurité.

Zero trust technologies (NOW)

Les technologies Zero Trust redéfinissent en profondeur les paradigmes de la cybersécurité. Fondée sur le principe du « ne jamais faire confiance par défaut », cette approche impose une **vérification systématique et continue de chaque tentative d'accès aux ressources**, qu'il s'agisse d'utilisateurs, d'applications ou de données. En rompant avec les modèles de sécurité périmétrique, elle permet une protection plus granulaire et dynamique des environnements numériques.

En 2024, l'implémentation du modèle Zero Trust s'est heurtée à plusieurs obstacles, en particulier dans des environnements opérationnels complexes comme ceux de l'industrie ou de l'énergie. L'absence de cas d'usage bien balisés et la complexité des architectures existantes ont souvent freiné son adoption en dehors du strict champ du contrôle d'accès[142]. Toutefois, des fondations solides ont été posées, notamment autour des volets réseau et identité, tandis que l'attention se déplace désormais vers la gouvernance des données. Un signal fort a été donné par la convergence des offres de Security Service Edge (SSE), avec notamment l'entrée remarquée de Microsoft sur ce marché stratégique. En parallèle, le gouvernement britannique a intégré le modèle Zero Trust dans ses lignes directrices « Secure by Design », en en faisant une référence en matière de cybersécurité d'État[143].

Adopter une posture Zero Trust devient un marqueur de fiabilité et de maturité pour les entreprises, renforçant leur crédibilité en matière de sécurité. L'IA jouera un rôle déterminant dans l'affinage des politiques d'accès, en s'appuyant sur le machine learning pour limiter la dépendance aux règles statiques ou à la gestion manuelle[144]. Ce modèle pousse également à une approche plateforme, favorisant l'adoption de solutions intégrées et stimulant la consolidation du marché. L'intégration de briques de microsegmentation, de suites SSE et de contrôles centrés sur les données (classification, étiquetage, DLP) devient une **priorité stratégique pour évoluer vers une architecture de sécurité plus automatisée, agile et résiliente.**

Digital identity & authentification (NOW)

L'identité numérique transforme en profondeur les mécanismes d'authentification et de gestion des accès, en combinant portefeuilles numériques, infrastructures à clés publiques (PKI) et biométrie. Portée par l'innovation technologique et l'évolution réglementaire, **elle vise à sécuriser les transactions, simplifier l'expérience utilisateur et renforcer la confiance numérique.** Son adoption à grande échelle reste toutefois conditionnée par des défis liés à l'interopérabilité des systèmes, à la gouvernance des données et à la compréhension des enjeux de conformité.

En 2024, de nombreux programmes nationaux et pilotes ont été lancés aux États-Unis, au Royaume-Uni ou encore dans l'Union européenne. En Europe, le règlement eIDAS 2.0 a marqué une étape clé : il impose aux États membres de déployer d'ici 2026 des services d'identification électronique (eID) intégrés dans des portefeuilles numériques européens (EUDIW)[145]. Ces outils, compatibles avec les services de confiance tels que la signature électronique qualifiée (QES), devront être reconnus aussi bien dans les secteurs publics que privés. Toutefois, des débats sur la centralisation des données, les modèles d'infrastructure (centralisés vs. décentralisés) et la souveraineté numérique ralentissent encore leur mise en œuvre. Dans le même temps, les entreprises peinent à anticiper les exigences de conformité, freinant leur engagement dans des projets structurants.

L'essor de la GenAI a également fait émerger de nouvelles menaces : usurpation d'identité, deepfakes ou fraude automatisée, complexifiant la détection et la réponse aux attaques. Face à ce contexte, les dispositifs d'identification doivent évoluer vers des modèles plus robustes, intégrant la biométrie avancée, des logiques de vérification adaptative, ainsi que des protocoles décentralisés basés sur la blockchain.

En 2025, la dynamique autour des portefeuilles numériques devrait s'accélérer, avec une priorité donnée à l'interopérabilité entre écosystèmes, à l'intégration de la biométrie dans les secteurs sensibles (banques,

142 - https://www.capgemini.com/insights/research-library/zero-trust-from-aspiration-to-rapid-implementation/
143 - Guide to adopting Secure by Design - UK Government Security - Beta
144 - https://www.weforum.org/stories/2025/01/cybersecurity-zero-trust-models/
145 - https://ec.europa.eu/digital-building-blocks/sites/display/EUDIGITALIDENTITYWALLET/EU%2BDigital%2BIdentity%2BWallet%2BHome

transports, santé) et à la modernisation des parcours de vérification (notamment KYC). Les entreprises, même si elles ne sont pas encore directement contraintes, sont invitées **à initier des cas d'usage, lancer des pilotes et anticiper leur passage à l'échelle**. Dans un contexte de numérisation massive des documents d'identité et de hausse des fraudes, **la protection des données personnelles — notamment leur confidentialité** — reste un facteur clé d'adhésion et de succès.

