Cigref
RÉUSSIR
LE NUMÉRIQUE

Innovations technologiques

Enjeux et opportunités pour les systèmes d'information

Janvier 2025

Cigref

Innovations technologiques

Enjeux et opportunités pour les systèmes d'information

Janvier 2025

Droit de propriété intellectuelle
Toutes les publications du Cigref sont mises gratuitement à la disposition du plus grand nombre mais restent protégées par les lois en vigueur sur la propriété intellectuelle.

ÉDITO

IA, IA générative, Informatique quantique ou moléculaire, 6G ou constellations basse altitude et bien d'autres technologies numériques sont des marqueurs de la richesse de l'offre technologique actuelle et future, ainsi que de l'accélération de ces évolutions et du délai de transformation.

Ces mutations technologiques appellent à une vigilance accrue quant à l'indépendance numérique stratégique de nos organisations. Dans une situation géopolitique tendue, marquée par le phénomène de « splinternet », et par les enjeux de souveraineté européenne face aux géants américains et chinois, il devient important de poursuivre la recherche d'une résilience numérique et d'un numérique éthique et responsable.

Dans ce contexte, les directions du numérique se doivent de renforcer leur rôle en matière d'exploration numérique pour anticiper les nouveaux usages, les disruptions possibles, la valeur à en tirer et les vulnérabilités et risques associés à ces nouvelles technologies

Pour contribuer au renforcement du rôle de *Tech Leader* que doivent assurer les directions du numérique, le Cigref a lancé ce groupe de travail en vue de constituer un « radar » des technologies numériques émergentes. Il a ainsi réuni 40 participants de 29 organisations pour explorer ces technologies selon trois horizons : le présent de l'état de l'art, les éléments à prendre en compte pour construire une feuille de route à trois ans et un éclairage prospectif à l'horizon d'une dizaine d'années.

Nous avons choisi de retenir quelques familles de technologies présentant des cas d'usage intéressants pour les membres du Cigref. Ce rapport n'a donc pas vocation à offrir une vision exhaustive, mais plutôt pragmatique du potentiel des technologies retenues. Nous nous sommes délibérément focalisés sur des technologies émergentes spécifiques, en excluant l'IA et le quantique, traités par d'autres groupes de travail.

Le résultat des travaux du groupe est présenté dans ce rapport sous forme de fiches de synthèse, élaborées pour chaque famille de technologie retenue et analysée par les membres du groupe de travail.

Djilali KIES, *Chief Information Officer* chez TDF, et **Yann DAUDIN,** Responsable Innovation, chez FRANCE TRAVAIL

SYNTHÈSE

Ce rapport propose un « radar » des technologies émergentes, adapté aux besoins des membres du Cigref, en mettant en lumière les défis spécifiques associés à chaque domaine avec pour objectifs d'identifier les tendances majeures, de faciliter la prise de décision stratégique des directions du numérique et de suivre les avancées technologiques en vue de mises à jour régulières.

Technologies immersives : la réalité virtuelle, la réalité augmentée, et le jumeau numérique sont des technologies qui transforment la collaboration, la formation et l'optimisation des processus industriels. Elles permettent des expériences immersives et contribuent à l'efficacité des processus, notamment dans la formation interactive et la gestion d'infrastructures. Cependant, leur adoption est freinée par des coûts élevés, des risques de sécurité et un manque de compétences.

Réseaux de télécommunications : l'émergence de la 5G, de la 6G et des satellites en orbite basse modifie la connectivité. Ces réseaux permettent une connectivité fiable et rapide, bénéfique pour des secteurs comme la santé, la défense, et l'industrie 4.0. La virtualisation des réseaux, associée à l'OpenRAN et aux réseaux privés, renforce également l'agilité et la résilience des systèmes d'information. Cependant, des défis demeurent, notamment en matière de souveraineté et de gestion de la dépendance technologique.

Technologies de partage des données : ces technologies, incluant les *Privacy-Enhancing Technologies* (PET) et les solutions d'identité numérique, permettent un partage sécurisé des données tout en respectant la confidentialité. Le chiffrement homomorphique, les données synthétiques et les preuves à divulgation nulle garantissent la confidentialité, facilitant ainsi la collaboration inter-entreprises. Cependant, l'implémentation de ces technologies exige une gestion rigoureuse des normes de sécurité et des compétences techniques accrues.

Futur du stockage de données : le stockage de données évolue vers des solutions plus efficaces et durables, incluant des technologies de stockage moléculaire. Ces innovations visent à répondre à la demande croissante de stockage de données, tout en en réduisant l'empreinte écologique. Des défis de confidentialité et de maintenance de la souveraineté des données subsistent.

Intelligences artificielles (IA) : l'IA continue d'influencer les processus de décision, et d'automatisation. Son intégration dans des secteurs comme la finance et la santé améliore la performance et la résilience, mais comporte des questions éthiques et des biais de toute nature.

Informatique quantique : l'informatique quantique promet une puissance de calcul inégalée, susceptible de transformer des secteurs comme la cybersécurité et la gestion des risques. Elle reste toutefois expérimentale, et son adoption à grande échelle dépendra de l'avancée des technologies et des applications pratiques.

Ce rapport stratégique propose ainsi une analyse non exhaustive des enjeux et perspectives technologiques pour les DSI, et offre une première base de réflexions pour anticiper les percées technologiques et leurs impacts sur l'architecture des systèmes d'information à moyen-long terme.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à **Djilali KIES,** *Chief Information Officer*, chez **TDF**, et **Yann DAUDIN,** Responsable Innovation, chez **France Travail**, qui ont piloté ces travaux, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont participé et contribué à ce groupe de travail Cigref (ordre alphabétique) :

Éric AUDY - ENEDIS

Frédéric BATTESTI - GROUPEMENT DES MOUSQUETAIRES

Christophe BAZIN - BPI FRANCE

Fahem BEN MESSAOUD - ESSILORLUXOTTICA

Xavier BENMOUSSA - GROUPE SAVENCIA

Gautier BOURGEOIS - ACCOR

Guillaume BRETEAU - COVÉA

Michel CAPEL - FAYAT

Mathieu CHERRIÈRE - MINISTÈRE DES ARMÉES

Sylvain CIONNEAU - GROUPE SAVENCIA

Marine DE SURY - CIGREF

Caroline DEVINAT - COVÉA

Éric DRUESNES - CNAF

Sylvain GERON - CARREFOUR

Sylvain GOSSET - MSA

Michael HIERY - HAGER GROUP

Elisabeth HUMBERT-BOTTIN - GIP MDS

Youssef KILANY - GIP MDS

Muriel KONATE - BPI FRANCE

Cédric LE LIBOUX - HAGER GROUP

Christel LEBLANC - BRED

Ambre LUONG - SERVIER

Philippe MARTIN - BPI FRANCE

Isabel MENDEZ - GROUPE EGIS

Alexandre MERCIER - MSA

Emmanuel MONZIES - STELLANTIS

Cyril NAUD - FAYAT

Tristan NEDELLEC - MATMUT

Vi OLIVET - TDF

Pierre-Yves PARMENTIER - ORANGE

Emmanuel POISSONNIER - AMADEUS

Laurent POUPON - BNP PARIBAS

Sébastien SCHNEIDER - BPI FRANCE

Frédéric SERET - SFR

Marc-Michel STACK - BNP PARIBAS

Julien TOURNADRE - SERVIER

Yannick TREMBLAIS - GROUPE ROCHER

Fabrice TROUVÉ - CNAF

Claude VARY - GROUPE ADP

Nous remercions également vivement tous les intervenants qui ont nourri la réflexion de notre groupe de travail :

- Erfane ARWANI, Président-Directeur général et Cofondateur, chez Biomemory.
- David ATLANI, *Partner et Emerging Technologies Leader*, chez EY.
- Laurent AVET, Analyste Stratégique et Architecte d'Entreprise, chez BNP Paribas.
- Jean-Pierre DIRIS, Coordinateur interministériel, chez IRIS^2 et GOVSATCOM.
- Steve PEGUET, Directeur Scientifique, chez Alten.
- Florent TOURNOIS, Directeur de projet « France Identité », à l'Agence Nationale des Titres.
- Anthony HYVERT, *Chief Technical Officer*, chez PMU®

Ce document a été construit et rédigé par Aurélie CHOTARD, Directrice de mission au Cigref.

TABLE DES MATIÈRES

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE 8

INTRODUCTION : METTRE EN PLACE UNE DÉMARCHE D'EXPLORATION 10

Pourquoi la veille et l'innovation sont-elles essentielles à la DSI ? 10

Comment mettre en place une démarche de veille et d'innovation ? 10

1 LES TECHNOLOGIES IMMERSIVES 12

1.1 Définition et état de l'art 13

1.2 Cas d'usages et exemples 15

1.3 Impacts sur l'architecture des entreprises 17

1.3.1 Infrastructure et technologie 17

1.3.2 Organisation et processus 17

1.3.3 Culture et adoption 18

1.4 Impacts en matière de résilience 18

1.4.1 Impacts positifs 18

1.4.2 Impacts négatifs 18

1.5 Principaux risques liés à l'adoption de ces technologies 19

1.6 Disruption possible sur la chaîne de valeurs 20

1.7 Et demain ? Quel potentiel de croissance à horizon 10 ans ? 21

2 LES RÉSEAUX DE TÉLÉCOMMUNICATIONS 23

2.1 Définition et état de l'art 23

2.1.1 Scénarios d'évolution de la 5G et de la 6G 24

2.1.2 Les réseaux satellitaires 26

2.2 Cas d'usages et exemples 28

2.3 Impacts sur l'architecture des entreprises 30

2.4 Impacts en matière de résilience 31

2.4.1 Impacts positifs 31

2.4.2 Impacts négatifs 32

2.5 Risques liés à l'adoption de ces technologies 32

2.6 Disruption possible sur la chaîne de valeurs 33

2.7 Et demain ? Quel potentiel de croissance à horizon 10 ans ? 33

3 LES TECHNOLOGIES DE PARTAGE DES DONNÉES 34

3.1 Définition et état de l'art 34

3.2 Cas d'usages et exemples 37

3.3 Impacts sur l'architecture des entreprises 41

3.4 Impacts en matière de résilience 42
3.4.1 Impacts positifs 42
3.4.2 Impacts négatifs 42
3.5 Risques liés à l'adoption de ces technologies 42
3.6 Disruption possible sur la chaîne de valeurs 43
3.7 Et demain ? Quel potentiel de croissance à horizon 10 ans ? 43

4 LE FUTUR DU STOCKAGE DE DONNÉES 44

4.1 Définition et état de l'art 44
4.2 Cas d'usages et exemples 49
4.3 Impacts sur l'architecture des entreprises 49
4.4 Impacts en matière de résilience 50
4.5 Risques liés à l'adoption de ces technologies 50
4.6 Disruption possible sur la chaîne de valeurs 51
4.7 Et demain ? Quel potentiel de croissance à horizon 10 ans ? 51

5 LES INTELLIGENCES ARTIFICIELLES 52

5.1 Définition et état de l'art 52
5.2 Cas d'usages et exemples 52
5.3 Impacts sur l'architecture des entreprises 53
5.4 Impacts en matière de résilience 53
5.4.1 Impacts positifs 53
5.4.2 Impacts négatifs 54
5.5 Risques liés à l'adoption de ces technologies 54
5.6 Disruption possible sur la chaîne de valeurs 55
5.7 Et demain ? Quel potentiel de croissance à horizon 10 ans ? 55

6 L'INFORMATIQUE QUANTIQUE 58

6.1 Définition et état de l'art 58
6.2 Cas d'usages et exemples 58
6.3 Impacts sur l'architecture des entreprises 58
6.4 Impacts en matière de résilience 59
6.5 Risques liés à l'adoption de ces technologies 59
6.6 Disruption possible sur la chaîne de valeurs 59
6.7 Et demain ? Quel potentiel de croissance à horizon 10 ans ? 60

CONCLUSION 61

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Extrait du Guide d'audit de la gouvernance du système d'information de l'entreprise numérique, vecteur 2 Innovation, version 2019, p.22.....11

Chronologie des technologies immersives, par EY 12

Classement des différentes technologies de partage de la donnée.....36

Classement des technologies de stockage de données.....45

TABLE DES [ENCARTS]

L'histoire des technologies immersives avec EY 12

Zoom sur les cas d'usages du jumeau numérique avec Alten 17

Le maître mot est la convergence, par B<>com.....26

Le projet européen IRIS^2 27

L'analyse de BNP Paribas sur les *Privacy-Enhancing Technologies*.....36

L'initiative nationale « France identité » et l'initiative européenne de portefeuille numérique « *Potential* » 38

L'informatique moléculaire, par Biomemory 48

Le point de vue de PMU® sur les intelligences artificielles.....56

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Ce rapport vise à fournir une **première base pour l'élaboration d'un « radar » des technologies émergentes,** dédié aux membres du Cigref. Son objectif principal n'est pas de proposer une vue exhaustive de toutes les technologies émergentes, mais plutôt de refléter les principaux enjeux des groupements technologiques qui ont été discutés au sein du groupe de travail à l'origine de ce rapport.

Ce « radar » des technologies émergentes poursuit plusieurs ambitions :

- Offrir une vision synthétique des tendances technologiques actuelles et à venir ;
- Identifier les enjeux spécifiques propres à chaque domaine technologique ;
- Faciliter la prise de décision stratégique pour les systèmes d'information des entreprises membres du Cigref.

L'approche adoptée sera progressive, permettant une mise à jour régulière du « radar » avec l'ajout éventuel de nouvelles fiches. Chaque fiche sera conçue selon une structure définie afin d'assurer une cohérence et une comparabilité entre les différents domaines technologiques étudiés.

Ainsi, la méthodologie retenue pour la réalisation de ce rapport s'appuie sur un cadre structuré et répétable. Chaque technologie étudiée sera analysée selon une **trame commune**, favorisant une évaluation rigoureuse et complète des opportunités et risques associés :

1 - Définition et état de l'art

Chaque technologie sera d'abord définie avec précision. L'état de l'art sera ensuite dressé, incluant les avancées récentes et les tendances dominantes. Cette section permettra de situer la technologie dans son contexte actuel et d'en mesurer la maturité.

2 - Cas d'usages et exemples

La seconde étape de l'analyse consiste à identifier des cas concrets d'utilisation de la technologie dans divers secteurs d'activité. Ces exemples permettront d'illustrer la manière dont elle peut être appliquée pour résoudre des problématiques spécifiques, en apportant des bénéfices mesurables.

3 - Impacts sur l'architecture des entreprises

L'analyse portera ensuite sur les impacts potentiels de chaque technologie sur l'architecture des systèmes d'information des entreprises. Quels ajustements organisationnels ou techniques sont à prévoir pour intégrer la technologie ? Quels risques ou opportunités pour la scalabilité et la compatibilité avec les infrastructures existantes ?

4 - Impacts en matière de résilience

Une attention particulière sera portée aux impacts en matière de résilience. La technologie contribue-t-elle à renforcer la robustesse et la continuité des opérations, ou au contraire introduit-elle de nouvelles vulnérabilités ? Cette section permettra d'évaluer le rôle de la technologie dans la gestion des risques et la sécurité des systèmes d'information.

5 - Risques liés à l'adoption de ces technologies

Cette partie explorera les différents risques liés à l'intégration de ces technologies. Ces risques sont de nature réglementaire, environnementale, organisationnelle ou encore de cybersécurité.

6 - Disruption potentielle sur la chaîne de valeur

L'impact disruptif potentiel de chaque technologie sur la chaîne de valeur sera également étudié. Cette analyse visera à déterminer si la technologie peut changer la manière dont les entreprises créent, distribuent et captent de la valeur, en bouleversant des modèles économiques établis ou en en créant de nouveaux.

7 - Et demain ? Quel potentiel de croissance à horizon 10 ans ?

Enfin, chaque fiche se conclura par une projection des évolutions possibles de la technologie sur une période de dix ans. Cette section explorera les opportunités de croissance à long terme, en identifiant les domaines où la technologie pourrait avoir un impact significatif dans la transformation des entreprises et des industries.

Ainsi, la méthodologie adoptée garantit une approche rigoureuse et cohérente pour l'analyse des technologies émergentes, tout en permettant sa mise à jour régulière au bénéfice des membres du Cigref.

INTRODUCTION : METTRE EN PLACE UNE DÉMARCHE D'EXPLORATION

Dans un environnement technologique en constante évolution, la Direction des Systèmes d'Information (DSI) joue un rôle central dans la transformation numérique des organisations. Pour rester compétitive et répondre aux besoins croissants des métiers, la DSI doit s'engager dans une démarche de veille technologique et d'innovation continue.

POURQUOI LA VEILLE ET L'INNOVATION SONT-ELLES ESSENTIELLES À LA DSI ?

- La veille permet de suivre l'évolution des technologies émergentes, des nouvelles pratiques, et des tendances de marché et met la DSI en position d'anticiper les changements plutôt que de les subir.
- L'innovation technologique apporte des opportunités d'améliorer les systèmes existants, d'automatiser des processus, et de réduire les coûts opérationnels.
- Les initiatives d'innovation aident la DSI à mieux aligner ses solutions sur les objectifs stratégiques de l'entreprise et à proposer des réponses adaptées aux nouveaux défis *business*.
- Adopter une démarche proactive en matière de veille et d'innovation positionne l'entreprise comme un leader technologique dans son secteur, capable de se différencier de ses concurrents.
- La veille permet d'identifier et de diminuer les risques liés à la sécurité, à la conformité ou à l'obsolescence des systèmes.

COMMENT METTRE EN PLACE UNE DÉMARCHE DE VEILLE ET D'INNOVATION ?

- **Constitution d'une équipe dédiée à la veille** : il est essentiel de créer un groupe dédié, avec des profils variés (technologie, innovation, stratégie), transverse au sein de la DSI et en lien avec l'ensemble des directions métiers de l'entreprise, de façon à basculer d'une innovation « exploratoire » à une innovation « tirant parti des problématiques *business* ». Cette équipe chargée d'identifier et d'analyser les tendances technologiques, dans une approche transversale, ne doit pas les envisager seulement dans leur aspect technologique, mais aussi dans leurs aspects sociétal, géopolitique et réglementaire pour en saisir les principaux risques et opportunités.
- **Collaborations internes et externes** : il s'agit de mettre en place des collaborations avec d'autres départements (marketing, production) et partenaires externes (consultants, universités) pour enrichir la démarche de réflexion et d'innovation.
- **Culture de l'innovation** : le but est d'instaurer une culture d'entreprise qui valorise la créativité et l'expérimentation, notamment à travers des initiatives comme les hackathons, les laboratoires d'innovation, ou les incubateurs internes.
- **Communication** : l'innovation passe nécessairement par le partage d'information sur la veille réalisée. La DSI devient alors un « apporteur d'opportunité business » par la technologie. Ce dispositif de communication permet également d'effacer le silo créé par une structure dédiée.

VEILLE TECHNOLOGIQUE — Bonne pratique n°3

Organiser la veille (technologique, réglementaire, environnementale, écosystème, etc.) pour éclairer les efforts d'innovation et la stratégie de l'entreprise.

CRITÈRE 1

Les activités de veille et d'innovation sont organisées au niveau de l'entreprise. Elles sont coanimées par la DSI et les métiers en s'appuyant sur une feuille de route partagée, et disposent de ressources suffisantes.

- Cette organisation peut se décliner de différentes façons plus ou moins formelles (par ex. rapprochement DSI et Marketing stratégique pour détecter les innovations qui pourraient différencier l'entreprise par rapport à ses concurrents).
- Sans avoir besoin d'un formalisme lourd, les « règles du jeu » sont claires : objectifs et limites de la veille, positionnement par rapport aux PoCs et aux projets.
- La DSI identifie avec les métiers les risques et opportunités des principales évolutions technologiques.

CRITÈRE 2

La DSI fait partie d'un réseau de veille au niveau de l'entreprise qui inclut d'autres fonctions métiers.

- La DSI participe à la veille globale pour anticiper et intégrer les impacts SI.
- La DSI a sélectionné un certain nombre de technologies qu'elle juge stratégiques en accord avec les métiers et dans lesquelles elle décide d'exercer une activité de veille.

CRITÈRE 3

La DSI a élargi son périmètre de veille à son écosystème, *via* la participation à des réseaux externes à l'entreprise (clubs, organismes…).

- Des experts sont sollicités pour témoigner de leur expérience et partager leurs connaissances dans le cadre de manifestations organisées par des organismes reconnus en France et à l'étranger.
- L'entreprise participe à l'évolution des normes dans les secteurs techniques stratégiques.
- Les informations issues de ces participations sont mises à disposition des collaborateurs de la DSI ainsi que des interlocuteurs métiers identifiés.

CRITÈRE 4

Les activités de veille peuvent déboucher sur des *proof of concept* (PoC) et des démonstrateurs en vue de l'amélioration des processus.

- Des démonstrations technologiques et des actions de communication au sein de l'entreprise et à l'extérieur sont réalisées.
- Certaines entreprises mettent en place des « bacs à sable » pour favoriser l'innovation. Les démonstrateurs et les PoC sont la mise en pratique des travaux de veille et démontrent la faisabilité de l'idée pour améliorer les processus de l'entreprise.

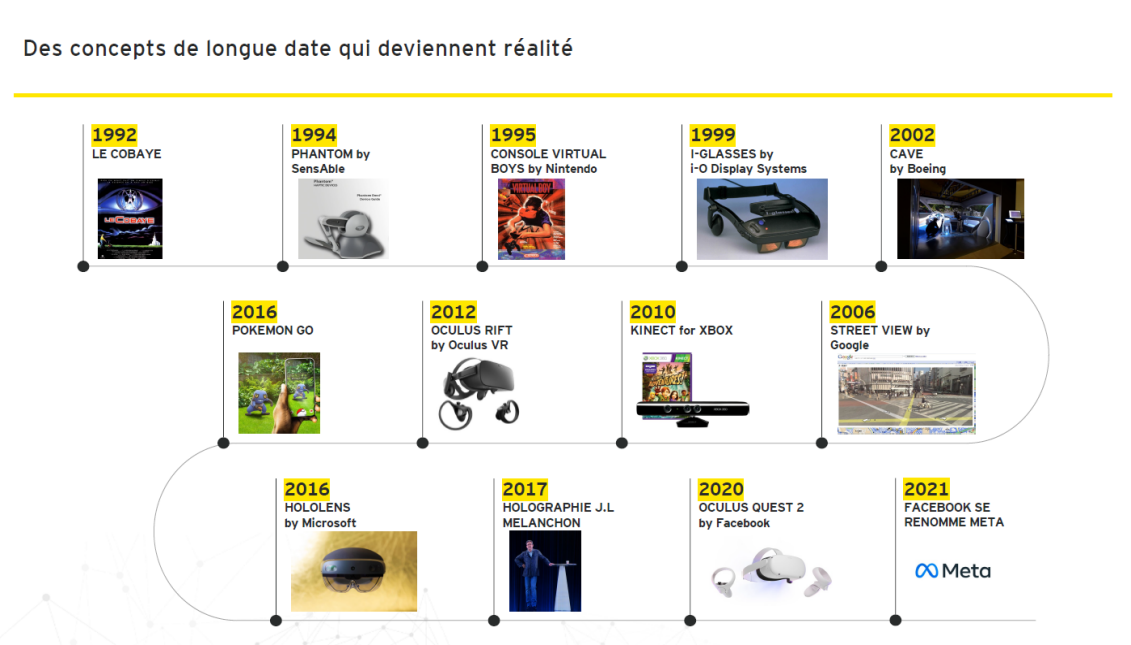
Extrait du Guide d'audit de la gouvernance du système d'information de l'entreprise numérique, vecteur 2 Innovation, version 2019, p.22.

1 LES TECHNOLOGIES IMMERSIVES

L'intégration des technologies immersives, telles que le jumeau numérique, la réalité virtuelle et les métavers, offre une valeur significative aux entreprises. Le jumeau numérique, en reproduisant de manière virtuelle le comportement des objets physiques ou des processus, permet une simulation réaliste, facilitant la conception, la planification et la gestion de projets complexes. La réalité virtuelle offre des expériences immersives qui transcendent les barrières physiques, favorisant la collaboration à distance, la formation interactive et la visualisation avancée de données. Les métavers, quant à eux, ouvrent la porte à des environnements virtuels partagés, propices à la collaboration en temps réel et à des interactions sociales numériques enrichies. Les travaux du groupe de travail sur ce sujet viennent compléter les réflexions de la *task force* organisée au Cigref sur les métavers, rassemblées dans le rapport « Les métavers : démystification et chemins à parcourir ».

L'histoire des technologies immersives avec EY

Chez EY, 1200 personnes travaillent en France, et constituent une équipe pluridisciplinaire, intégrant des spécialistes juristes, dont l'objectif est l'intégration des technologies dans les banques d'un point de vue règlementaire. Ainsi, EY accompagne ses clients dans l'intégration de différentes technologies, comme les technologies immersives, au même titre que l'intelligence artificielle ou l'informatique quantique, et mène une veille régulière sur ces sujets.



Chronologie des technologies immersives, par EY

L'histoire des technologies immersives débute dans les années 1990, lorsque l'innovation s'accélère autour de la réalité virtuelle. En 1992, le film **Le Cobaye** (*The Lawnmower Man*),

adaptation libre d'une nouvelle de Stephen King, introduit le grand public à l'idée de la réalité virtuelle et de ses possibilités, bien que de façon très fantasmée. À la même époque, les premières expériences concrètes dans ce domaine sont développées pour des usages industriels et militaires, avec des systèmes de casques et de simulateurs encore rudimentaires mais prometteurs. Les jeux vidéo et les simulations aéronautiques figurent parmi les premières applications grand public et professionnelles.

Au début des années 2010, un tournant décisif survient avec la création de l'Oculus Rift, un casque de réalité virtuelle développé grâce à une campagne de financement participatif en 2012. Son succès marque l'entrée des technologies immersives dans une nouvelle ère. Meta rachète Oculus en 2014, signalant l'importance croissante du secteur pour les géants de la technologie. Les années suivantes voient l'émergence d'une concurrence accrue, avec des produits comme le HTC Vive et le PlayStation VR, élargissant les usages dans les domaines du jeu vidéo, de l'éducation, du divertissement et même de la santé.

En 2020, Meta dévoile son **Meta Quest 2**, un casque sans fil autonome qui démocratise encore plus l'accès à la réalité virtuelle en supprimant la nécessité d'un ordinateur puissant. Cette évolution s'inscrit dans la stratégie de Meta visant à créer le « metaverse », un univers numérique immersif dans lequel les utilisateurs peuvent interagir dans un espace virtuel en trois dimensions. Ce développement marque un jalon significatif dans l'histoire des technologies immersives, consolidant leur rôle dans l'évolution future des interactions humaines.

David Atlani, *Partner et Emerging Technologies Leader*, chez EY

1.1 DÉFINITION ET ÉTAT DE L'ART

Les technologies immersives visent à plonger l'utilisateur dans un environnement numérique avec lequel il est capable d'interagir, en stimulant un ou plusieurs des cinq sens pour créer des sensations perceptuelles.

Six principales typologies de technologies permettent l'immersion visuelle :

- La **réalité augmentée** (AR) superpose des éléments virtuels à l'environnement réel à travers des écrans ou des lunettes intelligentes, offrant des applications variées comme l'affichage d'informations en temps réel ou l'amélioration d'interactions avec des objets physiques.
- La **réalité virtuelle** (VR) plonge quant à elle l'utilisateur dans un environnement entièrement simulé en 3D, souvent utilisé pour des cas d'usages liés à l'éducation, la simulation ou les loisirs, comme les jeux vidéo immersifs.
- La **réalité mixte** (MR) combine le monde physique et le virtuel, permettant de placer des objets numériques au sein de l'environnement réel et d'interagir avec eux, ce qui enrichit l'expérience utilisateur avec une fusion des deux mondes.

- **L'holographie** crée des représentations tridimensionnelles d'objets virtuels, visibles sans lunettes spéciales, offrant des perspectives intéressantes dans le domaine de la communication et de la visualisation.
- Le **jumeau numérique**, est une technique qui consiste à construire la copie virtuelle d'un objet ou d'un système physique, comme une machine, une ville ou une usine, pour en permettre la simulation, la gestion à distance et l'optimisation des performances.
- Enfin, **l'*ambient computing*** intègre des interfaces comme les assistants vocaux et les objets connectés dans l'environnement quotidien, créant un cadre d'interaction plus naturel et intuitif pour les utilisateurs.

De nombreux freins demeurent au sein des entreprises pour le déploiement des technologies immersives :

- Absence de cas d'usages apportant une réelle valeur ajoutée : les entreprises peinent à identifier des applications concrètes qui justifient l'investissement dans ces technologies.
- Coût et robustesse des appareils : les dispositifs nécessaires pour accéder aux mondes virtuels sont coûteux et souvent trop fragiles pour être utilisés dans des environnements industriels comme les usines. Le coût n'est d'ailleurs pas toujours justifié par les cas d'usages tels que la formation, le recrutement ou l'aide à la maintenance.
- Problèmes de sécurité : comme sur internet, les mondes virtuels sont exposés à des risques tels que l'usurpation d'identité et l'envahissement par des *deepfakes*.
- Confidentialité des données : les technologies immersives collectent et traitent de grandes quantités de données, souvent sensibles, posant des enjeux majeurs en matière de protection des informations.
- Manque de contenu de qualité : il existe encore peu de contenus convaincants et pertinents pour exploiter pleinement le potentiel des technologies immersives.
- Dépendance technologique : le fonctionnement de ces technologies nécessite l'utilisation d'autres infrastructures comme le cloud et la 5G, créant une dépendance technologique supplémentaire pour les entreprises.
- Problèmes de santé et de sécurité : l'utilisation des technologies immersives peut causer des troubles de santé, des maux de tête, des vertiges (*motion sickness*) et comporte des risques de dépendance liés à une utilisation prolongée.
- Manque de compétences : les entreprises souffrent d'un déficit de compétences spécialisées dans le domaine des technologies immersives, freinant leur adoption.
- Résistance au changement : il existe une réticence au sein des organisations, exacerbée par un discours médiatique parfois dénigrant envers les entreprises qui expérimentent l'usage de ces technologies et les instrumentalisent pour des enjeux de communication.

Cependant, les technologies immersives évoluent rapidement, et beaucoup de ces limites pourraient disparaître avec la commercialisation d'appareils de moins en moins chers et de plus en plus compacts. Par ailleurs, les investissements de la part des principaux acteurs du marché des technologies immersives (Microsoft, Meta et Apple…) se poursuivent, et ils devraient atteindre 100 milliards de dollars d'ici 2030.

1.2 CAS D'USAGES ET EXEMPLES

Malgré les freins évoqués, les technologies immersives ont cependant prouvé leur capacité à apporter une réelle valeur ajoutée dans certains secteurs et activités de l'entreprise grâce à leurs multiples cas d'usages.

Secteur public

Les technologies immersives sont utilisées pour enrichir les expériences culturelles et touristiques. Par exemple, la réalité augmentée et virtuelle permet de créer des visites immersives de musées ou de lieux emblématiques d'une ville ou d'un pays, comme des monuments historiques ou des sites patrimoniaux. Ces technologies offrent la possibilité de reconstituer des scènes historiques ou d'afficher des informations interactives pour captiver davantage les visiteurs, rendant la culture et l'histoire accessibles à un public plus large.

Secteur de la santé

Les technologies immersives facilitent les téléconsultations médicales, offrant aux médecins la possibilité de visualiser des diagnostics ou des traitements à distance dans des environnements immersifs. Pour les interventions en situation de crise, elles permettent également d'aider les soldats à prodiguer des soins à leurs camarades blessés, en utilisant des interfaces virtuelles fournissant des informations en temps réel, même sur le terrain.

Industrie

Les technologies immersives jouent un rôle clé dans l'optimisation des processus de production. Le jumeau numérique, par exemple, est central dans la quatrième révolution industrielle. Il permet de créer une réplique virtuelle d'équipements ou de chaînes de production, facilitant la gestion proactive des équipements, l'anticipation des pannes, et l'optimisation des chaînes d'approvisionnement. Des secteurs comme l'automobile et l'aéronautique utilisent ces technologies pour la visualisation et la modification en temps réel de prototypes 3D, réduisant ainsi les délais et les erreurs lors des phases de conception. Airbus, par exemple, suit tout le cycle de vie d'un avion grâce à la simulation immersive et à la réalité augmentée, de la conception à la maintenance en passant par l'assemblage.

Ressources humaines

Les technologies immersives sont de plus en plus utilisées, notamment pour le recrutement et l'intégration des nouveaux employés. Ces outils permettent de simuler des environnements de travail afin que les candidats puissent s'y projeter, ou encore d'organiser des tests immersifs pour évaluer des compétences spécifiques. Pour l'intégration, des environnements immersifs aident les nouveaux employés à se familiariser avec l'entreprise, ses processus et ses outils, avant même de rejoindre physiquement leur poste.

Formation

Les technologies immersives offrent dans ce domaine des opportunités sans précédent pour des environnements d'apprentissage sécurisés et ultra réalistes. Par exemple, les chirurgiens s'entraînent à des opérations complexes en réalité virtuelle, tandis que les pompiers ou les forces de l'ordre utilisent des simulateurs pour recréer des situations d'urgence. Dans le secteur aéronautique, les

pilotes d'avion et de navire peuvent s'entraîner dans des environnements virtuels très réalistes, prévenant ainsi les risques d'erreurs sur des équipements réels. France Travail a également développé des cas d'usages liés à l'immersion dans le cadre d'une formation, et réalisé des expérimentations pour évaluer le potentiel de valeur d'un « intraverse » (pour les *Program Increment plannings* dans le cadre des méthodes de travail agiles et pour les ateliers de créativité).

Marketing

Le marketing tire parti des technologies immersives pour créer des expériences clients uniques. Par exemple, certaines marques utilisent la réalité augmentée pour permettre aux consommateurs d'essayer virtuellement des produits (comme des meubles, vêtements, etc.) avant de les acheter. Cela permet non seulement d'augmenter l'engagement du client, mais aussi de se démarquer de la concurrence. Orange a ainsi développé pour ses clients une plateforme immersive (https://immersivenow.orange.com/) où ils peuvent visiter une boutique virtuelle, assister à des concerts ou encore participer à des jeux, renforçant ainsi l'engagement et la fidélité des utilisateurs.

Gestion de crise

Les technologies immersives sont un outil précieux dans la gestion de crise. Elles permettent de réunir une cellule de crise à distance et de simuler des scénarios pour anticiper les défis à venir. Grâce à des visualisations en temps réel, les décideurs peuvent optimiser la gestion des urgences et accélérer la reprise des activités après une catastrophe, qu'il s'agisse de perturbations logistiques ou énergétiques.

Simulations en temps réel

D'une façon générale, les technologies immersives sont particulièrement efficaces pour les simulations en temps réel. Dans des environnements complexes comme la gestion énergétique ou la planification urbaine, elles permettent de simuler des scénarios concrets avec des informations actualisées, afin d'améliorer la prise de décision et de tester des solutions sans risquer de créer des perturbations dans le monde réel. Par exemple, elles sont utilisées pour des simulations de consommation énergétique, anticipant les pics et les besoins à venir.

L'inclusivité et l'accessibilité

Enfin, les technologies immersives ont un impact majeur sur l'inclusivité et l'accessibilité. En facilitant l'accès aux environnements numériques pour les personnes en situation de handicap, elles leur permettent d'interagir plus facilement avec leur environnement. Ces technologies peuvent également adapter des expériences immersives pour répondre aux besoins spécifiques de différents publics, contribuant ainsi à une société plus inclusive et égalitaire.

Zoom sur les cas d'usages du jumeau numérique avec Alten

Pour créer un jumeau numérique, il faut disposer de toutes les compétences nécessaires multidisciplinaires, afin de traiter les données de bout en bout, du modèle 3D à l'information en temps réel. Il est également important de répartir la puissance de calcul sur différentes strates pour optimiser l'intelligence du jumeau numérique en fonction du contexte donné.

Par exemple, ALTEN a développé un jumeau numérique pour une **usine dans le cadre de l'industrie 4.0**. Ce jumeau permet de surveiller en temps réel les processus de production, d'optimiser la maintenance prédictive et d'améliorer la performance globale de l'usine. Ce type de solution permet également d'adapter rapidement les stratégies en fonction des analyses, offrant un pilotage plus efficace.

Le Jumeau Numérique pour les **Territoires Intelligents** représente une innovation clé pour améliorer la mobilité de manière écologique et sécurisée. Il permet une analyse et une simulation précise des flux de trafic et rend ainsi possible d'évaluer l'impact des modifications ou des événements d'infrastructure sur la circulation.