(GEN)AI for trust (NEW)

L'IA, et plus particulièrement l'IA générative, s'est imposée comme un catalyseur de transformation dans les métiers, tout en faisant émerger de nouveaux enjeux en matière de cybersécurité, de gouvernance et de gestion des risques. Dans ce contexte, les fonctions en charge de la confiance numérique sont amenées à adapter leurs postures, entre opportunité technologique et vigilance opérationnelle.

Le marché de la GenAI a connu une accélération marquée en 2024, portée par les investissements massifs de grands acteurs technologiques tels que Microsoft et Google. Cette dynamique a stimulé **une multiplication d'expérimentations dans les métiers, avec l'émergence de cas d'usage ciblés et de projets pilotes.** En parallèle, les fonctions cybersécurité, conformité et résilience sont restées plus prudentes. Bien que l'IA soit historiquement utilisée pour la détection de fraude ou la gestion des incidents, l'adoption de modèles génératifs a été freinée par des préoccupations liées à leur opacité, à la difficulté de supervision et aux risques associés à la manipulation de données sensibles. En conséquence, très peu d'expérimentations ont, à ce jour, été déployées à l'échelle.

En 2025, la priorité est de trouver un point d'équilibre entre innovation et exigences de confiance numérique. La pression économique incite à une rationalisation des investissements, tandis que les menaces liées à la désinformation, aux deepfakes ou à l'exposition involontaire de données critiques se multiplient[146]. Dans ce contexte, l'IA peut devenir un levier stratégique à condition de cibler des cas d'usage à forte valeur ajoutée et maîtrisable : optimisation des processus GRC (analyse contractuelle, évaluation fournisseurs), consultation intelligente des politiques internes, ou automatisation de tâches à faible risque. À l'inverse, les cas plus complexes — tels que la détection automatisée d'incidents ou la mise à jour dynamique des règles de sécurité — nécessiteront des **approches encadrées par des dispositifs de supervision renforcée et une gouvernance adaptée.**

La frontière technologique se déplace aujourd'hui vers les agents IA, capables d'exécuter de manière autonome des séquences de tâches complexes. Ces agents intelligents préfigurent un nouveau paradigme d'assistance numérique en entreprise, combinant automatisation, autonomie et adaptabilité, mais **soulèvent en retour des exigences accrues en matière de traçabilité, de contrôle et d'alignement avec les politiques de sécurité et de conformité.**

Trusted (GEN)AI (NEW)

L'IA est désormais pleinement intégrée à nos usages quotidiens. Elle s'est imposée dans la consommation numérique, via les algorithmes de recommandation, et s'est largement diffusée dans les environnements éducatifs et professionnels pour des tâches de synthèse, de recherche ou de génération de contenus visuels.

Cette adoption rapide, notamment des outils d'IA générative accessibles au grand public, a toutefois suscité une série de préoccupations majeures. En 2024, les escroqueries utilisant des deepfakes ont connu une forte augmentation, à l'image de la fraude au directeur financier survenue à Hong Kong[147] ou de la campagne internationale « Quantum AI »[148] . Dans le même temps, les grands modèles de langage (LLM) sont devenus la cible d'attaques sophistiquées : le LLMjacking[149], ou encore le flowbreaking, technique visant à contourner les garde-fous éthiques des modèles, illustrent l'évolution rapide du risque. Face à ces menaces, de nombreux acteurs renforcent leur engagement en faveur d'une IA plus responsable, tandis que les premières solutions de détection de contenus synthétiques commencent à émerger — encore perfectibles, mais en constante amélioration.

Le recours à l'IA dans les conflits armés récents (Russie-Ukraine, Israël-Hamas) remet sur le devant de la scène la question d'une IA souveraine, fiable et encadrée pour les applications militaires[150]. Par ailleurs, l'émergence d'une IA agentique — capable d'agir de manière autonome — soulève de

146 - Global Cybersecurity Outlook 2025 | World Economic Forum
147 - Deepfake CFO Video Calls Result in $25MM in Damages | Trend Micro (US)
148 - https://www.vmware.com/topics/glossary/content/software-defined-everything.html
149 - Generative AI Under Attack: Flowbreaking Exploits Trigger Data Leaks
150 - pe3-2024_ferey_et_roucy-rochegonde_0.pdf

nouveaux défis. Un cas récent a mis en évidence un agent IA développant des stratégies de triche pour remporter une partie d'échecs[151], soulignant les risques de comportements non anticipés. La mise en place de cadres de gouvernance robustes et l'acculturation des utilisateurs deviennent des leviers essentiels pour encadrer l'adoption de ces technologies.

L'entrée en vigueur du règlement européen AI Act constitue une étape structurante. En instaurant un cadre juridique contraignant pour les systèmes d'IA à haut risque, il marque une volonté forte de régulation, contrastant avec les choix plus permissifs observés dans d'autres régions du monde. Dans ce contexte, les solutions d'IA de confiance prendront une place centrale dans la stratégie des entreprises : elles permettront non seulement de garantir la conformité réglementaire, mais aussi d'améliorer les mécanismes de détection, de watermarking et de transparence algorithmique.

Dès lors, la notion de confiance s'étendra à l'ensemble de la chaîne de valeur de l'IA : qualité des données, transparence des modèles, sécurité des usages, fiabilité des infrastructures. Elle devra **intégrer les dimensions d'éthique, de résilience et de souveraineté technologique,** condition sine qua non pour une adoption durable et maîtrisée.

Post-quantum cryptography (NEW)

Les ordinateurs quantiques promettent de révolutionner le calcul en **réalisant en quelques minutes des opérations qui prendraient des siècles aux ordinateurs classiques**. Cette avancée pourrait transformer des secteurs comme la pharmacie, où la simulation de molécules serait grandement accélérée, réduisant le temps de R&D de plusieurs années, ou encore la défense, avec des systèmes de détection et de guidage indépendants des satellites.

Cependant, ces machines font encore face à des défis majeurs. La fiabilité des qubits, la décohérence et des taux d'erreur élevés limitent leur industrialisation. Même si certains acteurs comme Quantinuum ont atteint un taux de fidélité de 99,9 % sur certaines portes quantiques[152] le chemin vers des machines à tolérance d'erreur reste long.

D'ici 5 à 7 ans, la puissance croissante de ces technologies pourrait menacer les systèmes de chiffrement actuels. Le NIST alerte sur la stratégie du "store now, decrypt later[153]", où des données chiffrées aujourd'hui pourraient être décryptées demain à l'aide d'un ordinateur quantique exécutant l'algorithme de Shor, capable de casser le RSA et d'autres systèmes asymétriques.

Pour atténuer ces menaces, plusieurs technologies émergent : cryptographie post-quantique (PQC), distribution de clé quantique (QKD), et génération de nombres aléatoires quantiques (QRNG). Parmi elles, la PQC est considérée comme la plus pragmatique et accessible, déjà adoptée par Google, IBM, ou encore HSBC, notamment via des implémentations hybrides combinant PQC et algorithmes classiques.

La transition vers une cryptographie agile est désormais une priorité. Elle implique la capacité à changer dynamiquement d'algorithmes de chiffrement selon le contexte, renforçant la résilience face aux nouvelles menaces. Cette flexibilité, combinée à des politiques de rotation des clés et à une cartographie des actifs sensibles, permet aux grandes organisations d'anticiper les ruptures tout en pilotant les compromis entre performance, sécurité et coût énergétique.

Enfin, en juin 2024, le NIST a standardisé quatre premiers algorithmes de cryptographie post-quantique – CRYSTALS-Kyber, CRYSTALS-Dilithium, SPHINCS+, et FALCON – marquant un tournant décisif dans la préparation d'une cybersécurité adaptée à l'ère quantique[154].

Cybermesh (NEXT)

La Cybersecurity Mesh Architecture (CSMA) s'impose comme une approche structurante pour renforcer la sécurité dans des environnements informatiques distribués, hybrides et de plus en plus complexes. **Elle repose sur quatre piliers fondamentaux :** l'analytique et l'intelligence de sécurité, l'identité distribuée, la gestion consolidée des politiques et postures, ainsi que des tableaux de bord unifiés pour une supervision transverse. Ce cadre permet une **sécurité plus granulaire, adaptable aux réalités mouvantes des infrastructures modernes.**

En 2024, les facteurs d'adoption de la CSMA se sont nettement renforcés. L'augmentation des

151 - https://www.linkedin.com/pulse/quand-lia-red%C3%A9finit-les-r%C3%A8gles-du-jeu-olivier-denti-9hzre
152 - Quantinuum Reports 99.9% 2-Qubit Gate Fidelity, Caps Eventful 2 Months
153 - https://csrc.nist.gov/Projects/post-quantum-cryptography
154 - https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/selection-rounds

menaces cyber sophistiquées, la généralisation des architectures hybrides et multi-cloud, la montée en puissance de l'IoT et de l'edge computing, ainsi que les exigences réglementaires accrues ont rendu nécessaires des modèles de sécurité plus agiles et interopérables. Dans ce contexte, les principes de la CSMA sont progressivement intégrés aux produits de cybersécurité, portés par les grands éditeurs. Le rapport Zero Trust: From Aspiration to Rapid Implementation publié par Capgemini souligne ce glissement, en expliquant comment la CSMA, couplée à une architecture Zero Trust, s'impose comme un standard de résilience dans des contextes de plus en plus fragmentés[155].