En exploitant ces technologies, les villes peuvent réduire la congestion, diminuer les niveaux de pollution et créer un système de transport plus efficace et convivial, contribuant ainsi à des territoires plus intelligents et mieux connectés.

Steve PEGUET, Directeur Scientifique, chez Alten

1.3 IMPACTS SUR L'ARCHITECTURE DES ENTREPRISES

1.3.1 INFRASTRUCTURE ET TECHNOLOGIE

- Bande passante élevée : les applications immersives consomment beaucoup de données, nécessitant des réseaux capables de gérer des flux importants sans congestion.
- Faible latence : pour une expérience utilisateur optimale, notamment dans les applications en temps réel, une latence minimale est essentielle.
- Puissance de calcul accrue : les SI devront intégrer des GPU (*Graphics Processing Unit*) puissants pour gérer les rendus 3D complexes.
- Volumes de données augmentés : les environnements immersifs génèrent de grandes quantités de données, exigeant des solutions de stockage évolutives et sécurisées.

1.3.2 ORGANISATION ET PROCESSUS

- Gestion des contenus : mise en place de systèmes de gestion de contenu capables de manipuler des actifs 3D et multimédias avancés.
- Interopérabilité : besoin de développer des API et des connecteurs pour assurer la compatibilité entre les technologies immersives et les systèmes existants.

- Mise à jour des applications métiers : adaptation ou refonte des applications pour tirer parti des capacités immersives.
- Sécurité et confidentialité : nouveaux vecteurs de menaces, les technologies immersives peuvent introduire des vulnérabilités inédites, comme la falsification de l'environnement virtuel.

1.3.3 CULTURE ET ADOPTION

- Nouveaux paradigmes d'interaction : conception d'interfaces naturelles et intuitives pour l'interaction en 3D, impliquant gestuelle, reconnaissance vocale, etc.
- Accessibilité : garantir que les applications soient utilisables par tous, y compris les personnes en situation de handicap.

1.4 IMPACTS EN MATIÈRE DE RÉSILIENCE

Les technologies immersives jouent un rôle croissant dans le renforcement de la résilience des organisations, en particulier dans la gestion des risques, l'anticipation des crises et l'amélioration des compétences. Cependant, leur adoption pose de nombreux défis. Voici un aperçu des impacts positifs et négatifs de ces technologies sur la résilience organisationnelle.

1.4.1 IMPACTS POSITIFS

- Formation améliorée : les technologies immersives offrent des environnements de formation réalistes et interactifs, ce qui améliore la qualité et l'efficacité de l'apprentissage.
- Développement de nouvelles compétences : les simulations immersives permettent aux employés de développer des compétences techniques spécifiques dans des conditions sûres et contrôlées, ce qui améliore leur préparation face aux défis opérationnels.
- Simulation et prédiction : les jumeaux numériques jouent un rôle crucial dans la résilience, en permettant de simuler le comportement d'un équipement ou d'une infrastructure en temps réel.
- Simulation de crise : les organisations peuvent utiliser les technologies immersives pour effectuer des simulations de crise à grande échelle. En s'entraînant à gérer des catastrophes naturelles, des cyberattaques ou des perturbations industrielles dans des environnements virtuels, les équipes apprennent à coordonner leurs réponses et à mieux comprendre les impacts de divers scénarios.

1.4.2 IMPACTS NÉGATIFS

- Complexité accrue : l'intégration de technologies immersives dans les processus critiques peut entraîner une complexité organisationnelle accrue. Plus une organisation devient dépendante des systèmes numériques pour sa formation, sa gestion de crises ou sa maintenance, plus il devient difficile de revenir à des méthodes plus traditionnelles en cas de problème technologique. Cette complexité peut également représenter une difficulté pour la continuité

des opérations, si ces systèmes ne fonctionnent pas comme prévu ou sont mal intégrés dans les processus existants.

- Dépendance accrue : les technologies immersives génèrent une dépendance envers plusieurs acteurs et infrastructures. Tout d'abord, elles nécessitent de faire appel à des fournisseurs spécialisés pour se procurer les équipements, les logiciels et les plateformes qui rendent ces simulations possibles. De plus, les organisations deviennent dépendantes de nouvelles compétences techniques, très demandées et peu disponibles sur le marché, notamment dans des domaines comme le développement de jumeaux numériques ou la gestion de plateformes immersives.

1.5 PRINCIPAUX RISQUES LIÉS À L'ADOPTION DE CES TECHNOLOGIES

L'adoption des technologies immersives présente de nombreux avantages, mais elle s'accompagne également de risques importants, tant en termes de sécurité et de gestion des données que d'impact sur l'environnement et la société :

Sécurité et confidentialité des données : les technologies immersives augmentent la surface de vulnérabilité des systèmes informatiques, notamment en matière de cybersécurité. Elles sont souvent dépendantes des infrastructures cloud des *hyperscalers*, ce qui accroît les risques liés à la protection des données sensibles et à la confidentialité. Une faille dans ces systèmes pourrait compromettre de vastes quantités d'informations.

Fracture numérique : l'adoption de technologies immersives au sein des entreprises peut aggraver la fracture numérique, à la fois en interne et vis-à-vis des clients. Certaines équipes ou segments de la population risquent de ne pas avoir les compétences ou les moyens d'accéder à ces technologies, ce qui pourrait freiner leur adoption. De plus, comme ces technologies sont destinées à un déploiement grand public, elles sont susceptibles de provoquer des réactions de rejet, similaires à celles observées lors de l'introduction d'autres innovations technologiques.

Impact écologique : le développement et l'utilisation des technologies immersives nécessitent des ressources significatives, notamment en termes de puissance de calcul. Les besoins énergétiques importants, en particulier pour les centres de données et les infrastructures de calcul nécessaires à ces technologies entrainent une empreinte écologique élevée.

Normes d'interopérabilité : un des défis majeurs des technologies immersives réside dans le développement de normes d'interopérabilité permettant aux systèmes immersifs de communiquer entre eux et avec des systèmes non-immersifs. L'absence de telles normes pourrait entraîner une fragmentation des écosystèmes ou permettre à certains acteurs, comme Meta, de dominer le marché, ce qui limiterait la concurrence et l'innovation.

Risques sociétaux : La généralisation des mondes immersifs pourrait avoir un impact négatif sur le tissu social, en favorisant l'isolement des individus et la montée de troubles psycho-sociaux. La dépendance croissante à ces environnements virtuels pourrait également nuire à la cohésion sociale, en créant des mondes parallèles qui éloignent les individus de la réalité physique et de la communauté.

1.6 DISRUPTION POSSIBLE SUR LA CHAÎNE DE VALEURS

L'intégration des technologies immersives engendre des bouleversements majeurs dans diverses étapes de la chaîne de valeur, touchant à la fois les processus industriels, la vente, le travail collaboratif et même des secteurs entiers comme celui du tourisme. Ces technologies modifient les modes de production, de distribution et d'interaction entre les entreprises et leurs clients.

Disruption des modalités de vente : visite virtuelle et simulation

Les technologies immersives transforment radicalement les méthodes de vente, en offrant aux clients des expériences immersives de haute qualité. La visite virtuelle permet aux consommateurs de découvrir des produits ou des services à distance, dans un environnement simulé et interactif. Que ce soit pour l'achat immobilier, la vente de voitures ou la découverte de produits de luxe, les clients peuvent explorer les options et personnaliser leurs choix en temps réel. Ces simulations augmentent l'engagement client et facilitent la prise de décision, tout en réduisant les barrières géographiques.

Réduction des délais d'ingénierie

Les processus d'ingénierie, particulièrement dans les domaines de la conception industrielle et du prototypage, bénéficient grandement des technologies immersives. Par exemple, dans l'industrie automobile ou aéronautique, la réalité virtuelle et les jumeaux numériques permettent de concevoir et de tester des prototypes en temps réel, ce qui accélère considérablement le développement des produits. De même, la simulation des zones de couverture réseau ou l'évolution de la structure d'un bâtiment peuvent être modélisées virtuellement avant même la mise en œuvre, réduisant ainsi les délais et les coûts liés à l'ingénierie.

Simulation et prédiction de panne

Grâce aux jumeaux numériques, il est désormais possible de simuler le comportement d'équipements complexes et de prédire les pannes avant qu'elles ne surviennent. Dans les environnements industriels, cette capacité de maintenance prédictive permet d'améliorer la gestion des équipements, d'anticiper les défaillances et de minimiser les interruptions de production. Ces simulations réduisent non seulement les coûts liés à la maintenance, mais elles augmentent également la fiabilité et la durabilité des infrastructures.

Collaborateur augmenté

L'« augmentation » des collaborateurs grâce aux technologies immersives bouleverse les pratiques de travail. En utilisant la réalité augmentée ou la réalité mixte, les employés peuvent accéder à des informations en temps réel, manipuler des objets virtuels superposés à leur environnement réel et collaborer à distance avec d'autres équipes. Cela crée un environnement de travail plus productif, où les compétences techniques et opérationnelles des employés sont renforcées par des outils digitaux. Par exemple, dans la maintenance industrielle, un technicien équipé d'un casque de réalité augmentée peut être guidé à distance par un expert, améliorant ainsi l'efficacité des interventions.

Impact sur le marché du tourisme

Le tourisme est également profondément impacté par les technologies immersives qui offrent de nouvelles formes d'exploration et d'expérience. Les visites guidées virtuelles permettent aux

utilisateurs de découvrir des destinations touristiques sans quitter leur domicile, en explorant des lieux emblématiques, des musées ou des parcs nationaux en réalité virtuelle. Cette évolution pourrait transformer le rôle traditionnel des guides touristiques et diversifier les offres, tout en ouvrant de nouvelles opportunités pour les professionnels du secteur. Des expériences immersives personnalisées pourraient également attirer de nouveaux types de touristes ou compenser les limitations des voyages physiques dans certains contextes, comme pendant les crises sanitaires.

1.7 ET DEMAIN ? QUEL POTENTIEL DE CROISSANCE À HORIZON 10 ANS ?

L'évolution des technologies immersives sur les 10 prochaines années promet des avancées majeures et une adoption plus large à travers différents secteurs. Chaque technologie présente un degré de maturité et un potentiel de croissance distinct, influencé par les progrès matériels et l'intégration dans les usages professionnels et quotidiens. Voici une analyse des principaux domaines d'innovation, ainsi que les potentiels de croissance associés à chaque technologie immersive.

Réalité Virtuelle (VR) : potentiel de croissance élevé

La réalité virtuelle, bien établie dans des domaines comme le divertissement, la formation et la simulation, continue de se développer rapidement. Avec l'amélioration de l'expérience utilisateur (réduction des nausées, interfaces plus intuitives), la VR est bien positionnée pour s'imposer davantage dans des secteurs comme l'éducation, l'architecture, et même la santé (réhabilitation, thérapie). Le développement d'applications immersives, combiné à une baisse des coûts des équipements, permettra une adoption plus massive.

Réalité Augmentée (AR) : potentiel de croissance très élevé

Le potentiel de la réalité augmentée est encore plus important. La limite actuelle réside dans la capacité à miniaturiser les dispositifs tout en intégrant suffisamment de puissance de calcul. Les appareils actuels, souvent trop encombrants pour un usage quotidien, freinent son adoption généralisée. Cependant, la prochaine génération de lunettes AR plus petites et légères, associée à une compatibilité avec les smartphones, ouvrira de vastes opportunités. Ces progrès pourraient transformer des secteurs comme la vente grand public, où les utilisateurs pourront essayer des produits en AR, et l'industrie, où les travailleurs utiliseront des lunettes AR pour améliorer la productivité et la sécurité.

Réalité Mixte (MR) : potentiel de croissance significatif

La réalité mixte, qui fusionne éléments physiques et numériques, verra une adoption croissante dans les 10 prochaines années. Actuellement utilisée dans des environnements spécialisés comme la conception industrielle et l'architecture, cette technologie sera de plus en plus intégrée dans les processus collaboratifs à distance, dans la maintenance ou dans l'enseignement scientifique. À mesure que les dispositifs deviennent plus accessibles et les cas d'usages plus nombreux, la MR pourrait trouver sa place dans un large éventail d'applications professionnelles.

Jumeaux numériques : potentiel de croissance très élevé, déjà en plein essor

Les jumeaux numériques, déjà largement utilisés dans l'industrie pour simuler des équipements, prédire des pannes et optimiser des chaînes d'approvisionnement, continueront à croître. Leur

application dans la formation (simulations complexes) et la gestion d'infrastructures deviendra essentielle, notamment avec l'essor des villes intelligentes et de la maintenance prédictive. Cette technologie pourrait également trouver de nouvelles opportunités dans la gestion énergétique et environnementale.

Metaverse : potentiel de croissance prometteur mais incertain

Le concept de metaverse, fortement promu par les grandes entreprises technologiques, présente un potentiel de croissance prometteur mais reste encore en phase de construction. La vision d'un monde virtuel interconnecté, dans lequel les utilisateurs peuvent travailler, socialiser et créer, est ambitieuse. À long terme, si les technologies sous-jacentes (VR, AR, blockchain) mûrissent et que les cas d'usage se diversifient, le metaverse pourrait transformer profondément des secteurs comme le commerce, l'éducation, l'événementiel et le divertissement.

Facteurs clés pour la croissance à venir :

- Amélioration des dispositifs : la miniaturisation et l'amélioration des performances des dispositifs immersifs sont essentielles pour une adoption quotidienne. Des lunettes AR légères, des casques VR plus confortables et des interfaces plus naturelles seront des catalyseurs de cette évolution.
- Engagement des grandes entreprises technologiques : des investissements massifs de la part des géants de la technologie comme Meta, Google, et Microsoft alimentent le développement de ces technologies. Leur implication favorise l'accélération des innovations et la démocratisation des usages.
- Extension des cas d'usage : de plus en plus de secteurs adoptent ces technologies, notamment l'industrie, la santé, le divertissement, la formation, et même la gestion des crises. L'émergence de nouveaux cas d'usage, renforcée par une amélioration de l'accessibilité et des coûts, stimulera une adoption plus large et durable.

2 LES RÉSEAUX DE TÉLÉCOMMUNICATIONS

Les récentes innovations dans les réseaux télécoms présentent des opportunités majeures pour la transformation des systèmes d'information au sein des organisations. L'émergence des réseaux privés 5G dans l'industrie marque un tournant significatif, offrant des capacités de connectivité ultra-rapides, une faible latence et une fiabilité accrue. Parallèlement, la virtualisation des réseaux représente une avancée intéressante, permettant la création d'infrastructures flexibles et évolutives. En outre, les satellites basse orbite émergent comme une solution prometteuse pour étendre la connectivité à des zones géographiques difficiles d'accès. Ces satellites, positionnés plus près de la Terre, réduisent la latence et augmentent la capacité des réseaux mondiaux, ouvrant ainsi la voie à une connectivité mondiale et constante.

2.1 DÉFINITION ET ÉTAT DE L'ART

Notre approche consiste à aborder les différentes solutions de connectivité au service de la numérisation des processus de l'entreprise. Ces solutions permettent d'évaluer plusieurs options technologiques à prioriser.

Ainsi, il convient d'aborder les réseaux 5G, 6G et les réseaux satellitaires en orbite basse. Les technologies télécoms évoluent rapidement, passant de la 5G à la perspective de la 6G. De nombreuses interrogations demeurent cependant sur l'apport réel de la 6G, notamment face à l'émergence de satellites en orbite basse. Cependant, les coûts élevés des abonnements satellitaires pourraient constituer un obstacle à la démocratisation de ces technologies. On s'interroge sur la manière d'intégrer ces avancées dans les Systèmes d'Information (SI).

Il existe un écart entre les promesses et la réalité dans le développement de ces technologies pour lesquelles il est nécessaire d'adapter les infrastructures internes, notamment avec l'acquisition de terminaux adéquats encore indisponibles en Europe, et de réaliser les ajustements requis en interne. La maturité technologique dépend aussi largement des cas d'utilisation propres à chaque entreprise.

Par ailleurs, derrière la notion de télécom, la partie connectivité et la téléphonie sont à prendre en compte au regard de l'émergence de nouvelles formes d'ondes (Li-Fi, LoRa). Pour certains cas d'usages, elles sont intéressantes car elles permettent des connexions avec moins de puissance, et donc plus discrètes.

La virtualisation des réseaux télécoms est également une évolution à prendre en compte. Elle va probablement s'accélérer, avec l'intégration de produits d'IA pour l'administration de ces réseaux virtualisés. Cette évolution contribue à aller vers une culture de partage et d'open source, notamment avec l'OpenRAN. La virtualisation permet le développement de PMR (*private mobile network*).

Malgré ces évolutions, il faudra toujours veiller à maintenir la souveraineté et la résilience des réseaux.

Quelques définitions

OpenRAN (*Open Radio Access Network*) :

OpenRAN est une approche ouverte de la conception des réseaux d'accès radio (RAN), qui permet d'interopérer et de dissocier les composants matériels et logiciels au sein d'une infrastructure réseau mobile. Cela permet aux opérateurs de télécommunications de combiner des équipements de différents fournisseurs tout en améliorant la flexibilité, réduisant les coûts et favorisant l'innovation. OpenRAN favorise un écosystème plus diversifié et moins dépendant des solutions propriétaires des grands fabricants d'équipements.

LiFi (*Light Fidelity*) :

Le LiFi est une technologie de communication sans fil qui utilise la lumière visible pour transmettre des données à très haute vitesse. À la différence du Wi-Fi qui utilise les ondes radio, le LiFi utilise les LED pour émettre des signaux lumineux qui sont captés par un récepteur compatible. Le LiFi présente des avantages en termes de sécurité, de bande passante et de densité de connexion, en particulier dans des environnements où les ondes radio peuvent poser des problèmes (comme les hôpitaux, les avions ou sous l'eau).

LoRa (*Long Range*) :

LoRa est une technologie de communication sans fil basse consommation et longue portée utilisée principalement pour l'Internet des objets (IoT). Elle permet de connecter des capteurs et des dispositifs sur de longues distances avec une faible consommation d'énergie, ce qui la rend idéale pour les réseaux étendus à faible débit (LPWAN). LoRa est fréquemment utilisée dans des applications telles que les villes intelligentes, l'agriculture, la surveillance environnementale, et les infrastructures critiques.