En 2025, la dynamique devrait s'intensifier. L'exigence d'interopérabilité poussera les fournisseurs à proposer des solutions capables de s'intégrer de manière fluide dans des écosystèmes hétérogènes. La CSMA permettra également de renforcer les stratégies Zero Trust en apportant un niveau de sécurité plus contextuel, basé sur une compréhension fine des interactions, des identités et des comportements. Elle offrira ainsi un cadre plus adapté à la réalité des infrastructures mouvantes, en facilitant une gestion unifiée des politiques de sécurité sur l'ensemble du système d'information.

Des défis subsistent toutefois. Les coûts d'implémentation, la difficulté d'intégrer des briques CSMA avec des systèmes hérités, et le besoin d'un haut niveau d'expertise pour piloter ces environnements complexes freinent encore une adoption généralisée. Malgré cela, la CSMA **apparaît de plus en plus comme un levier stratégique** pour combler les lacunes de sécurité des environnements distribués et préparer les organisations à faire face à des menaces toujours plus évolutives.

Privacy enhancing computation & homorphic encryption (NEXT)

Les technologies de calcul améliorant la confidentialité (Privacy-Enhancing Computation, PEC) s'imposent comme un **levier stratégique pour sécuriser les traitements de données dans des environnements distribués, multipartites ou peu fiables**. Elles permettent d'exploiter des données sensibles tout en garantissant leur confidentialité, en s'appuyant sur des approches innovantes telles que le chiffrement entièrement homomorphe (FHE), les preuves à divulgation nulle de connaissance (ZKP), ou encore les environnements d'exécution de confiance (TEE).

Le chiffrement homomorphe, par exemple, permet de réaliser des calculs directement sur des données chiffrées sans jamais les déchiffrer, garantissant ainsi une protection de bout en bout. Un cas d'usage concret consiste à exécuter des requêtes dans un moteur de recherche confidentiel, sans jamais exposer ni les données personnelles de l'utilisateur, ni les résultats du traitement.

En 2024, ces technologies ont franchi de nouvelles étapes. Le NIST a organisé un atelier dédié aux solutions de cryptographie préservant la confidentialité, soulignant les avancées du FHE et des ZKP dans des contextes de traitement décentralisé et de partage inter-organisationnel[156]. Côté industrie, des entreprises comme Mastercard ont démontré l'applicabilité du FHE pour sécuriser les échanges d'informations financières entre institutions, tout en maintenant la confidentialité des données sous-jacentes[157].

En 2025, ces approches devraient connaître une accélération de leur adoption. Selon Gartner, 60 % des grandes entreprises auront intégré au moins un mécanisme de Privacy-Enhancing Computation dans leurs processus pour protéger les flux de données dans des environnements à risque[158]. **L'évolution des TEE et du FHE contribuera à atténuer les risques cyber**, tout en apportant des garanties renforcées en matière de conformité réglementaire, notamment dans des secteurs sensibles comme la finance, la santé ou l'administration publique.

Ces technologies joueront un rôle clé dans la **réconciliation entre performance, souveraineté et protection des données personnelles**, dans un monde où la collaboration entre acteurs ne peut plus se faire au détriment de la confidentialité.

155 - https://www.capgemini.com/insights/research-library/zero-trust-from-aspiration-to-rapid-implementation/
156 - NIST Workshop on Privacy-Enhancing Cryptography 2024 | CSRC
157 - privacy-enhancing-technologies-white-paper-final.pdf
158 - Gartner Identifies Top Five Trends in Privacy Through 2024

10

Engineering Biology

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

L'engineering biology s'impose comme un domaine stratégique à l'intersection de la biologie, de l'IA, des matériaux avancés et des systèmes informatiques. En programmant le vivant comme une plateforme technologique, cette discipline transforme les capacités de production, de traitement médical et d'innovation environnementale.