2.1.1 SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE LA 5G ET DE LA 6G

La 5G se développe à un rythme progressif, laissant présager de multiples applications futures. Parmi les usages identifiés et soutenus par l'Union internationale des télécommunications (ITU), plusieurs scénarios se distinguent. Tout d'abord, un scénario d'augmentation de la bande passante est envisagé pour répondre aux besoins d'applications à usage intensif, nécessitant des débits élevés. Ensuite, certains cas d'usage se concentrent sur des applications où la latence doit être courte et contrôlée ; ce contexte ouvre la voie à de nouvelles possibilités, comme les véhicules connectés, pour lesquels des échanges de données rapides et fiables sont cruciaux. Enfin, la 5G devrait faciliter une utilisation massive des communications de type *machine to machine*, avec un potentiel fort pour la connexion de parcs industriels et d'usines numériques, permettant de construire des environnements tels que des villes et bâtiments intelligents (*smart city*, *smart building*).

Concernant les fréquences et applications de la 5G, deux grandes bandes de fréquences sont définies : FR1 et FR2. Plus on monte en fréquence, plus la couverture sera faible mais utile pour les zones denses.

Le spectre se divise en trois grandes parties :

- Spectre inférieur à 1 gigahertz pour la couverture des zones blanches.
- Bande classique pour la densité, entre 3,5 et 6 gigahertz, en milieu urbain et semi-urbain.
- On peut monter plus haut en fréquence, au-delà de 40 gigahertz, pour des vocations capacitaires en *indoor* (salles de conférences, stades…).

Le déploiement de la 5G devrait être terminé d'ici fin 2027. Quant à la 6G, son déploiement devrait démarrer début 2025. Cependant, de nombreux défis restent à relever, notamment en termes de sécurité et de gestion du spectre.

Du point de vue des pouvoirs publics, il y a une volonté claire de reconquérir une forme de souveraineté sur ces sujets en mutualisant les initiatives.

De plus, deux facteurs vont devenir structurants dans l'évolution des réseaux télécoms : l'IA et l'efficacité énergétique. En effet, pour rendre les réseaux plus vertueux pour l'environnement, il faut être en capacité d'optimiser leur utilisation, de manager les ressources radio et de faire en sorte qu'ils ne fonctionnent pas inutilement, en contraignant leur consommation énergétique au strict nécessaire. De plus, sur l'intégration IA/télécom, certains éléments du réseau pourraient être remplacés par des réseaux de neurones ou par des fonctions qui apportent une augmentation de performance, ce qui est le prolongement de la virtualisation des réseaux.

Le maître mot est la convergence, par B<>com

La convergence est aujourd'hui un concept clé dans l'évolution de la connectivité, particulièrement mis en avant par des instituts de recherche comme B<>com. Cet institut, regroupant des acteurs majeurs tels qu'Orange et TDF, s'est historiquement concentré sur des domaines comme la connectivité (4G, 5G, machine-to-machine) et les communications stratégiques. Cependant, avec l'essor de nouvelles technologies comme la réalité augmentée, virtuelle, et la cybersécurité, la connectivité reste au cœur des préoccupations des industriels.

Mais pourquoi parle-t-on de « convergence » lorsqu'il est question de connectivité ? Cette notion englobe trois niveaux principaux :

1. Convergence matérielle : à l'origine, les équipements matériels étaient spécialisés pour des usages spécifiques. Aujourd'hui, ils sont devenus plus polyvalents, permettant à plusieurs applications de fonctionner sur une même plateforme. Par exemple, des technologies autrefois dédiées peuvent maintenant accueillir à la fois des applications télécoms, multimédias, ou encore industrielles.
2. Convergence des applications : des secteurs traditionnellement distincts, comme les télécommunications et l'électrotechnique, tendent à s'interconnecter. Les *smart grids* en sont un bon exemple, intégrant des normes télécoms aux réseaux électriques intelligents. Cette convergence s'étend également à d'autres industries, telles que l'automobile et les télécoms, ou même les radars et la future 6G. Ces collaborations entre secteurs autrefois cloisonnés permettent une plus grande efficacité et une meilleure interopérabilité des systèmes.
3. Convergence technologique : des technologies disruptives comme l'intelligence artificielle et les algorithmes d'efficience numérique jouent un rôle essentiel dans cette évolution. L'IA permet, par exemple, des réseaux auto-opérants et une gestion optimisée du spectre, améliorant ainsi la performance et l'automatisation des systèmes de communication.

En somme, la convergence n'est pas simplement une tendance mais une nécessité pour répondre aux défis croissants de la connectivité et de l'interconnexion des systèmes, dans un environnement technologique toujours plus complexe et interconnecté.

Thierry LUCIDARME, Directeur développement et valorisation, chez B<>com

2.1.2 LES RÉSEAUX SATELLITAIRES

La connexion des réseaux satellites est rendue possible grâce à la maîtrise de la latence. Dans le domaine militaire ou de la gestion de crise, les réseaux satellitaires peuvent être complétés par des relais, par exemple des drones ou des dirigeables, constituant une bulle tactique sur le théâtre de crise. Les plateformes HAPS (*High Altitude Platform Station*) peuvent également servir de relais pour créer un réseau filaire au sol. Cette technique a été assez populaire sur le continent africain où ont été

utilisés des dirigeables, mais c'est moins le cas aujourd'hui. C'est un domaine qui évolue rapidement, notamment avec les satellites en orbite basse.

Au niveau des réseaux LEO (*low earth orbit*), le satellite est à 600 km de la terre, le bilan de liaison est donc très bon avec des débits assez élevés, ce qui permet des latences assez compatibles avec les architectures actuelles. Ces nouveaux réseaux satellitaires sont très intéressants pour les zones qui restent à couvrir, pour certaines applications dans le monde de la défense et pour la communication avec les bateaux. Ils constituent également une bonne alternative pour les réseaux longue distance, en évitant la perte de signal et la mise en place de répéteurs. Cependant, ils s'inscrivent encore en compléments et non en concurrents des réseaux 5G/6G, car le matériel reste plus coûteux.

Le projet européen IRIS²

Le projet européen IRIS² a pour objectif de créer une infrastructure de connectivité et de résilience par satellite, en établissant une nouvelle constellation européenne offrant une connectivité sécurisée. Cette initiative répond aux attentes des Européens, et chaque région du globe pourra ainsi bénéficier d'une couverture par satellite en orbite basse. Le projet est financé par les secteurs public et privé européens.

IRIS² s'articule autour de deux niveaux d'infrastructure : une constellation en orbite basse et une autre en orbite moyenne. Le règlement du programme a été adopté en mars 2023 et prévoit des financements jusqu'en 2027. Un seul consortium a été jugé éligible.

Les enjeux du projet incluent le développement d'un secteur industriel européen robuste et la fourniture de services mondiaux à faible latence. IRIS² vise aussi à développer des terminaux plus compacts et plus performants, notamment pour soutenir des opérations militaires et institutionnelles. Un autre objectif clé est de protéger le patrimoine orbital et le spectre de fréquences, civiles et militaires, pour les utilisateurs européens.

Le projet s'inscrit également dans une stratégie de souveraineté économique et industrielle permettant à l'Europe de renforcer son rôle dans le domaine spatial. La concurrence mondiale est intense, entre les opérateurs européens avec OneWeb et O3B, et des acteurs tels que Starlink, Amazon, Telesat, ainsi que des concurrents chinois.

Le calendrier d'IRIS² a pour ambition de déployer un réseau sécurisé garantissant la protection des infrastructures gouvernementales et des actifs satellitaires avant 2030. L'accès au réseau sera protégé et situé sur le territoire européen.

La gestion du spectre, quant à elle, est encadrée à l'échelle mondiale par l'UIT, via des mécanismes de coordination internationale pour prévenir et résoudre les conflits liés à cette précieuse ressource.

Jean-Pierre DIRIS, Coordinateur interministériel IRIS² et GOVSATCOM

2.2 CAS D'USAGES ET EXEMPLES

L'évolution des réseaux télécoms, notamment avec l'avènement de la 5G et des technologies satellites en basse orbite, offre de nouvelles perspectives dans divers secteurs :

Santé

La performance des réseaux permet de pallier certaines problématiques liées aux déserts médicaux et d'améliorer la qualité des soins :

- Téléconsultations spécialisées à distance : un chirurgien expert peut superviser à distance une opération réalisée dans un hôpital rural, où l'on manque de spécialistes. La faible latence des réseaux 5G est alors cruciale pour permettre la transmission vidéo en temps réel et la réalisation d'interventions à distance.
- Redistribution optimisée des données médicales : les données des patients peuvent être centralisées et circuler en temps réel entre les services hospitaliers, renforçant ainsi la qualité des soins grâce à une meilleure coordination.
- Bloc opératoire connecté : à l'intérieur des hôpitaux, la coordination des dispositifs médicaux (robots chirurgicaux, moniteurs, etc.) *via* des réseaux ultra-fiables assure la synchronisation parfaite nécessaire pour les interventions chirurgicales délicates. Cette infrastructure réduit le risque d'interruption pendant les opérations critiques.

Défense

Dans le domaine militaire, la connectivité avancée est primordiale sur les théâtres d'opération :

- Assistance à distance : les experts en cybersécurité ou en armement peuvent assister les troupes en temps réel, où qu'elles se trouvent, sans attendre la venue physique de renforts techniques. Les drones et robots militaires peuvent aussi être pilotés à distance en fonction des besoins immédiats sur le terrain.
- Communication résiliente : les réseaux satellites en basse orbite renforcent la communication dans des environnements difficiles, où les infrastructures terrestres sont endommagées ou inexistantes.

Industrie 4.0

L'industrie manufacturière bénéficie particulièrement de la 5G, notamment dans les usines intelligentes :

- Commandes à distance : les machines et les robots autonomes peuvent être contrôlés en temps réel via la 5G, ce qui améliore la productivité et la flexibilité des chaînes de production. Par exemple, la faible latence des réseaux peut permettre à un technicien basé à Paris de superviser le fonctionnement d'une usine en Chine.
- Internet des Objets (IoT) : le déploiement massif de capteurs IoT dans les usines permet de surveiller en temps réel les conditions de production, la consommation d'énergie, et l'état des machines, optimisant ainsi la maintenance prédictive et réduisant les coûts.

Logistique et aéronautique

La connectivité transforme aussi la logistique et le transport aérien :

- Suivi en temps réel des marchandises : grâce aux réseaux télécoms avancés, chaque colis peut être suivi précisément tout au long de son parcours. Par exemple, dans l'aéronautique, le suivi des pièces détachées sensibles (comme les moteurs d'avion) peut se faire en temps réel pour s'assurer qu'elles arrivent à temps pour la maintenance.
- Optimisation des itinéraires : les flottes de véhicules de livraison ou les avions peuvent ajuster automatiquement leurs itinéraires en fonction de données reçues en temps réel sur la météo, la circulation ou les contraintes logistiques.

Transports

Les infrastructures de transport deviennent plus intelligentes et autonomes grâce à ces innovations :

- Pilotage des trains : la 5G permet une communication instantanée entre les trains et les centres de contrôle, facilitant une meilleure gestion des flux, réduisant les retards et améliorant la sécurité ferroviaire.
- Véhicules autonomes : les voitures autonomes nécessitent des réseaux à faible latence et ultra-fiables pour communiquer avec d'autres véhicules et avec les infrastructures (feux de signalisation, capteurs routiers). Des tests grandeur nature sont déjà en cours dans plusieurs villes.

Sûreté

Les réseaux non filaires jouent un rôle clé dans le domaine de la sûreté :

- Détection de comportements anormaux : les systèmes de surveillance intelligents, équipés de caméras et de capteurs, peuvent repérer et signaler des comportements suspects dans des lieux publics grâce à l'IA et la connectivité 5G.
- Résilience accrue : en cas de coupure d'un réseau filaire (comme la fibre), la 5G ou les satellites en basse orbite peuvent prendre le relais pour assurer une continuité de service, particulièrement sur des sites industriels sensibles ou éloignés.

Banque et finance

Dans le domaine bancaire, la 5G permet de résoudre des problématiques liées à la latence :

- Homogénéisation des distributeurs automatiques : la synchronisation mondiale des transactions dans les distributeurs automatiques est renforcée, permettant d'autoriser des retraits d'argent dans des zones éloignées sans temps de latence excessive, assurant une expérience client fluide.
- Réseaux privés et sécurisés : les banques et institutions financières déploient des réseaux privés 5G pour sécuriser leurs transactions internes et externes, et réduire les risques de cyberattaques tout en garantissant la rapidité d'exécution.

2.3 IMPACTS SUR L'ARCHITECTURE DES ENTREPRISES

L'évolution des réseaux, de la 5G à la future 6G, puis l'introduction des réseaux satellites en orbite basse, entraînent des transformations majeures dans l'architecture des entreprises, tant au niveau des infrastructures réseaux que des systèmes d'information.

La **course à la performance** se poursuit avec des progrès significatifs :

- L'efficacité énergétique multipliée par 10 entre la 4G et la 5G, permet de réduire les coûts opérationnels liés à la consommation d'énergie, un facteur important pour les grandes entreprises opérant des infrastructures IT à grande échelle.
- La multiplication par 10 de la régularité spectrale, et la possibilité de connecter jusqu'à 10 millions d'appareils par km², offrent des capacités de traitement et de gestion massives des objets connectés, essentielles dans l'industrie 4.0 et l'IoT.

Les entreprises doivent donc adapter leur architecture pour maintenir des débits élevés à coûts maîtrisés. La latence contrôlée des réseaux permet de trouver un compromis entre performance et coût, essentiel pour les opérateurs. L'évolution des normes pour les réseaux de télécommunications, promulguées par des organismes comme l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), a permis d'atteindre des débits plus élevés, allant jusqu'à 20 Gb/s, en intégrant directement certaines fonctions réseau aux antennes radio pour améliorer la latence.

De plus, avec l'émergence de technologies comme la 5G, les entreprises cherchent à **devenir agnostiques au réseau**. Cela signifie qu'elles doivent concevoir leurs architectures SI de manière à pouvoir s'adapter aux réseaux disponibles, qu'il s'agisse de 4G, 5G, ou même de réseaux satellites. Cette agilité est cruciale pour :

- Assurer la continuité de service, même en cas de défaillance d'une technologie spécifique.
- Bénéficier des meilleures performances possibles en fonction des disponibilités et des coûts associés à chaque réseau.

Par ailleurs, la **virtualisation des réseaux**, en place depuis plusieurs années, continue de transformer l'architecture IT :

- De nombreux composants réseau sont désormais virtualisés, y compris les fonctions de routage et de gestion du trafic, qui sont opérées dans des environnements cloud internes ou publics. Cette virtualisation permet aux entreprises de déployer des infrastructures plus flexibles et modulaires.
- Les équipes réseau doivent développer des compétences transversales pour intégrer et gérer ces infrastructures virtualisées, notamment dans des environnements cloud. Cela est particulièrement important pour les grandes entreprises où les spécialistes réseau ne sont pas toujours experts en *cloud computing*.

L'*edge computing* bouleverse également l'architecture des entreprises. Alors que Google et Amazon encourageaient autrefois les opérateurs à héberger leurs algorithmes, la tendance s'inverse :

- Les entreprises et opérateurs déploient maintenant des capacités de calcul sous les antennes, près des utilisateurs finaux. Cela réduit la latence et ouvre de nouveaux cas d'usage, comme

dans le domaine du *gaming*, où Fortnite, par exemple, a établi un partenariat avec SFR pour offrir une expérience utilisateur optimisée grâce à l'*edge computing*.

- Pour les entreprises, cette approche décentralisée nécessite une reconsidération des applications. Les développeurs doivent adapter leurs logiciels pour tirer parti de cette nouvelle répartition de la puissance de calcul, permettant de nouveaux usages et de meilleures performances.

Enfin, la 5G permet aussi aux entreprises de **déployer des réseaux privés** :

- Les réseaux privés 5G permettent une meilleure maîtrise des infrastructures réseau, une sécurité accrue, et une latence plus faible, ce qui est essentiel dans des environnements industriels sensibles ou à forte valeur ajoutée (usines, ports, centres logistiques).
- Ces réseaux permettent aussi de segmenter les services via le *network slicing*, une technique qui alloue des portions spécifiques du réseau à des applications ou à des usages distincts, garantissant ainsi des performances optimales pour les applications critiques tout en optimisant les coûts.

2.4 IMPACTS EN MATIÈRE DE RÉSILIENCE

L'évolution des réseaux télécoms soulève des défis en matière de résilience pour les entreprises. La capacité à maintenir la continuité des services face à des perturbations dépend de la manière dont les infrastructures sont conçues, intégrées et gérées. Les impacts sont à la fois positifs, avec des avancées technologiques qui renforcent la sécurité et la flexibilité, et négatifs, notamment en raison de la complexité accrue des systèmes et de la dépendance croissante aux réseaux.

2.4.1 IMPACTS POSITIFS

- **L'évolution des normes télécoms intègre des contraintes en matière de cybersécurité**. L'idée d'une cybersécurité native, avec des principes comme le *Zero Trust*, permet de renforcer la résilience en minimisant les risques d'intrusion ou de cyberattaques.
- Le déploiement de la 5G, des réseaux satellitaires, et de la fibre permet **une plus grande flexibilité en termes de connectivité**. En cas de panne ou de défaillance d'un réseau, les entreprises peuvent compter sur une solution de secours (par exemple, passer de la fibre à la 5G ou aux satellites), ce qui améliore leur capacité à continuer de fonctionner dans des situations imprévues.
- En plus de cette diversification des réseaux, des **mécanismes de basculement automatique** peuvent être intégrés pour détecter rapidement les pannes et basculer vers une autre technologie, assurant une continuité des services sans interruption. En outre, la mise en place d'une redondance géographique avec des infrastructures réparties sur plusieurs sites garantit une meilleure résilience en cas de sinistre ou d'incidents localisés.
- Le ***network slicing*** permet d'allouer des segments dédiés du réseau à des applications critiques, garantissant ainsi que certains services essentiels continuent de fonctionner, même en cas de perturbations sur d'autres parties du réseau.

2.4.2 IMPACTS NÉGATIFS

- Le **déploiement de l'*edge computing*** augmente la dépendance au réseau, car une interruption locale peut impacter la continuité des services décentralisés, notamment ceux nécessitant une faible latence. Cela réduit la résilience si les réseaux locaux ne sont pas suffisamment robustes.
- La multiplication des technologies (5G, satellites, fibre) et l'intégration de systèmes hybrides peuvent **complexifier la gestion des infrastructures**. Les entreprises doivent posséder des compétences techniques poussées pour assurer une coordination optimale entre les différentes technologies pour limiter le risque d'erreurs et d'interruptions en cas de mauvaise gestion.
- Avec les infrastructures de plus en plus distribuées (edge, cloud, IoT), **la surface d'attaque des réseaux s'élargit**, exposant davantage d'interconnexions à des failles potentielles. La multiplication des points d'entrée pour des cyberattaques augmente les risques de perturbations si une protection globale n'est pas rigoureusement mise en place.

2.5 RISQUES LIÉS À L'ADOPTION DE CES TECHNOLOGIES

L'adoption des nouvelles technologies telles que la 5G et les réseaux satellitaires soulève plusieurs risques, tant sur le plan stratégique qu'environnemental et sociétal.

En termes **d'autonomie stratégique**, la 5G représente un domaine dans lequel certains pays, notamment en Europe, risquent de perdre la bataille face à des acteurs dominants comme les États-Unis ou la Chine. L'Europe dépend largement des infrastructures et technologies développées ailleurs, ce qui pourrait compromettre sa capacité à maintenir une indépendance technologique. De plus, les réseaux satellitaires, tels que Starlink ou Qianfan, illustrent cette dépendance croissante. Dans ce contexte, des initiatives européennes comme IRIS2, cherchent à restaurer une part de cette autonomie, mais elles peinent encore à se concrétiser face à des compétiteurs déjà bien établis.

Le déploiement massif de ces technologies n'est pas sans **conséquences environnementales**. L'exploitation de réseaux satellitaires soulève des questions concernant la maintenabilité à long terme, notamment en ce qui concerne les risques de pollution spatiale et les difficultés liées à l'entretien et au remplacement des satellites en orbite basse. Sur Terre, l'extension continue des infrastructures xG et l'empilement des normes successives posent également problème. Le risque d'obsolescence de certaines technologies devient un défi important, notamment pour des objets qui, fonctionnant encore en 3G, comme les voitures connectées, se retrouvent rapidement dépassés et nécessitent des mises à jour coûteuses ou leur remplacement.

Enfin, ces technologies engendrent des **risques sociétaux** non négligeables. L'installation d'antennes 5G, de plus en plus nombreuses et visibles dans les espaces publics, suscite de fortes oppositions. Les inquiétudes relatives à la santé, à l'impact visuel des infrastructures, et parfois à la perte de contrôle local sur l'environnement suscitent des résistances croissantes parmi les citoyens. Ces débats soulignent la nécessité de concilier avancées technologiques et acceptabilité sociale pour éviter de creuser un fossé entre les promoteurs de ces innovations et les populations concernées.

2.6 DISRUPTION POSSIBLE SUR LA CHAÎNE DE VALEURS

L'évolution des réseaux privés dans les télécommunications bouleverse **les chaînes de valeur traditionnelles des opérateurs**. Par exemple, HubOne, initialement développé pour les réseaux des aéroports, propose désormais des réseaux 5G privés, notamment dans les grands hubs aéroportuaires de Paris (Charles-de-Gaulle, Orly, Le Bourget). Cela permet de fournir des services sophistiqués tels que la gestion en temps réel des bagages, la communication par vidéo haute définition, et la coordination des services d'urgence. Ce type de réseau offre aux entreprises la possibilité de devenir leurs propres opérateurs télécoms, renforçant leur autonomie et leur capacité à intégrer des technologies immersives et des solutions industrielles avancées.

En Allemagne, l'attribution de licences spécifiques pour les réseaux 5G privés montre comment les entreprises peuvent se détacher des opérateurs télécoms traditionnels. Des entreprises comme Mercedes-Benz et Siemens ont adopté ces réseaux privés dans leurs usines pour améliorer la confidentialité des données, optimiser les processus en temps réel, et réduire la dépendance vis-à-vis des opérateurs externes. Cela permet de mieux contrôler les infrastructures et d'augmenter la réactivité des chaînes de production.

Cependant, il est important de nuancer cette tendance. **L'adoption des réseaux 5G privés en Europe reste lente**, principalement à cause de la fragmentation et de la disponibilité restreinte du spectre. Bien que des progrès aient été réalisés pour harmoniser le spectre à travers l'Europe, les entreprises rencontrent encore des obstacles liés aux différences réglementaires et aux délais de mise en œuvre variables d'un pays à l'autre.

2.7 ET DEMAIN ? QUEL POTENTIEL DE CROISSANCE À HORIZON 10 ANS ?

D'ici 2030, la 6G promet des débits théoriques allant jusqu'à 1 Tb/s, ouvrant la voie à des applications avancées comme la réalité étendue (XR), les jumeaux numériques, et de nouvelles formes de connectivité intelligente. Contrairement aux générations précédentes, la 6G intégrera l'intelligence artificielle de manière native dans ses infrastructures, ce qui permettra d'optimiser en temps réel les performances des réseaux et d'offrir une latence extrêmement faible, essentielle pour ces nouvelles technologies.

Un autre facteur de disruption sera l'émergence des constellations de satellites en orbite basse. Ces réseaux satellitaires pourraient devenir omniprésents sans nécessiter d'accords réglementaires nationaux, comme ceux de l'ARCEP en France. Cette nouvelle ère pourrait permettre aux utilisateurs de téléphones satellitaires, par exemple achetés aux États-Unis, de les utiliser sans restriction dans d'autres régions du monde.

Cela présente un défi juridique : les lois actuelles devront évoluer pour mieux réguler ces réseaux, qui sont en dehors des cadres traditionnels des télécoms.

3 LES TECHNOLOGIES DE PARTAGE DES DONNÉES

L'émergence de la *data economy*, ou économie des données, soulève des enjeux cruciaux quant à la gestion et à l'exploitation des données et à la préservation de la vie privée des individus. C'est une approche qui nécessite l'utilisation de technologies cryptographiques pour renforcer la sécurité face aux menaces potentielles. Toutefois, la portée de ce concept dépasse largement le cadre cybernétique, englobant également des technologies qui encouragent l'ouverture des données. En effet, l'efficacité de l'utilisation des données repose sur leur intégration plutôt que sur leur confinement, car les silos de données limitent la valeur exploitable des nouvelles technologies. Parallèlement, l'identité numérique émerge comme un sujet majeur, posant des défis à court terme aussi bien pour les entreprises que pour les pouvoirs publics.

3.1 DÉFINITION ET ÉTAT DE L'ART

Les technologies de partage de la donnée englobent **un ensemble de solutions et de protocoles visant à sécuriser et à réguler l'échange de données entre plusieurs acteurs**, tout en garantissant la qualité, la confidentialité et l'intégrité des informations partagées. Elles reposent souvent sur des standards ouverts comme ceux disponibles *via* des répertoires de normes *open data*, permettant une interopérabilité entre systèmes. L'un des enjeux majeurs concerne la nécessité ou non d'un tiers de confiance pour valider la donnée partagée. Certaines technologies, comme la certification de la donnée et les identités digitales décentralisées, suppriment ce besoin en renforçant l'authenticité *via* la blockchain ou d'autres systèmes de certification. Ces technologies permettent à l'utilisateur de retrouver le contrôle sur ses données, dans une logique d'économie de la donnée qui touche également à des concepts comme le Web 3 et les *data trusts.* La protection des données est essentielle pour assurer leur partage en confiance, que ce soit pour des raisons de sûreté (par exemple, la comparaison de données chiffrées dans des environnements sensibles) ou pour assurer la traçabilité d'un produit. Le déploiement de plateformes mutualisées, notamment dans le cadre de l'économie verte, et les offres de cloud souverain, deviennent alors des éléments fondamentaux pour soutenir ces écosystèmes sécurisés et respectueux de la régulation des données.

Parmi ces technologies de partage, on trouve les technologies de la confidentialité (*Privacy Enhancing Technologies* ou PET) qui deviennent cruciales pour **soutenir l'économie de la donnée**, soit l'ensemble des activités économiques et des modèles d'affaires basés sur la collecte, l'analyse, l'exploitation, le partage et la monétisation des données. Historiquement, les données étaient protégées *via* des technologies de chiffrement, mais ces dispositifs sont complexes et prennent du temps à déployer, tout en comportant un certain risque résiduel. Cela pose un défi en particulier dans des contextes de collaboration entre entreprises. C'est ici que les technologies PET entrent en jeu. Leur but est de permettre de traiter et de partager les données tout en garantissant leur confidentialité, ce qui est particulièrement important pour les données personnelles et sensibles. L'une des technologies phares de ce domaine est le chiffrement homomorphique qui permet d'aller au-delà des techniques classiques de masquage et de chiffrement visant à la fois à protéger la donnée et à la rendre exploitable.

En effet, les technologies traditionnelles limitent souvent le partage de données, en les masquant, ce qui rend difficile la corrélation entre différents jeux de données. La promesse des PET est de fournir une conformité renforcée, tout en permettant à plusieurs parties de collaborer sur les mêmes données, chacun n'ayant accès qu'à ce qui lui est autorisé. Ces technologies permettent également de stocker des données dans des environnements incertains tout en maintenant un haut niveau de sécurité.

Les PET (*Privacy-Enhancing Technologies*) recouvrent plusieurs technologies innovantes, chacune ayant des applications spécifiques dans la protection des données et la préservation de la confidentialité :

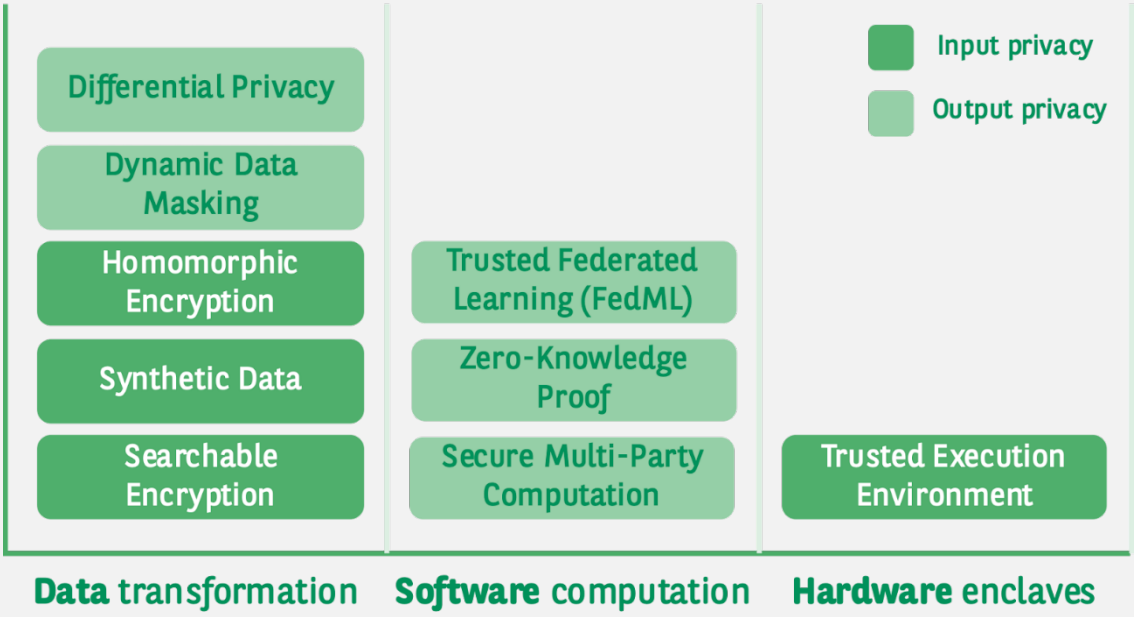
- Le ***differential privacy*** est une méthode qui permet de récolter et d'analyser des données tout en garantissant que les informations spécifiques à un individu ne puissent être réidentifiées, même dans des ensembles de données agrégées.
- Le **masquage dynamique des données** est un processus qui modifie temporairement les données sensibles au moment de leur utilisation pour limiter leur exposition, tout en permettant leur manipulation ou analyse.
- Le **chiffrement homomorphique** est une technique de chiffrement avancée qui permet d'effectuer des calculs sur des données cryptées sans les déchiffrer. Cela garantit que les informations restent confidentielles tout au long du processus de traitement. La start-up Zama propose des solutions dans ce domaine.
- La **génération de données synthétiques** est une technologie qui crée des ensembles de données fictifs mais réalistes, utilisés à des fins d'analyse ou de test, sans compromettre la confidentialité des données réelles.
- Le ***searchable encryption*** est un type de chiffrement qui permet de rechercher des informations dans des données cryptées sans les déchiffrer, assurant ainsi que les données sensibles ne sont jamais exposées.
- **L'apprentissage fédéré** (*federated machine learning*) est un cadre d'apprentissage automatique où les modèles sont entraînés localement sur plusieurs appareils ou serveurs, puis agrégés de manière sécurisée. Cela permet d'améliorer des modèles sans que les données quittent leur lieu d'origine.
- **Les preuves à divulgation nulle de connaissance** (*zero-knowledge proofs)* sont une méthode cryptographique qui permet de prouver la véracité d'une information sans révéler cette information elle-même, assurant ainsi une confidentialité totale.
- Le **calcul multipartite sécurisé** (*secure multi-party computation*) est une technologie qui permet à plusieurs parties de collaborer et de partager des résultats ou des analyses basés sur des données sans que les données brutes ne soient jamais partagées ni déplacées.
- Le ***confidential computing*** est une technique qui protège les données utilisées dans des environnements de traitement en isolant les informations dans des enclaves sécurisées, permettant d'effectuer des calculs sensibles sans risque d'exposition.

Chaque technologie a ses propres caractéristiques, mais elles partagent toutes une complexité technique qui les rend encore difficiles à déployer à grande échelle sur le long terme. Cependant, certaines d'entre elles, comme le « *confidential computing* », commencent à être disponibles, notamment *via* les *hyperscalers*.

L'analyse de BNP Paribas sur les *Privacy-Enhancing Technologies*

Au sein de BNP Paribas, l'accent est mis sur la confiance numérique. L'un des objectifs est d'explorer les nouvelles technologies permettant de relever les défis liés à la confidentialité et à la protection des données personnelles.

Sans être exhaustif, les neuf technologies de sécurisation mentionnées dans le schéma ci-dessous sont pour la plupart encore émergentes et s'intègrent à différents niveaux de l'architecture de gestion des données, que ce soit lors de leur acquisition ou de leur accès :



Classement des différentes technologies de partage de la donnée

Ces technologies évoluent rapidement et devraient être prêtes pour un déploiement à grande échelle d'ici 5 à 10 ans, en particulier dans les secteurs de la banque et de la santé. BNP Paribas s'intéresse à ces innovations depuis environ trois ans et contribue à des pilotes et expérimentations dans le monde bancaire. Ces avancées sont activement suivies par tous les fournisseurs de cloud qui y voient la possibilité de renforcer leur offre de « cloud de confiance ».

Le marché des solutions de « *Privacy-Enhancing Technologies* » (PET) est en pleine expansion, avec une multitude d'acteurs, allant des laboratoires de recherche aux grands fournisseurs et start-ups spécialisées. Plus de 60 fournisseurs ont été identifiés à ce jour et le choix de solutions adaptées aux cas d'usage métier demeure complexe. La France bénéficie d'un niveau d'expertise et d'un savoir-faire reconnu dans le domaine de la cryptographie, avec une recherche académique à la pointe et plusieurs jeunes entreprises spécialisées dynamiques et innovantes. Cette proximité constitue un atout pour les grandes entreprises françaises qui peuvent se faire accompagner dans leurs initiatives exploratoires, en veillant à maîtriser les impacts sur les processus de développement existants.

BNP Paribas a adopté une approche au cas par cas pour une première implémentation de ces technologies, en collaboration avec des fonctions transversales comme la Cybersécurité et le Group Data Office. Une communauté pilotée par les équipes IT est active autour de ces enjeux, avec des événements internes et des actions de sensibilisation visant à encourager l'appropriation de ces technologies. L'objectif est de partager les retours d'expérience pour être prêts à faire évoluer ces solutions à grande échelle lorsque la technologie sera mature.

La réticence au partage des données entre Entités reste l'obstacle majeur. Le projet Gaia-X offre une solution pour gérer les aspects juridiques du partage sécurisé des données et le véritable défi demeure celui des freins culturels (ces technologies changent les règles d'accès aux données entraînant parfois des frustrations chez les data analystes et data scientistes, habitués à manipuler directement les données réelles).

Laurent AVET, Analyste Stratégique et Architecte d'Entreprise chez BNP Paribas

3.2 CAS D'USAGES ET EXEMPLES

Les technologies de protection des données peuvent répondre à de nombreux besoins pour les entreprises et administrations.

Cas d'usages dans la santé

Dans le domaine de la santé, le partage sécurisé des données entre différents acteurs comme les instituts de recherche, les médecins et les patients est crucial. Les technologies de protection des données, comme le chiffrement homomorphique, permettent de collaborer sur des données sensibles tout en garantissant leur confidentialité. Par exemple, des études cliniques pourraient être menées sur des patients répartis entre plusieurs hôpitaux sans que leurs informations personnelles ne soient dévoilées à chaque intervenant.

Identité digitale décentralisée

Ce cas d'usage permettrait de fournir une identité numérique décentralisée, facilitant les interactions avec différents services sans compromettre la vie privée des usagers. Une telle technologie pourrait leur permettre de se connecter à des services gouvernementaux ou privés (comme Orange) en toute sécurité, sans avoir à divulguer toutes leurs informations personnelles, grâce à des solutions de confidentialité comme les « *zero-knowledge proofs* ».

Identité numérique régalienne

L'identité numérique régalienne permettrait à l'État d'authentifier les citoyens de manière sécurisée pour l'accès à divers services publics. L'utilisation de technologies comme la signature numérique et l'authentification multi-facteurs garantirait à la fois l'intégrité et la confidentialité des données personnelles, tout en facilitant les démarches administratives.

L'initiative nationale « France identité » et l'initiative européenne de portefeuille numérique « *Potential* »

Le projet France Identité, soutenu par France Titres et le ministère de l'Intérieur, vise à développer une identité numérique régalienne. Ce projet revêt une importance cruciale pour lutter contre la fraude, notamment l'usurpation d'identité. Le marché de la fraude, aujourd'hui structuré sur le *dark web*, est une menace grandissante à laquelle cette initiative souhaite apporter une réponse concrète.