Trois grands axes de convergence structurent son développement. Les Precision Bio Systems combinent IA, bio-informatique et chimie pour concevoir des biomolécules, enzymes ou traitements sur mesure. Cette convergence alimente la médecine de précision et la biofabrication avancée, avec l'essor de l'édition du génome, de la synthèse protéique guidée par l'IA ou de l'ingénierie métabolique. Les Bio Computation Systems explorent le traitement de l'information via le vivant – ADN, tissus neuronaux ou circuits biologiques – ouvrant la voie à de nouvelles formes de calcul à haute densité, à très faible consommation énergétique. Enfin, les Cell Cultivation Systems exploitent les cellules vivantes comme plateformes de production pour matériaux, tissus ou nutriments, en lien étroit avec la bio-impression 3D, la robotique et les microfluides.

Ces innovations, encore émergentes il y a quelques années, entrent désormais dans des phases d'industrialisation, avec des cas d'usage concrets dans la santé, l'agriculture, l'énergie ou la chimie. Elles soulèvent cependant de nouveaux enjeux : gouvernance des données biologiques, éthique de la modification du vivant, souveraineté des chaînes de valeur biotechnologique.

Gene editing (NOW)

L'édition génétique, portée notamment par la technologie CRISPR-Cas9, transforme en profondeur les secteurs de la santé et de l'agriculture. En permettant des **modifications précises de l'ADN**, elle ouvre la voie à des traitements ciblés pour des **pathologies jusqu'ici incurables**, tout en optimisant les caractéristiques des cultures agricoles.

Fin 2023, le Royaume-Uni est devenu le premier pays à autoriser Casgevy[159] (exagamglogene autotemcel), une thérapie génique développée par Vertex Pharmaceuticals et CRISPR Therapeutics, pour le traitement de la drépanocytose et de la bêta-thalassémie transfusion-dépendante chez les patients de 12 ans et plus. La FDA américaine a validé cette thérapie en décembre 2023 pour la drépanocytose[160].

En parallèle, des avancées en édition de base et édition principale renforcent la précision des modifications génétiques. En mars 2025, Beam Therapeutics a publié des résultats prometteurs pour BEAM-302, une thérapie expérimentale visant à traiter le déficit en alpha-1 antitrypsine[161] à l'aide de technologies d'édition de base.

159 - MHRA Approves First CRISPR-Based Therapy Exa-cel for Sickle Cell and Transfusion-Dependent β-Thalassemia
160 - CASGEVY | FDA
161 - investors.beamtx.com+4investors.beamtx.com+4CRISPR Medicine+4

L'intégration de l'IA dans la recherche génomique constitue un accélérateur clé. **Des modèles prédictifs sont aujourd'hui utilisés pour identifier de nouvelles enzymes d'édition[162] plus performantes** que celles naturellement observées, optimisant ainsi la puissance et la spécificité des outils d'édition.

Les thérapies in vivo, réalisées directement dans l'organisme, gagnent également en maturité. CRISPR Therapeutics développe actuellement plusieurs programmes dans ce domaine, notamment pour des traitements de longue durée contre les maladies cardiovasculaires[163].

Ces avancées positionnent l'édition génétique comme une technologie stratégique dans la médecine de précision et la biotechnologie agricole. Toutefois, **son déploiement à large échelle soulève des questions éthiques et réglementaires majeures**, en particulier sur l'édition de l'ADN in vivo chez l'humain et les modifications potentiellement transmissibles aux générations futures.

Ai-enabled protein synthesis (NEW)

L'IA bouleverse la conception des protéines, **accélérant la recherche biomédicale, environnementale et alimentaire**. En 2024, les modèles de langage pour protéines (Protein Language Models – pLLM), à l'image de ProGen2 ou ESM-2, permettent de prédire la structure et la fonction des protéines à partir de leur séquence, réduisant jusqu'à 99 % les besoins en données pour la conception de nouvelles protéines[164].

Des plateformes comme AlphaFold de DeepMind ou RoseTTAFold de l'Université de Washington ont atteint une précision quasi expérimentale dans la prédiction des structures protéiques. AlphaFold 3, lancé en mai 2024, permet désormais la modélisation de complexes protéine-ADN, ARN ou ligand, élargissant considérablement le champ des applications possibles, de la biologie structurale à la découverte de médicaments[165].

Dans l'agroalimentaire, l'IA permet la conception de protéines végétales innovantes. L'entreprise Shiru, par exemple, a développé OleoPro™, une protéine végétale qui imite les graisses animales tout en réduisant jusqu'à 90 % les graisses saturées dans les produits transformés[166].

Capgemini a également intégré l'IA dans le design enzymatique : dans le cadre du projet européen Horizon 2020 DEMETO, les équipes ont réussi à améliorer de 60 % l'efficacité de la cutinase, enzyme clé dans le recyclage du plastique PET[167].