Les cartes d'identité format carte bancaire depuis 2021 contiennent une puce électronique. L'application « France Identité » est la seule capable d'accéder aux infos présentes sur la puce. Le premier usage de cette application est l'identification en ligne, notamment *via* FranceConnect. À partir d'un simple QR code, les informations d'identité peuvent être consultées. Le ministère de l'Intérieur garantit l'identification à travers FranceConnect, assurant une sécurité renforcée et une prévention face au risque de phishing.

Par ailleurs, la dématérialisation de la justification d'identité, par exemple dans le cadre de la constitution de dossiers, permet la génération d'un PDF remplaçant la traditionnelle photocopie de la carte d'identité. Un cadre d'usage est défini pour déterminer les informations communiquées, et le QR code associé garantit la fiabilité des documents. Ce PDF est signé électroniquement par le ministère de l'Intérieur. Toutefois, l'acceptation de ces documents dématérialisés est laissée à la discrétion du service demandeur, et il reste encore à déterminer si ces documents seront acceptés à l'étranger, notamment au sein de l'Union européenne.

Il sera bientôt possible d'importer son permis de conduire dans l'application « France Identité » via le site « Mes points permis », permettant de scanner tous types de permis et de transmettre ces informations aux forces de l'ordre en cas de contrôle. Par ailleurs, il est aussi possible d'utiliser France Identité et sa carte d'identité numérique pour prouver son identité en face à face. La carte a été conçue pour suivre le mouvement du téléphone assurant à la personne vérifieuse qu'il ne s'agit pas d'une capture d'écran. Il est aussi possible de vérifier l'authenticité des données présentes sans aucune transmission.

En parallèle, une certification d'identité numérique est déployée depuis février 2024. L'identité numérique certifiée permet de réaliser à distance des démarches qui nécessitaient jusqu'alors un déplacement de l'usager à des fins de vérification d'identité. Aujourd'hui, elle vous permet de réaliser une procuration de vote totalement dématérialisée et d'accéder aux services présents sur FranceConnect+. La certification d'identité numérique s'obtient après un passage en mairie pour effectuer avec un agent de mairie une comparaison de ses empreintes avec celles contenues dans le titre présenté.

Pour soutenir cette transformation, le gouvernement accélère la distribution des nouvelles cartes d'identité, avec un taux de remplacement des cartes à hauteur de 40 % pour celles émises entre 2017 et 2021. La puce électronique représente l'élément central de la sécurité de ces cartes. Il est important de noter que l'application « France Identité » ne permet d'inscrire

qu'une seule identité numérique par personne, et cette démarche reste facultative et révocable à distance.

Fin 2024, des travaux sont en cours avec la SNCF pour justifier de son identité lors des contrôles de billets. France Identité prévoit aussi d'intégrer la carte grise et l'attestation d'assurance dans l'application, ce qui facilitera les interactions avec les garages et les constats d'accident. En outre, les services d'entreprises pourront utiliser cette application pour authentifier leurs utilisateurs, via des conventions spécifiques, comme cela se fait déjà avec d'autres acteurs de l'identité numérique.

Enfin, l'application pourrait s'étendre à d'autres cas d'usage, comme le prêt de voiture, qui fait partie des situations quotidiennes. Il est également envisagé de développer des aspects liés à l'éducation supérieure, avec par exemple l'intégration de la carte étudiante directement dans le téléphone.

Vers un portefeuille numérique européen

Le projet européen visant à développer un portefeuille numérique centré sur l'identité, voté le 29 février 2024, fait partie d'un programme plus large piloté par la Commission européenne. Un appel à projets a été lancé pour mener un projet pilote à grande échelle, auquel le ministère de l'Intérieur participe aux côtés de 140 entreprises et 19 États membres. L'objectif est de tester plusieurs cas d'usage, notamment l'accès aux démarches administratives avec une interopérabilité entre pays, l'ouverture de comptes bancaires avec BNP Paribas, la souscription à une ligne téléphonique avec Orange, la location de véhicules, la signature de contrats ainsi que la prescription électronique. Chaque État membre développera son propre portefeuille numérique (*wallet*), avec un haut niveau de confiance, notamment grâce à la comparaison des empreintes digitales.

En France, l'implémentation de ces six cas d'usage était prévue d'ici fin 2024, avec des expérimentations territoriales qui permettraient de tester ces usages. En 2025, des tests transfrontaliers seront menés pour s'assurer de l'interopérabilité entre les différents pays. Le succès de ce projet repose en grande partie sur l'alignement des choix technologiques, car la Commission européenne travaille à la mise en place d'une architecture de référence stricte, garantissant l'interopérabilité entre les différents systèmes nationaux. Ce projet de portefeuille numérique européen représente une avancée importante dans la construction d'un cadre commun pour l'identité numérique à l'échelle continentale.

Florent Tournois, Directeur de projet « France Identité » chez France Titres.

Cas d'usages bancaires

Les technologies de protection des données sont particulièrement pertinentes dans le secteur bancaire, notamment pour la lutte contre la fraude, la gestion du risque financier, ou encore le partage sécurisé des données entre différentes banques. Le « *confidential computing* » permettrait de corréler les transactions suspectes entre plusieurs banques sans que les données de chaque institution ne

soient exposées. L'ACPR, Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution, travaille en France sur ces questions avec des banques internationales, tandis que des initiatives similaires sont en cours aux Pays-Bas et en Angleterre.

D'autres applications incluent l'amélioration du *credit scoring* et des modèles de tarification, l'analyse marketing et la génération de recommandations de produits, ainsi que la réduction des risques IT, cyber et de fuite de données tout au long du cycle de vie des logiciels. Ainsi, par exemple, la Royal Bank of Canada partage des données avec des commerçants pour faire des recommandations d'achat et de la fidélisation. Selon les habitudes d'achat d'un client, la banque peut vendre des éléments de *scoring* sur le risque de non solvabilité.

Propriété intellectuelle (brevets, œuvres d'art, diplômes, etc.)

La protection des droits de propriété intellectuelle grâce à ces technologies garantirait l'authenticité des brevets, des diplômes ou des œuvres d'art numériques. Des solutions comme les « *smart contracts* » ou les technologies de registres distribués (blockchain) peuvent assurer que les droits de propriété sont respectés et que les échanges se font en toute sécurité.

Sûreté (données issues des caméras d'un aéroport)

La comparaison et le traitement sécurisé des données issues des caméras d'un aéroport peuvent être partagés avec des services de renseignement sans exposer les informations confidentielles. Les techniques comme le calcul multipartite sécurisé permettent de garantir que les vidéos traitées restent confidentielles tout en identifiant des menaces éventuelles.

Traçabilité des données (authenticité et valeur dans la *supply chain*)

Les technologies de traçabilité garantissent l'authenticité des informations dans la chaîne d'approvisionnement (*supply chain*). Elles permettent d'assurer que chaque étape de fabrication et de distribution respecte les normes, notamment en termes d'éthique et de qualité, tout en conservant la confidentialité des informations stratégiques.

Lutte contre la fraude (utilisation de l'IA)

L'intelligence artificielle, associée aux technologies de protection des données, permet de détecter plus rapidement les fraudes en analysant des *patterns* tout en garantissant que les données sensibles ne sont pas accessibles. Par exemple, les banques peuvent corréler des événements frauduleux entre plusieurs établissements sans pour autant exposer les informations des clients.

Assurance (partage des risques, analyse des besoins réglementaires)

Dans le secteur de l'assurance, le partage sécurisé des données entre assureurs et régulateurs permet d'analyser les risques de manière plus efficace tout en respectant les exigences réglementaires. Le « *privacy enhancing technology* » (PET) facilite ce type de collaboration, en protégeant les données confidentielles.

Entraînement des modèles LLM avec des données synthétiques

L'entraînement des grands modèles de langage (LLM) peut se faire à partir de données synthétiques, cela permet de protéger les données réelles tout en garantissant des performances comparables. Les

données synthétiques reproduisent les propriétés des données originales sans contenir d'informations sensibles.

Usages cyber

Préserver la confidentialité des données sensibles, en complément des cyber technologies de protection des réseaux, est un autre cas d'usage de ces technologies de protection des données. Elles garantissent que, même en cas de compromission, les informations stratégiques restent inaccessibles.

Accès aux données publiques (INSEE, OCDE...)

L'accès sécurisé aux données issues des organismes publics (comme l'INSEE ou l'OCDE) peut être facilité grâce à des technologies de protection des données, permettant aux entreprises d'analyser ces informations tout en garantissant leur confidentialité et en respectant les règles de protection des données personnelles.

Ces cas d'usages montrent comment les technologies de protection des données peuvent transformer des secteurs variés, en facilitant le partage sécurisé d'informations tout en respectant les exigences de confidentialité et de sécurité.

3.3 IMPACTS SUR L'ARCHITECTURE DES ENTREPRISES

Ces nouvelles technologies peuvent transformer en profondeur l'architecture des systèmes d'information, en renforçant à la fois la gestion et la protection des données. L'identification et la cartographie des données destinées à être partagées à travers des catalogues de données (*data catalogs*) devient nécessaire pour préciser leur qualité et leur niveau de confidentialité, permettant d'établir des échanges de données sécurisés et fiables. L'adoption de standards *open data* comme ceux répertoriés sur le *Data Standards Directory* facilite l'interopérabilité des systèmes, mais il est essentiel d'accompagner ces standards macro d'une mise en œuvre détaillée au niveau micro pour garantir une intégration efficace dans les systèmes d'information existants. Le lien entre les équipes d'architecture et la direction data, en charge de la gouvernance des données, devient crucial pour coordonner ces évolutions.

De plus, le développement de normes d'interopérabilité dans des initiatives collaboratives telles que le *Car Connectivity Consortium* (pour le secteur automobile) ou le consortium AURA (pour le secteur du luxe), montrent l'importance d'un cadre commun pour favoriser l'intégration entre les différents acteurs et systèmes. L'architecture des systèmes d'information évolue ainsi vers des structures ouvertes et collaboratives, souvent soutenues par des consortiums sectoriels comme le consortium EPI dans le secteur bancaire, garantissant une interconnexion plus fluide et une innovation partagée. Ces approches renforcent la flexibilité et l'efficacité des systèmes, tout en assurant une meilleure gestion des risques liés à la confidentialité et à la sécurité des données.

3.4 IMPACTS EN MATIÈRE DE RÉSILIENCE

Les technologies de protection de la confidentialité (PET) ont des répercussions significatives sur la résilience des organisations, tant positives que négatives, influençant leur capacité à réagir aux cybermenaces et à assurer la continuité des activités en période de crise.

3.4.1 IMPACTS POSITIFS

- Amélioration de la résilience de l'entreprise par la protection de son patrimoine informationnel et le renforcement de la confidentialité des données, notamment en cas d'attaques cyber.
- Amélioration de la capacité de réaction aux cyberattaques grâce à un partage sécurisé des données, permettant des réponses plus rapides et coordonnées.
- Réduction des risques d'usurpation d'identité grâce à des échanges sécurisés d'éléments d'identité, notamment entre les États.

3.4.2 IMPACTS NÉGATIFS

- La reprise des activités après un choc, touchant l'intégrité des données et/ou leur chemin d'accès, peut devenir plus complexe, à cause des différentes couches de chiffrement.
- La complexité des systèmes et leur interconnexion accrue peuvent augmenter la difficulté à gérer les situations de crise, en rendant les processus plus fragiles et potentiellement plus vulnérables.

3.5 RISQUES LIÉS À L'ADOPTION DE CES TECHNOLOGIES

L'adoption des technologies de protection de la confidentialité (PETs) présente plusieurs risques qui peuvent affecter les entreprises à différents niveaux : environnemental, stratégique, mais aussi opérationnel et légal.

Sur le **plan opérationnel,** l'intégration des PETs peut être coûteuse et complexe. Le déploiement de ces technologies exige des investissements considérables, non seulement pour leur mise en place mais aussi pour leur maintenance, et il nécessite souvent des équipes multidisciplinaires (techniques, juridiques, financières) pour assurer une intégration efficace. De plus, le marché des PETs reste immature, avec des solutions parfois difficiles à évaluer ou à intégrer dans les systèmes existants, créant des obstacles supplémentaires à leur adoption généralisée.

Au **niveau légal et réglementaire**, l'incertitude persiste quant à l'utilisation correcte des PETs dans le cadre de la protection des données. Les entreprises doivent naviguer entre la nécessité d'anonymiser les données pour se conformer aux réglementations, et celle de conserver la capacité de les réidentifier dans certains contextes, comme la santé. Cette complexité rend l'application des cadres législatifs (comme le RGPD) difficile à interpréter.

Sur le **plan environnemental**, les technologies comme le chiffrement homomorphique ou le calcul multipartite sécurisé exigent une grande puissance de calcul, ce qui accroît la consommation énergétique des infrastructures, aggravant ainsi l'empreinte carbone des entreprises qui les adoptent.

Enfin, les *hyperscalers* américains sont actuellement les premiers à développer et à proposer ce type de technologies à leurs clients, ce qui va à l'encontre du développement d'une **autonomie stratégique européenne dans le domaine du numérique.**

3.6 DISRUPTION POSSIBLE SUR LA CHAÎNE DE VALEURS

L'intégration des technologies de protection des données dans les chaînes de valeur leur permet de s'enrichir mutuellement, favorisant la **création de synergies entre différents secteurs**. Ces technologies agissent comme un accélérateur pour la mise en place de plateformes externalisées, facilitant la collaboration dans une logique d'écosystèmes. Grâce à ces plateformes mutualisées, plusieurs partenaires peuvent partager des ressources de manière sécurisée, tout en renforçant la confiance entre eux. Cette approche stimule également l'économie verte en encourageant l'utilisation durable des infrastructures et des données, optimisant ainsi l'impact environnemental des entreprises qui s'y engagent.

3.7 ET DEMAIN ? QUEL POTENTIEL DE CROISSANCE À HORIZON 10 ANS ?

Bien que le marché des technologies de protection des données soit encore immature, leur croissance va s'accélérer dans les 5 prochaines années grâce au développement des identités numériques et des standards d'échanges par secteur et au sein des différents écosystèmes. En effet, l'identité numérique jouera un rôle majeur en tant qu'accélérateur de l'acculturation numérique, facilitant l'accès aux services tout en renforçant la sécurité et la confidentialité.

Dans un environnement de plus en plus contraint, une attention particulière devra être portée à la gestion de la consommation des données, ces technologies apporteront une réponse à cette contrainte, en évitant leur multiplication excessive tout en garantissant des processus optimisés et durables.

Par ailleurs, les utilisateurs retrouveront le contrôle sur leurs données, avec des modalités de partage claires et sécurisées, réaffirmant ainsi la propriété des données personnelles ou industrielles.

En parallèle, la traçabilité des données deviendra une composante essentielle, notamment dans une optique environnementale, afin de suivre et de minimiser l'impact écologique des processus numériques.

Enfin, la nécessité d'offres de cloud souverain deviendra de plus en plus évidente pour garantir la protection des données critiques, tout en respectant les régulations locales et internationales. Ces réflexions montrent que la convergence entre innovation technologique et protection des données ouvrira des perspectives économiques et sociales considérables dans les années à venir.

4 LE FUTUR DU STOCKAGE DE DONNÉES

Face à l'explosion du stockage des données, nécessaire, entre autres, à l'entraînement des intelligences artificielles, les technologies de stockage sont en constante évolution. Ces technologies de stockage de données doivent répondre à plusieurs contraintes : accès rapide, intégrité des données, fiabilité, durabilité, sécurité et coût maîtrisé. Bien qu'aucune technologie ne puisse parfaitement satisfaire l'ensemble de ces contraintes, il est essentiel de passer en revue les technologies existantes et émergentes pour s'adapter à l'évolution du stockage des données.

4.1 DÉFINITION ET ÉTAT DE L'ART

Dans un premier temps, il est nécessaire de différencier le stockage de la mémoire : la mémoire est souvent intégrée aux unités de calcul, tandis que le stockage est plus éloigné. Depuis les années 1980, la capacité de stockage mondiale a augmenté de manière exponentielle, atteignant un exabyte à la fin des années 90. Actuellement, les solutions de stockage visent à conserver les données dans des conditions optimales, mais les serveurs modernes ne remplissent pas toujours cet objectif.

Quelques définitions

Mémoire : Dans le contexte informatique, la mémoire fait référence à des composants matériels capables de stocker temporairement des données pour un accès rapide par le processeur. Il s'agit principalement de la mémoire vive (RAM), qui permet de lire et d'écrire des informations rapidement, mais qui est volatile, c'est-à-dire qu'elle perd les données lorsqu'elle n'est plus alimentée en énergie.

Stockage : Le stockage désigne la capacité d'un dispositif à conserver des données de manière permanente ou non, pour une utilisation future. Contrairement à la mémoire, le stockage conserve les informations même lorsque l'appareil est éteint. Les supports de stockage peuvent être physiques (disques durs, SSD) ou basés sur des systèmes en cloud.

Exabyte : Un exabyte (EB) est une unité de mesure de la quantité de données informatiques, équivalente à 1 milliard de gigaoctets ou 1 000 pétaoctets. Un exabyte représente une capacité de stockage considérable, souvent utilisée pour décrire les besoins en données des grandes entreprises ou des infrastructures cloud à l'échelle mondiale. Les unités de mesure des données informatiques, du plus petit au plus grand, sont : bit, octet (byte), kilooctet (KB), mégaoctet (MB), gigaoctet (GB), téraoctet (TB), pétaoctet (PB), exaoctet (EB), zettaoctet (ZB) et yottaoctet (YB).

Disque dur (HDD) : Le disque dur est un dispositif de stockage de données qui utilise un ou plusieurs plateaux magnétiques en rotation rapide, sur lesquels une tête de lecture/écriture se déplace pour accéder ou enregistrer des informations. Les disques durs sont largement utilisés pour le stockage de masse en raison de leur grande capacité et de leur coût par gigaoctet relativement bas.

SSD (*Solid State Drive*) : Le SSD est un type de support de stockage qui utilise des puces de mémoire flash pour stocker des données, au lieu de plateaux rotatifs comme les disques durs. Les SSD sont plus rapides, plus fiables, et plus résistants aux chocs que les disques durs, mais peuvent être plus coûteux par unité de stockage.

Supports magnétiques : Les supports magnétiques sont des dispositifs de stockage qui utilisent des matériaux magnétiques pour enregistrer et récupérer des informations, comme les disques durs (HDD) et les bandes magnétiques. Ces supports permettent une grande capacité de stockage et sont souvent utilisés pour les sauvegardes à long terme et les archives de données.

Mémoire flash : La mémoire flash est un type de mémoire non volatile, ce qui signifie qu'elle conserve les données même en l'absence d'alimentation électrique. Elle est couramment utilisée dans les SSD, les clés USB, les cartes mémoire et les smartphones. Elle permet une lecture et une écriture rapide des données.

Stockage sur ADN : Le stockage sur ADN est une technologie émergente qui exploite les propriétés moléculaires de l'ADN pour stocker des données numériques. Chaque brin d'ADN peut contenir une quantité massive d'informations sous forme de séquences de bases (A, T, C, G). Cette approche promet un stockage à très haute densité, avec une stabilité sur des milliers d'années, mais elle est encore au stade expérimental.

Type	Elément	Volatilité	Vitesse	Capacité	Coût	Applications courantes
Mémoire	**Mémoire vive (RAM)**	Volatile	Très rapide	Faible à moyenne	Modéré	Exécution de programmes, stockage temporaire de données
Mémoire	**Mémoire flash**	Non volatile	Rapide	Faible à moyenne	Modéré	SSD, clés USB, cartes mémoire
Stockage	**Disque dur (HDD)**	Non volatile	Lent à moyen	Élevée	Faible	Stockage de masse, sauvegarde de données
Stockage	**SSD**	Non volatile	Rapide	Moyenne à élevée	Modéré à élevé	Ordinateurs portables, serveurs, stockage rapide
Stockage	**Stockage sur ADN**	Non volatile	Lent	Potentiellement très élevée	Élevé	Archivage à long terme, recherche
Stockage	**Gravure sur plaques de verre**	Non volatile	Lent	Potentiellement très élevée	Élevé	Archivage à long terme, recherche

Classement des technologies de stockage de données

Les technologies de stockage évoluent rapidement, passant des supports magnétiques traditionnels et des mémoires flash à des solutions innovantes issues de la recherche moléculaire. Les nouvelles approches, comme celles basées sur des matériaux cristallins, du saphir ou du verre, ainsi que les technologies de stockage sur ADN, se démarquent par leur potentiel à répondre aux défis actuels. D'autres évolutions ont lieu dans le domaine du stockage de données. Un exemple marquant est la technologie 5D, qui consiste à créer des trous cylindriques microscopiques dans des matériaux afin d'y graver des données, offrant une capacité et une durabilité exceptionnelles. Cette technologie promet de révolutionner le stockage en permettant de conserver d'énormes quantités de données sur des supports physiques beaucoup plus compacts. De plus, des initiatives comme le projet Silica de Microsoft, qui explore le potentiel du verre de quartz comme support de stockage, et des projets en Allemagne, qui gravent des informations sur des plaques de céramique, renforcent l'idée que le stockage de données est en pleine mutation.

Après l'effervescence, la maturation discrète de la blockchain

La blockchain n'a pas été spontanément évoquée par le groupe de travail, ce qui est symptomatique d'une certaine maturité (ou d'un désenchantement inavoué ?) vis-à-vis de cette technologie, après l'effervescence des années 2017-2019.

Aujourd'hui, la blockchain trouve ses applications concrètes autour de trois axes principaux. Dans le domaine de la traçabilité, elle permet de garantir l'authenticité et le suivi des produits de luxe, comme le démontre le consortium AURA co-fondé par LVMH, Prada Group, Cartier, et OTB, ou offre des garanties d'origine dans le secteur énergétique où EDF l'expérimente pour certifier l'électricité verte. Pour la certification documentaire, Docaposte développe des solutions de certification et d'authentification de documents, tandis que Thales l'utilise pour la gestion collaborative et la traçabilité des marchandises portuaires. Le secteur financier reste le plus mature en termes d'applications. Par exemple, la Banque de France poursuit ses expérimentations de monnaie numérique de banque centrale (MNBC), le Crédit Agricole investit dans les obligations numériques (plateforme so|bond, lancée par le Crédit Agricole et la banque suédoise SEB), la traçabilité automobile et des projets blockchain collaboratifs, et plusieurs banques françaises participent au consortium R3 pour développer des solutions blockchain collaboratives.

Cependant, les retours d'expérience des DSI soulignent plusieurs limitations importantes : une complexité technique persistante, des coûts d'exploitation élevés, et une consommation énergétique significative. La promesse initiale d'une désintermédiation totale s'est souvent heurtée à la nécessité de maintenir des tiers de confiance. De plus, les enjeux de gouvernance et d'interopérabilité restent des freins majeurs à l'adoption large de solutions blockchain.

Pour l'avenir, deux domaines semblent particulièrement prometteurs : d'une part, l'utilisation de *smart contracts* pour l'automatisation de processus métier complexes, notamment dans l'assurance et la *supply chain* ; d'autre part, le développement de solutions de *tokenisation* d'actifs, qui pourrait révolutionner les échanges de valeur dans le secteur financier, sous réserve d'une clarification du cadre réglementaire.

La blockchain reste donc une technologie en maturation, dont l'adoption doit être évaluée au cas par cas selon la valeur ajoutée réelle pour l'entreprise.

L'informatique moléculaire, par Biomemory

L'informatique moléculaire représente une avancée majeure par rapport à l'informatique électronique classique : telle est la promesse de l'entreprise Biomemory.

Biomemory, fondée en 2021, s'appuie sur des travaux de recherche menés depuis 2018 au CNRS et à Sorbonne Université, inspirés de l'idée émise dès 1959 par Richard Feynman, lauréat du prix Nobel de physique de 1965. Inscrite dans le cadre des recherches mondiales sur le stockage de données sur ADN, en collaboration avec plusieurs partenaires internationaux, l'entreprise se spécialise dans la biologie moléculaire et la micro-électronique. Constatant que la bataille de l'électronique est perdue, elle se positionne sur les technologies du futur. Bien que catégorisée comme « *tech frontier* », elle génère déjà quelques revenus et compte actuellement 20 employés, avec un objectif de passer à 45 d'ici fin 2025. Elle fait face à la concurrence de deux entreprises américaines.

Le stockage sur ADN se positionne de plus en plus comme une solution clé pour l'avenir, avec une communication qui privilégie le terme « moléculaire » afin d'éviter les interrogations sur les aspects biologiques. Ce procédé repose sur la conversion mathématique de suites binaires en lettres, puis de ces lettres en une molécule d'ADN réelle. La molécule ainsi créée est conservée dans des conditions optimales, car elle peut être endommagée par des éléments tels que l'eau et l'air. Un séquenceur est ensuite utilisé pour la lecture des données.

L'un des grands espoirs actuels est de ne plus avoir à reconvertir les données en binaire. L'idée est de traiter les données de manière moléculaire avant de les envoyer au processeur, ce qui pourrait améliorer l'efficacité. Des technologies issues de l'agroalimentaire sont également explorées pour produire des blocs d'ADN à l'aide de bactéries, avant leur purification. À terme, de grandes cartouches d'ADN pourraient être livrées directement aux datacenters pour le stockage des données.

L'application à grande échelle du stockage sur ADN est prévue pour 2030, mais actuellement, cette technologie est utilisée principalement pour le marquage. Bien que l'ADN impose un compromis sur la latence (inférieure à celle des bandes magnétiques), il est particulièrement adapté pour des sauvegardes régulières plutôt que pour des recherches actives dans les bases de données.

L'objectif est de maintenir des coûts compétitifs tout en proposant une solution simple et modulaire, avec les mêmes opérateurs et logiciels que ceux utilisés actuellement. Comme la vitesse de lecture et d'écriture évolue différemment, il sera nécessaire de modifier certains éléments du système en fonction des percées technologiques. L'ADN permet un stockage longue durée avec une lecture linéaire, et sa consommation énergétique est environ 1000 fois inférieure à celle des systèmes traditionnels, car il n'est pas nécessaire d'alimenter en continu les dispositifs, ne dépassant pas 1000W en moyenne par hexa.

Le recyclage de l'ADN est également simplifié, puisqu'il est produit à partir de sucre. Concernant la standardisation, des efforts sont en cours, notamment avec la SNIA (*Storage Networking*

> *Industry Association)*, pour finaliser l'accès au codec[1], car le média ADN n'est pas obsolescent, mais le codec pourrait l'être. Le modèle économique envisagé s'inspire de celui des imprimantes, avec une première phase de vente directe, suivie d'une ouverture aux fabricants d'équipement originaux (OEM) tels qu'IBM ou HPE, qui intégreront leurs propres logiciels à cette technologie.
>
> **Erfane Arwani**, Président-Directeur général et Cofondateur de Biomemory

4.2 CAS D'USAGES ET EXEMPLES

Les nouvelles technologies de stockage des données connaissent des avancées notables qui trouvent des applications dans un large éventail de secteurs, chacun étant confronté à des besoins croissants en matière de gestion et de conservation des informations. Pratiquement tous les secteurs sont concernés par la gestion des données, mais certains se démarquent par leurs besoins spécifiques. **L'industrie**, par exemple, est l'un des plus gros producteurs de données avec l'essor des objets connectés et de l'Internet industriel des objets (IoT), générant des informations en temps réel qu'il faut stocker et traiter rapidement. De son côté, le secteur de la **santé** fait face à des volumes croissants de données, notamment en radiologie, et dans la gestion des dossiers médicaux, où une gestion fiable et à long terme est cruciale pour les diagnostics, les traitements et les innovations futures.

Ces évolutions sont d'autant plus pertinentes que **l'intelligence artificielle** joue désormais un rôle clé dans le traitement des données. Les algorithmes d'IA analysent, prédisent et optimisent l'usage de ces informations, mais leur efficacité dépend largement des capacités des systèmes de stockage sous-jacents. Ainsi, aucune innovation dans le domaine de l'IA ne peut se concrétiser sans une attention particulière portée aux infrastructures de stockage des données. Le développement de ces technologies devient donc un enjeu stratégique : sans stockage adapté, aucun système informatique, aussi performant soit-il, ne pourra fonctionner. En somme, le stockage des données est aujourd'hui non seulement un pilier technique, mais aussi un moteur de compétitivité et d'innovation pour l'avenir.

4.3 IMPACTS SUR L'ARCHITECTURE DES ENTREPRISES

Les avancées en matière de technologies de stockage obligent les entreprises à repenser leur architecture informatique. Avec l'intégration de systèmes basés sur des cristaux ou des solutions moléculaires, les infrastructures doivent s'adapter pour tirer parti de ces innovations. De plus, la **standardisation par des organisations comme la SNIA** (*Storage Networking Industry Association)* aidera à faciliter l'adoption de nouvelles technologies tout en maintenant l'intégration avec les systèmes existants.

[1] Un codec (de l'anglais *coder-decoder*) est un programme ou un dispositif qui encode ou décode un signal numérique, souvent utilisé pour compresser et décompresser des fichiers numériques. Les codecs permettent de réduire la taille des fichiers en appliquant des algorithmes de compression, tout en maintenant une qualité acceptable pour le stockage.

4.4 IMPACTS EN MATIÈRE DE RÉSILIENCE

La résilience des entreprises sera fortement influencée par la capacité à gérer et à sécuriser les données. Les systèmes de stockage sur ADN, avec leur faible consommation énergétique et leur durabilité potentielle, peuvent renforcer la continuité des activités. La possibilité de stocker d'énormes volumes de données dans un espace réduit tout en minimisant l'impact environnemental est essentielle dans un monde où la durabilité devient une exigence.

4.5 RISQUES LIÉS À L'ADOPTION DE CES TECHNOLOGIES

Les nouvelles technologies, notamment le stockage sur ADN, sont **coûteuses** à mettre en place et demandent des équipements spécifiques et des compétences techniques avancées. Le coût de synthèse et de décodage des séquences ADN est encore trop élevé pour une adoption massive. Cette technologie nécessite également des temps d'accès très lents, limitant son usage à des applications de stockage de données « froides », rarement consultées.

Bien que ces technologies puissent à terme réduire l'empreinte carbone des centres de données en diminuant leur taille et leur consommation énergétique, la fabrication des supports, comme les mémoires flash, repose sur des **ressources minérales rares**. L'extraction de ces matériaux, tels que le lithium, a des conséquences importantes sur l'environnement et génère une dépendance géopolitique risquée. De plus, les disques durs et de SSD (*Solid State Drive*) présents dans les datacenters ont besoin d'être remplacés en moyenne tous les 3 à 5 ans[2], ce qui soulève des enjeux de consommation énergétique et de durabilité des matériaux, notamment en ce qui concerne le recyclage des supports de données. L'émergence de technologies de stockage innovantes pourrait permettre de réduire le coût environnemental du stockage de données, en termes de consommation d'énergie mais aussi de consommation de matières premières nécessaires à la fabrication des disques durs et SSD.

La **durabilité de certaines technologies** comme les mémoires flash est limitée par leur cycle de vie, en raison de l'usure des cellules de stockage après plusieurs cycles d'écriture. Par ailleurs, d'autres technologies, comme le stockage sur céramique, bien qu'extrêmement durables, ne sont pas encore adaptées à une utilisation opérationnelle courante en raison des défis liés à l'encodage et au décodage des données.

Ces technologies étant souvent développées dans des laboratoires ou des entreprises situés en dehors de l'Europe, leur adoption pourrait **aggraver la dépendance stratégique** de certains pays vis-à-vis de fournisseurs étrangers, ce qui pose des questions sur la souveraineté numérique et la résilience en cas de tensions géopolitiques.

[2] *Stocker les données : la piste prometteuse de l'ADN,* Interstices, publié le 13/01/2023, consulté le 13/11/2024 : https://interstices.info/stocker-les-donnees-la-piste-prometteuse-de-ladn/

4.6 DISRUPTION POSSIBLE SUR LA CHAÎNE DE VALEURS

Si des technologies comme le stockage sur ADN deviennent viables à grande échelle, elles pourraient **rendre obsolètes les méthodes traditionnelles de stockage**, comme les disques durs ou les bandes magnétiques. Les **centres de données** pourraient se miniaturiser de manière radicale, réduisant ainsi la demande à la fois en infrastructures physiques massives, en énergie pour l'alimentation et le refroidissement, et en maintenance des équipements actuels. Cela pourrait bouleverser des secteurs entiers impliqués dans la construction, la gestion, et la fourniture de ces infrastructures énergivores. Les fabricants et prestataires actuels pourraient être dès lors contraints de se tourner rapidement vers ces nouvelles technologies pour rester compétitifs.

4.7 ET DEMAIN ? QUEL POTENTIEL DE CROISSANCE À HORIZON 10 ANS ?

Avec l'explosion continue des données générées, les exploitants de datacenters seront en quête de solutions de stockage plus efficaces. Le marché pourrait voir une transition vers des matériaux alternatifs, représentant une opportunité considérable pour les entreprises capables d'innover dans ce secteur. En Europe, bien que l'on ne produise pas actuellement de supports de stockage, l'essor des technologies moléculaires pourrait changer cette dynamique, offrant une voie vers une plus grande autonomie dans la gestion des données.

À l'horizon de dix ans, le potentiel de croissance de ces nouvelles technologies de stockage est important, surtout dans les grands datacenters et dans le secteur militaire. Cependant, les entreprises adopteront ces solutions plutôt d'ici 20 ans, au moment où ces technologies deviendront accessibles au niveau des coûts, et notamment grâce à la miniaturisation.

5 LES INTELLIGENCES ARTIFICIELLES

Les intelligences artificielles n'ont pas été traitées par le groupe de travail de la même façon que les autres groupements technologiques, car elles ont fait l'objet par ailleurs de travaux spécifiques par des groupes de travail dédiés. Cependant, il nous est apparu nécessaire d'inclure une note sur le sujet, au regard de notre objectif de constituer une ébauche de « radar » des technologies émergentes.

Si vous souhaitez en apprendre plus sur ce sujet, nous vous invitons cependant, à consulter les deux synthèses récentes du Cigref, et dont la note suivante n'est qu'un résumé :

- Note d'information et d'actualité – Recommandations au sujet des IA génératives, publiée le 12 juillet 2023.
- L'IA en entreprise : retours d'expérience et bonnes pratiques, publiée le 26 février 2024.

5.1 DÉFINITION ET ÉTAT DE L'ART

L'intelligence artificielle (IA) désigne des technologies capables de simuler des processus cognitifs humains, comme l'apprentissage, la résolution de problèmes et la prise de décisions. En particulier, l'IA générative, qui inclut des outils comme les modèles de langage large (LLM), permet de générer des contenus nouveaux en réponse à des instructions en langage naturel. Ces technologies sont en pleine expansion et modifient considérablement le paysage des entreprises, de l'automatisation des tâches simples à la prise de décisions complexes.

Les IA génératives, telles que ChatGPT, Claude ou Mistral, sont les dernières innovations dans ce domaine, se distinguant par leur capacité à générer du contenu contextuel à partir de *prompts*. Cependant, leur adoption réelle dans les processus d'affaires reste en phase d'expérimentation, bien que leur potentiel disruptif soit bien identifié.

5.2 CAS D'USAGES ET EXEMPLES

Les IA sont utilisées dans plusieurs secteurs pour des tâches diverses :

- **Automatisation de tâches internes** : gestion de documents, classification, synthèse de comptes rendus, ou assistance aux développeurs pour la génération de code.
- **Chaîne de valeur** : automatisation de la logistique, gestion des stocks, centres d'appel, et personnalisation de l'expérience client (ex. *chatbots*).
- **Transformation métier** : réinvention de certaines fonctions métiers pour créer des avantages compétitifs grâce à l'innovation générée par l'IA.

Les exemples incluent l'optimisation des opérations internes et des processus critiques (service à la clientèle, gestion des stocks), et l'amélioration des capacités d'analyse prédictive et de prise de décision.

Cette transformation est d'autant plus importante avec l'arrivée des « Agents », programmes ou entités autonomes capables de prendre des décisions et d'effectuer des tâches de manière séquentielle ou en chaîne, souvent sans intervention humaine directe, permettant des enchaînements d'actions ou de traitements visant à augmenter de manière significative l'usage des LLM en entreprise.

Les Agents dans les LLM servent à créer des systèmes plus autonomes et spécialisés, capables d'effectuer des tâches complexes en utilisant le langage naturel comme interface. Ils permettent d'étendre les capacités des modèles de langage en leur donnant accès à des outils externes, des bases de connaissances spécifiques et en leur conférant la capacité de planifier et d'exécuter des séquences d'actions pour atteindre des objectifs définis.