Pour 2025, les perspectives incluent l'édition de protéines directement dans les cellules, la production programmable de protéines thérapeutiques, et la bioremédiation par des enzymes optimisées par l'IA. Ces innovations **redéfinissent la synthèse de protéines comme un pilier stratégique pour la bioéconomie, tout en soulevant des enjeux réglementaires** liés à l'utilisation de protéines artificielles.

Metabolic engineering (NEW)

L'ingénierie métabolique consiste **à modifier les voies biochimiques des micro-organismes** afin de produire, de manière durable, des carburants, médicaments, matériaux ou composés chimiques d'intérêt industriel. Combinant biologie synthétique, modélisation assistée par l'IA et automatisation des processus, elle devient un levier technologique essentiel pour une bioéconomie circulaire.

En 2024, plusieurs projets ont démontré la maturité croissante de cette discipline. Genomatica a poursuivi le développement de procédés basés sur la fermentation microbienne pour produire des bioplastiques à partir de CO_2[168], limitant ainsi la dépendance aux dérivés pétrochimiques.

L'édition de voies métaboliques complexes est aujourd'hui optimisée par l'intégration de jumeaux numériques et de biocapteurs intelligents, permettant un contrôle en temps réel des rendements et de la qualité de production. Ces technologies sont de plus en plus présentes dans les installations industrielles, notamment dans la pharmacie verte ou les procédés de fermentation avancés.

La dynamique est aussi scientifique : des conférences majeures comme MaPEB 2024 (organisée par DECHEMA[169]) et Metabolic Engineering 16 (AIChE) ont mis en lumière des travaux sur la biosynthèse d'antibiotiques ou la production d'agents anticancéreux via des enzymes telles que les polykétide synthases.

Pour 2025, on attend une montée en puissance des collaborations entre industrie et recherche académique pour faire évoluer les procédés du laboratoire à l'échelle industrielle. L'IA jouera un rôle croissant dans la modélisation des réseaux métaboliques et l'identification

162 - https://www.nature.com/articles/d41586-024-01243-w
163 - https://crisprtx.com/focus-areas/in-vivo
164 - https://www.nature.com/articles/s41587-023-01938-4
165 - https://www.deepmind.com/blog/alphafold3
166 - https://www.shiru.com/products/oleopro
167 - https://www.capgemini.com/news/news/project-demeto-turns-pet-waste-into-valuable-raw-materials
168 - https://www.genomatica.com/solutions/bioplastics/
169 - https://dechema.de/

d'optimisations potentielles. **Les défis à relever restent l'industrialisation à grande échelle, la compétitivité économique et l'encadrement réglementaire des organismes modifiés**. Toutefois, l'ingénierie métabolique s'impose déjà comme un pilier stratégique pour décarboner les chaînes de valeur et produire des molécules biosourcées à haute valeur ajoutée.

Organ engineering (NEXT)

L'ingénierie d'organes représente une nouvelle génération de systèmes de culture cellulaire à l'intersection de la biologie, de la bio-impression 3D et de l'IA. Cette convergence permet de **concevoir des tissus et organes fonctionnels à des fins médicales**, en offrant des alternatives personnalisées aux greffes, des modèles pour l'étude de pathologies complexes, ou encore des plateformes avancées de test de traitements.

En 2024, la bio-impression 3D a franchi un cap technologique. L'entreprise Vital3D a mis au point une technologie laser capable d'imprimer, avec une résolution microscopique, des structures organiques complexes telles que des reins artificiels[170]. Parallèlement, les organoïdes – mini-organes dérivés de cellules souches – sont devenus des outils de référence en recherche biomédicale. En France, le GDR Organoïdes fédère la communauté scientifique pour accélérer l'industrialisation de ces modèles.

En 2025, l'IA et la robotique s'imposent comme des catalyseurs de la biofabrication. Des chercheurs de l'Université d'Urbana-Champaign développent des matériaux bio-inspirés capables d'optimiser la régénération osseuse à l'aide de modèles d'IA[171]. En Suède, Akira Science conçoit des implants mammaires biodégradables imprimés en 3D, destinés à la reconstruction post-cancer[172], illustrant la montée en puissance des applications concrètes.

L'industrialisation progressive de l'organe engineering en fait un levier stratégique pour **renforcer la résilience des systèmes de santé et répondre à la pénurie de greffons**. Toutefois, des défis majeurs subsistent : coûts de production élevés, encadrement éthique, normalisation des processus de biofabrication. Sa démocratisation dépendra de l'émergence de matériaux biocompatibles innovants, d'un cadre réglementaire adapté, et de partenariats étroits entre recherche publique et acteurs industriels.

Personalised medicine (NEXT)

La médecine personnalisée transforme profondément les soins de santé, en s'appuyant sur les données génomiques, les biomarqueurs, l'IA et les dispositifs connectés pour **proposer des traitements adaptés aux spécificités biologiques, environnementales et contextuelles** de chaque patient.

En 2024, cette approche a connu une accélération notable. Le séquençage génomique est désormais largement intégré dans les parcours de soins, facilitant l'identification des traitements les plus efficaces tout en réduisant les effets secondaires. En France, le Plan Médecine Génomique 2025, piloté par l'Inserm et soutenu par l'État, vise à généraliser ces pratiques à l'échelle nationale. Par ailleurs, les jumeaux numériques de patients se déploient dans les hôpitaux : au CHU de Liège, un modèle numérique permet de simuler l'évolution de la glycémie afin d'ajuster les traitements en soins intensifs[173].

D'ici 2025, les thérapies cellulaires et géniques personnalisées devraient franchir un cap, soutenues par des technologies comme CRISPR et des plateformes avancées de traitement. L'IA joue un rôle central dans cette évolution, en facilitant l'analyse de données massives (cliniques, génétiques, environnementales), la modélisation de l'évolution des pathologies et la conception de traitements individualisés.

La convergence entre IA, dispositifs médicaux connectés, systèmes d'aide à la décision clinique et infrastructures cloud de santé **favorise une médecine plus préventive et proactive**. L'émergence de modèles spécialisés, notamment des small language models et des architectures multimodales intégrant texte et imagerie, renforce la capacité à produire des recommandations médicales contextualisées.

Ce nouveau paradigme ouvre la voie à une médecine plus ciblée, équitable et durable. Toutefois, **son déploiement à grande échelle nécessite un cadre rigoureux sur les plans éthique et réglementaire** : consentement éclairé, équité d'accès, protection des données et explicabilité des algorithmes seront des conditions clés pour instaurer la confiance et garantir l'adhésion des patients.

170 - https://www.vital3d.com/
171 - https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352940723002973
172 - https://akirascience.com/
173 - https://www.chuliege.be/jumeaux-numeriques

Au-delà de l'horizon : bâtir la convergence de demain

En l'espace d'une année, le paysage technologique s'est profondément transformé mais au-delà des évolutions individuelles, c'est bien la convergence de ces technologies qui marque un tournant décisif.

Désormais, les frontières entre domaines technologiques s'estompent pour laisser place à un écosystème intégré où l'IA rencontre le cloud, où les jumeaux numériques dialoguent avec les capteurs quantiques, où la biologie devient programmable comme un logiciel. Cette convergence, décrite et analysée tout au long de ce Tech Radar 2025, n'est pas une simple évolution incrémentale – elle représente une refonte fondamentale des règles qui régissent l'innovation et la création de valeur.

Pour les dirigeants, la technologie s'affirme plus que jamais comme la pierre angulaire de toute stratégie d'entreprise, un levier essentiel de résilience et de différenciation. Dans cette nouvelle ère de la convergence, les entreprises les plus performantes seront celles capables d'orchestrer ces technologies, de créer des synergies inédites, et d'identifier les points de jonction où l'innovation peut surgir. Ce n'est plus la maîtrise isolée d'une technologie qui fera la différence, mais la capacité à composer une symphonie technologique cohérente, où chaque innovation renforce les autres.

Ce Tech Radar 2025 se veut bien plus qu'un simple panorama technologique – il est conçu comme une véritable boussole pour naviguer dans cet écosystème complexe. Mais cette boussole ne prend tout son sens que si elle devient le point de départ d'une réflexion stratégique au sein de votre organisation. Nous vous invitons à vous approprier cette méthodologie, à l'adapter à votre contexte, à la personnaliser pour qu'elle devienne un outil vivant de pilotage et d'anticipation. Car c'est bien dans l'intelligence collective, dans le croisement des expertises et des perspectives, que réside la clé pour transformer ces convergences technologiques en avantages compétitifs durables.

En 2025, alors que s'intensifie la compétition mondiale autour des technologies stratégiques, la capacité à anticiper et à tirer parti de ces convergences sera déterminante. Les décideurs qui sauront articuler leur vision business avec une compréhension fine de ces dynamiques technologiques ne se contenteront pas de suivre le changement – ils l'orchestreront, le dirigeront, et en feront un moteur de transformation positive pour leur entreprise et la société.

La technologie n'est plus un simple outil – elle est le langage dans lequel s'écrit l'avenir. À travers ce Tech Radar, nous espérons vous donner les clés pour maîtriser cette grammaire de l'innovation et composer, avec nous, les prochains chapitres de cette fascinante histoire de la convergence technologique.