5.3 IMPACTS SUR L'ARCHITECTURE DES ENTREPRISES

L'adoption de l'IA dans les entreprises exige une refonte partielle ou complète de leurs architectures informatiques. Cela passe notamment par **des investissements dans des infrastructures adaptées aux modèles gourmands en ressources**, comme les *GPU* (unités de traitement graphique), qui permettent d'entraîner et d'utiliser des modèles d'IA, souvent accessibles via des partenaires cloud. De plus, il est crucial pour les entreprises de mettre en place une **gouvernance des données** afin de constituer des jeux de données de qualité, réduisant ainsi les risques d'hallucination des modèles. Pour renforcer ces systèmes, des solutions de stockage modernes, telles que les bases de données vectorielles ou les bases de données graphiques, sont également indispensables.

L'intégration de l'IA modifie par ailleurs la **relation avec les fournisseurs de solutions technologiques**. Elle rend essentielle une compréhension claire des feuilles de route des logiciels intégrant l'IA, afin d'éviter des développements redondants. Ces nouvelles infrastructures nécessitent également de **repenser les systèmes de mesure** : par exemple, un modèle d'IA générative ne fournit jamais la même réponse à une question identique, ce qui implique d'adapter les démarches de tests automatisés.

Enfin, l'IA et l'IA générative offrent une opportunité de **simplification des architectures** via l'automatisation de certains processus métier. Par exemple, pour produire des revues analytiques avancées, des formulaires comportant plusieurs champs déroulants étaient traditionnellement utilisés pour classifier l'information. Désormais, grâce à l'IA générative, il est possible de revenir à des champs de texte libre avec une classification automatique, sans perte de qualité ni d'analyse.

5.4 IMPACTS EN MATIÈRE DE RÉSILIENCE

L'intelligence artificielle, lorsqu'elle est utilisée de manière judicieuse, peut jouer un rôle clé dans le renforcement de la résilience des entreprises.

5.4.1 IMPACTS POSITIFS

L'IA peut aider les entreprises à **mieux anticiper et gérer les risques** grâce à des outils prédictifs. Elle permet de détecter des anomalies dans des volumes de données massifs et d'identifier des menaces potentielles avant qu'elles ne se concrétisent. Cela peut inclure la gestion des risques financiers, de sécurité ou liés à la chaîne d'approvisionnement.

En automatisant des tâches complexes et répétitives, **l'IA libère des ressources humaines** qui peuvent se concentrer sur des activités à plus forte valeur ajoutée, tout en assurant une continuité opérationnelle. Cette automatisation n'inclut pas nécessairement une diminution du personnel agissant sur ces actions mais participe généralement à une amélioration de la qualité produite ou à la réalisation de tâches pas ou peu couvertes auparavant, que l'IA va pouvoir réaliser, en fonction des cas d'usages identifiés. Cette automatisation réduit également les risques d'erreur humaine dans les processus essentiels, tels que la gestion des stocks, la surveillance de systèmes critiques ou la réponse aux cyberattaques.

Une autre grande force de l'IA peut être sa capacité à **traiter des données en temps réel,** qui permet aux entreprises de prendre des décisions rapides et éclairées, en particulier en situation de crise. Par exemple, en cas d'attaque informatique, les systèmes d'IA peuvent rapidement identifier la source de l'intrusion, recommander des actions correctives et minimiser les dommages potentiels.

5.4.2 IMPACTS NÉGATIFS

La **confiance excessive dans l'IA** pour des processus critiques peut poser des problèmes en cas de défaillance du système. Un mauvais algorithme, une implémentation défectueuse ou une perturbation technique peuvent entraîner des interruptions dans les opérations ou des erreurs majeures. Par ailleurs, la maintenance et la mise à jour continue de ces systèmes nécessitent des compétences pointues et une vigilance constante.

Les **« hallucinations » de l'IA**, lorsque les modèles génèrent des informations fausses ou trompeuses, représentent un risque sérieux. Si l'IA fournit des conclusions erronées en situation de crise ou pour des décisions critiques, cela peut non seulement affecter les performances de l'entreprise, mais aussi nuire à sa réputation auprès de ses partenaires et clients.

L'utilisation de l'IA soulève des questions importantes concernant la **protection de la propriété intellectuelle**. Les modèles d'IA, souvent entraînés sur des données massives, peuvent exploiter des informations propriétaires ou confidentielles sans en garantir la sécurité. De plus, le manque de clarté sur les droits de propriété des créations générées par IA peut entraîner des litiges, notamment en matière d'innovations brevetées.

La **consommation énergétique** de ces modèles est également un facteur à prendre en compte dans sa réflexion d'implémentation. L'émergence de micro-modèles plus spécifiques participe à une implémentation plus économique et aussi performante pour répondre à des cas d'usages spécifiques.

5.5 RISQUES LIÉS À L'ADOPTION DE CES TECHNOLOGIES

Les IA génératives utilisent de vastes quantités de données et peuvent poser des problèmes de **protection de la vie privée**, notamment en matière de données sensibles ou réglementées.

L'IA peut **reproduire et amplifier les biais** contenus dans les données d'apprentissage, générant des résultats potentiellement erronés ou injustes.

Le **cadre réglementaire** autour des IA est encore en développement, particulièrement en Europe avec l'*AI Act*. Les entreprises doivent veiller à respecter les normes en vigueur tout en maintenant une responsabilité humaine forte dans l'usage de ces technologies.

Ces modèles d'IA génératives ouvrent également à la **porte à de nouveaux types de cyberattaques** dont l'entreprise doit également se prémunir.

5.6 DISRUPTION POSSIBLE SUR LA CHAÎNE DE VALEURS

L'IA, et particulièrement l'IA générative, est susceptible de bouleverser les chaînes de valeur existantes en réinventant les modes de production et de distribution. Par exemple, les IA peuvent automatiser des tâches complexes, réduire les coûts, et accélérer les processus de prise de décision. Cependant, ces changements peuvent également entraîner des perturbations majeures, notamment pour les secteurs qui n'adoptent pas rapidement ces technologies ou qui ne forment pas suffisamment leur main-d'œuvre.

5.7 ET DEMAIN ? QUEL POTENTIEL DE CROISSANCE À HORIZON 10 ANS ?

Le potentiel de croissance des technologies d'IA, en particulier l'IA générative, est immense. Selon les prévisions, les entreprises continueront à intégrer ces technologies dans leurs processus d'ici 10 ans, avec une adoption croissante dans des secteurs variés tels que la finance, la santé, et la logistique. Cette croissance sera principalement tirée par des innovations dans les infrastructures numériques, la gouvernance des données, et l'optimisation des ressources énergétiques pour répondre aux exigences de puissance de calcul.

Le point de vue de PMU® sur les intelligences artificielles

Pour être à la pointe de la technologie, une place importante a été faite à l'exploration et l'intégration de l'IA dans tous les métiers chez PMU®. Pour cela, une cellule Innovation a été créée au sein de notre Direction des systèmes d'information pour répondre à toutes les problématiques nécessitant de faire de la veille technologique dans le but de réaliser des POC (*Proof of Concept*) technologiques répondant à des besoins réels des équipes métier. Ces POC deviennent ensuite des MVP (*Minimum Viable Product*) pour être déployés comme un projet « classique ».

Cette approche vise à démocratiser l'utilisation de l'IA Générative au sein de l'entreprise, en sensibilisant et formant les collaborateurs à ses potentiels et ses enjeux. L'objectif est de favoriser l'innovation, d'optimiser les processus et d'améliorer l'expérience des collaborateurs grâce à une adoption réfléchie et éthique de ces technologies de pointe.

À date, cette entité a créé plus de 5 prototypes dont 3 qui sont allés ou vont aller en production.

En première intention, PMU® a initié cette approche par répondre aux objectifs suivants :

1. **Optimiser le temps** : réduire les tâches chronophages pour tous nos collaborateurs, des développeurs aux commerciaux, en passant par les juristes et les RH. Notre but est de permettre à chacun de se concentrer sur des activités à forte valeur ajoutée. À titre d'exemple, certaines activités étaient mal adressées par le passé :
    a. Rédaction de tests (au sens : cas de tests et développement de cas de tests automatisés) ;
    b. Rétro documentation de spécifications fonctionnelles ;
    c. Amélioration du processus de développement (Merge, ...) ;
    d. Refactorisation de certains développements pour les rendre plus lisibles et maintenables.
2. **Améliorer l'accès à l'information** : créer une plateforme centralisée, alimentée par l'IA générative, pour faciliter la recherche et l'accès rapide aux informations pertinentes.
3. **Exploiter efficacement nos données** : utiliser les capacités d'analyse de l'IA générative pour mieux exploiter nos données d'entreprise et générer des *insights* plus pertinents.
4. **Améliorer la gestion documentaire** : organiser et maintenir notre base documentaire de manière plus efficace grâce à l'IA, facilitant ainsi les mises à jour et la maintenance. Nous avons entrepris un chantier majeur, par direction, pour recenser tous les documents d'entreprise utiles aux collaborateurs. Ce travail approfondi nous permet d'apporter une réelle valeur ajoutée en termes d'accès à l'information pour l'ensemble de nos collaborateurs, quelle que soit leur fonction.
5. **Acculturer à l'IA générative** : sensibiliser nos collaborateurs aux potentiels et aux enjeux de l'IA générative, encourageant son adoption responsable et éthique dans tous les départements.

La preuve par l'exemple a été une des clés de l'adoption. En se basant sur des problématiques métiers et en démontrant l'apport concret de solutions à base d'IA générative, cette démarche a permis de convaincre des personnes clés dans l'organisation. Grâce à ces personnes clés accompagnées individuellement, le sujet de l'IAGen est devenu le quotidien dans beaucoup d'équipes.

La communication hebdomadaire via le réseau social interne en diffusant des « Trucs et astuces » a également permis de garder un lien constant avec les collaborateurs sur les possibilités offertes.

À ce stade, plusieurs autres prototypes sont en cours, que l'aventure continue !

Anthony HYVERT, *Chief Technical Officer*, chez PMU®

6 L'INFORMATIQUE QUANTIQUE

Comme pour les intelligences artificielles, cette fiche sur l'informatique quantique n'est pas issue des réflexions du groupe de travail, mais elle est le fruit d'un travail de synthèse effectué a posteriori sur la base de précédents travaux menés au Cigref sur le sujet et notamment :

- *Quantum Computing* : comprendre l'informatique quantique pour se préparer à l'inattendu, publié le 13 février 2020.
- Rupture 1 « D'ici 2030, l'informatique quantique est opérationnelle et largement diffusée », dans le Rapport d'Orientation Stratégique 2023 du Cigref « 10 ruptures à l'horizon 2030-2040 ».

6.1 DÉFINITION ET ÉTAT DE L'ART

L'informatique quantique repose sur les principes de la mécanique quantique et exploite des concepts tels que la superposition et l'intrication des particules pour traiter l'information. Contrairement aux systèmes classiques qui utilisent des bits binaires, l'informatique quantique s'appuie sur des qubits, qui peuvent représenter plusieurs états simultanément. Le potentiel de cette technologie va au-delà de la loi de Moore, promettant un saut quantique dans les capacités de calcul et dans la résolution de problèmes complexes impossibles à résoudre pour l'informatique classique. Bien que toujours en phase de recherche et développement, avec des défis techniques à surmonter, des entreprises comme Google, IBM et Atos, ainsi que des startups, investissent massivement dans cette technologie.

6.2 CAS D'USAGES ET EXEMPLES

L'informatique quantique trouve des applications dans divers domaines :

- Chimie et pharmacie : simulation de molécules complexes pour accélérer la découverte de médicaments (ex. IBM simule l'hydrure de béryllium).
- Optimisation des flux : l'informatique quantique est explorée pour optimiser des itinéraires et des chaînes logistiques (ex. Volkswagen et D-Wave).
- Finance : amélioration des stratégies de *trading*, gestion des risques et optimisation de portefeuilles.
- Cybersécurité : la cryptographie quantique promet des communications plus sûres en exploitant des propriétés comme l'intrication.

6.3 IMPACTS SUR L'ARCHITECTURE DES ENTREPRISES

L'adoption de l'informatique quantique dans les entreprises modifiera les architectures informatiques, introduisant **des systèmes hybrides mêlant classique et quantique.** Des adaptations seront nécessaires pour intégrer les ordinateurs quantiques via le cloud et pour utiliser des algorithmes

quantiques spécifiques. Le passage au quantique exigera une refonte des compétences, impliquant de nouvelles méthodes de travail et des outils inédits, ainsi qu'une forte transformation des infrastructures actuelles.

6.4 IMPACTS EN MATIÈRE DE RÉSILIENCE

Les impacts en matière de résilience sont variés. D'un côté, l'informatique quantique peut **renforcer la capacité des entreprises à anticiper des scénarios complexes** en réduisant considérablement le temps de calcul. Par exemple, la capacité à traiter des ensembles de données massifs, en temps réel, pourrait rendre les systèmes plus adaptatifs et réactifs. D'un autre côté, la **sécurité des systèmes actuels** pourrait être mise en péril par la puissance de calcul des ordinateurs quantiques, notamment en ce qui concerne la cryptographie. Les entreprises devront anticiper et se préparer à cette vulnérabilité en adoptant des solutions post-quantiques.

6.5 RISQUES LIÉS À L'ADOPTION DE CES TECHNOLOGIES

L'adoption de l'informatique quantique comporte des risques non négligeables. Le **coût élevé de développement et la rareté des compétences** pourraient freiner les entreprises dans leur adoption. Il existe aussi **des risques en matière de cybersécurité** : les ordinateurs quantiques pourraient casser les cryptages actuels, exposant les entreprises à des cyberattaques inédites. L'intégration prématurée de cette technologie, sans compréhension claire des usages et des retours sur investissement, pourrait aussi conduire à des dépenses non maîtrisées. Enfin, **l'absence de standards technologiques** et la difficulté à prédire la trajectoire des innovations ajoutent une incertitude à long terme.

6.6 DISRUPTION POSSIBLE SUR LA CHAÎNE DE VALEURS

L'informatique quantique représente une véritable rupture pour les modèles économiques actuels. La capacité à résoudre des problèmes complexes en quelques secondes, là où les systèmes classiques mettraient des années, redéfinira des secteurs comme la logistique, l'aéronautique, et les services financiers. L'informatique quantique changera également la manière de concevoir et de délivrer des services numériques. Les premiers à maîtriser cette technologie disposeront d'un avantage concurrentiel significatif, tandis que les entreprises qui tarderont à s'adapter risquent de voir leur modèle d'affaires déstabilisé.

Au sein des DSI, il sera de plus en plus nécessaire de disposer de nouvelles compétences pour coder des algorithmes quantiques. Si aujourd'hui, seuls des mathématiciens savent produire des algorithmes quantiques, ce besoin en compétences se répercutera sur les formations informatiques qui devront davantage introduire les principes de l'informatique quantique dans leurs cursus.

6.7 ET DEMAIN ? QUEL POTENTIEL DE CROISSANCE À HORIZON 10 ANS ?

Le potentiel de croissance de l'informatique quantique d'ici dix ans est considérable. Les premières applications commerciales devraient apparaître dès 2030, avec des avancées majeures dans le domaine des simulateurs quantiques et de la cryptographie. La loi de Neven évoque une croissance « doublement exponentielle » des capacités des systèmes quantiques, ce qui pourrait mener à des sauts technologiques rapides. Cependant, la concrétisation de ce potentiel dépendra de la capacité à surmonter les défis techniques liés à la stabilité des qubits et à l'optimisation des algorithmes quantiques.

CONCLUSION

L'intégration des innovations technologiques dans les systèmes d'information présente à la fois des enjeux majeurs et des opportunités stratégiques pour les entreprises. Toutefois, leur impact dépasse largement le cadre organisationnel pour s'inscrire dans une transformation plus vaste de la société et de son économie. En effet, certaines de ces innovations, pour atteindre leur plein potentiel en entreprise, nécessitent une adoption à grande échelle par la société dans son ensemble. Les technologies comme l'intelligence artificielle et les technologies immersives ne peuvent véritablement prospérer que si elles sont adoptées par un large public, garantissant ainsi leur viabilité et leur évolutivité.

Il est essentiel d'analyser attentivement les dynamiques au sein de la chaîne de valeur et d'évaluer quels acteurs, qu'il s'agisse d'entreprises, de consommateurs ou d'organismes publics, sont concernés par ces nouvelles technologies. Une interrogation majeure demeure sur la capacité à identifier si ces innovations sont destinées à un marché de masse ou à des niches spécifiques. Cette distinction influencera non seulement les stratégies de commercialisation, mais également les modèles d'adoption et d'utilisation à long terme.

En somme, l'avenir des systèmes d'information sera façonné par l'interaction complexe entre technologie, entreprise et société. Il revient aux décideurs d'anticiper ces évolutions et de s'assurer que l'adoption de ces innovations technologiques soit alignée avec les besoins sociétaux et les réalités du marché. La réussite passera donc par une approche globale, intégrant à la fois les dimensions organisationnelles et sociétales des nouvelles technologies. Ainsi, les participants s'accordent sur l'exigence, pour les organisations, de se doter des moyens nécessaires pour explorer les futurs possibles et étudier leurs impacts.

Cigref
RÉUSSIR
LE NUMÉRIQUE

Le Cigref est un réseau de grandes entreprises et administrations publiques françaises qui a pour mission de développer la capacité de ses membres à intégrer et maîtriser le numérique. Par la qualité de sa réflexion et la représentativité de ses membres, il est un acteur fédérateur de la société numérique. Association loi 1901 créée en 1970, le Cigref n'exerce aucune activité lucrative.

Pour réussir sa mission, le Cigref s'appuie sur trois métiers, qui font sa singularité.

Appartenance
Le Cigref incarne une parole collective des grandes entreprises et administrations françaises autour du numérique. Ses membres partagent leurs expériences de l'utilisation des technologies au sein de groupes de travail afin de faire émerger les meilleures pratiques.

Intelligence
Le Cigref participe aux réflexions collectives sur les enjeux économiques et sociétaux des technologies de l'information. Fondé il y a près de 50 ans, étant l'une des plus anciennes associations numériques en France, il tire sa légitimité à la fois de son histoire et de sa maîtrise des sujets techniques, socle de compétences de savoir-faire, fondements du numérique.

Influence
Le Cigref fait connaître et respecter les intérêts légitimes de ses entreprises membres. Instance indépendante d'échange et de production entre praticiens et acteurs, Il est une référence reconnue par tout son écosystème.

www.cigref.fr
21 av. de Messine, 75008 Paris
+33 1 56 59 70 00
cigref@cigref.fr

Cigref
RÉUSSIR
LE NUMÉRIQUE