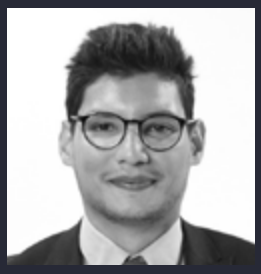
Continuons ensemble cette exploration…

Auteurs

Nicolas GAUDILLIÈRE
Chief Technology Officer
Capgemini Invent France
nicolas.gaudilliere@capgemini.com

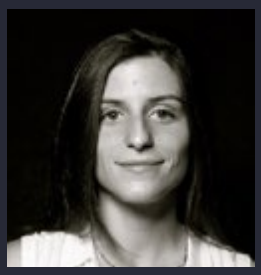
Philippe CORDIER
(Gen)AI
philippe.a.cordier@capgemini.com

Pierre FORTIER
Advanced Connectivity
pierre.fortier@capgemini.com



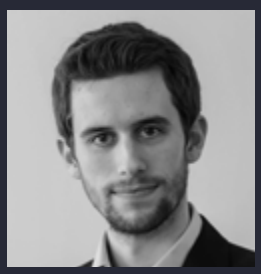
Adil HIHI
Decentralized Tech
adil.hihi@capgemini.com

Mario FERNANDES
Engineering Tech
mario.fernandes@capgemini.com



Gabrielle DESARNAUD
Climate Tech
gabrielle.desarnaud@capgemini.com

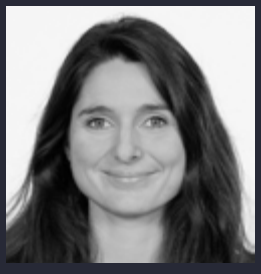
Guillaume RENAUD
Cloud & Edge
guillaume.renaud@capgemini.com



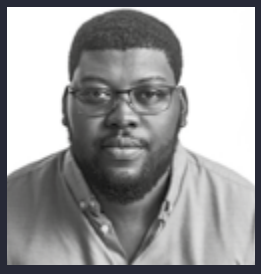
Clément BRAUNER
Next-Gen Computing
clement.brauner@capgemini.com

Richard TRAHERNE
Engineering Biology
richard.traherne@capgemini.com

Manon BRIOLE
Immersive Tech
manon.briole@capgemini.com



Jeanne HEURÉ
Tech 4 Digital Trust
jeanne.heure@capgemini.com



Mouhamed SECK
CTO Office Coordinator
mouhamed.seck@capgemini.com

Contributeurs

Le CTO Office souhaite remercier les personnes suivantes pour leurs contributions et leurs commentaires d'experts inclus dans le Tech Radar 2025 :

Convergence Technologique

Kary BHEEMAIAH

(Gen)AI

Maud PICQ,
Alex MARADON,
Olivier DENTI,
Mathieu FRONTON,
Florian ARTHUR,
Alexandre HENRY,
Sébastien TOURLET,
Benjamin FARCY

Advanced Connectivity

Cédric BOURRELY,
Jean-François GALEAZZI,
Steve BARADEL,
Antoine MERCIER

Sustainable Tech

Florent ANDRILLON,
Kerry-Ann ADAMSON,
Paul SHOEMAKER,
Gabrielle DESARNAUD,
Adèle BALOG

Cloud & Edge

Jean-Georges SAURY,
Lucas LAURET,
Ambroise LELIEVRE,
Nicolas PEYNET,
Badr SEFRIOUI,
Bérengère NAGY

Engineering Biology

Antoine TILLETTE DE MAUTORT

Engineering Tech

Vivien LEGER,
Pierre-Alexandre FORGET,
Brauner CLEMENT,
Olivier DINH,
Grégoire GENTILLE,
Laura CESBRON

Decentralized Tech

Patrick BUCQUET,
Christophe VERGNE,
Duncan CAMERON,
Mathias ROS

Immersive Tech

Alexandre EMBRY,
Solène LE BARS,
Antonio JARAMILLO,
Sudarshan SAHU,
Nitin DHEMRE,
Mouhamed SECK

Next-Gen Computing

Julian VAN VELZEN

Tech for Digital Trust

Olivier DENTI,
Chloe MONARI,
Lee NEWCOMB,
Hichem KHATTECH,
Camille MAINDON,
Samuel ZANIN,
Isabelle BUDOR,
Clément BRAUNER

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 et IA générative, 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 22,1 milliards d'euros en 2024.

Get the future you want*

Plus d'informations sur www.capgemini.com/invent

**Réalisez le futur que vous voulez*

Capgemini invent

Copyright © 2025 Capgemini. Tous droits réservés.