

# Introduction

**Par Francis JUTAND**

Conseil général de l'Économie

**Et Daniel KOFMAN**

Télécom Paris

Les évolutions technologiques rapides et disruptives provoquent des transformations structurelles des infrastructures numériques et ouvrent de multiples opportunités pour l'ensemble des secteurs d'activité, dont l'émergence de nouveaux paradigmes de services et d'applications.

Le développement d'une vision stratégique et la prise de décisions informées requièrent de comprendre à la fois les évolutions des technologies, celles des infrastructures matérielles et logicielles sous-jacentes, ainsi que les nouvelles architectures fonctionnelles et applicatives qu'elles suscitent.

Ces transformations doivent être envisagées de manière holistique avec celles de la sécurité et de la sûreté, de l'impact environnemental et de l'acceptabilité sociale. L'évolution induite sur la géographie des filières doit être analysée, en intégrant les bouleversements géoéconomiques et géopolitiques, notamment dans un objectif de plus en plus pressant de souveraineté.

Ces concepts ont fourni le fil conducteur pour la conception et la rédaction de ce numéro spécial, qui nous l'espérons apportera des éléments pour construire une vision d'ensemble du domaine, de ces enjeux et de ces challenges.

Ce numéro de la série *Enjeux numériques* des *Annales des Mines* est consacré aux infrastructures numériques du futur. Le choix du sujet est motivé, d'une part, par les transformations structurelles en cours du secteur rendues possibles par des évolutions technologiques de plus en plus rapides et disruptives et, d'autre part, par les multiples opportunités que ces évolutions ouvrent pour l'ensemble des secteurs d'activité, dont l'émergence de nouveaux paradigmes de services et d'applications, et la prise en compte de risques majeurs induits et les réponses pour les réduire.

Le développement d'une vision stratégique et la prise de décisions informées requièrent de comprendre à la fois les évolutions des technologies et des infrastructures matérielles et logicielles sous-jacentes, ainsi que les nouvelles architectures fonctionnelles et applicatives qu'elles suscitent. Ce, dans une période où les transformations du numérique doivent être envisagées de manière holistique avec celles de la sécurité et de la sûreté, de l'impact environnemental et de l'acceptabilité sociale. L'évolution induite sur la géographie des filières doit être analysée, en intégrant les bouleversements géoéconomiques et géopolitiques qui impactent fortement les acteurs, notamment dans un objectif de plus en plus pressant et urgent de souveraineté.

La métamorphose numérique a été enclenchée dans les années 1980 avec l'avènement des premiers réseaux numériques à intégration de services et la distribution du calcul rendue possible notamment par l'émergence des serveurs informatiques, des ordinateurs personnels et des réseaux dits locaux. Cela a été suivi par l'introduction de la mobilité et par le changement de paradigme apporté par le *cloud*, engendrant une explosion de nouveaux services, applications et usages. Depuis plus de 10 ans, la convergence entre les réseaux

et le *cloud* a commencé, sur la base de la généralisation des concepts de *softwarisation* et de virtualisation. En même temps, les données se sont érigées comme un vecteur majeur de création de valeur, ce qui se traduit, entre autres, par l'impact croissant et majeur de l'intelligence artificielle, notamment générative.

L'utilisation du numérique : communication, services, applications, intelligence, se traduit en continu dans les entreprises, par la numérisation de fonctions existantes de production, de mesure, de contrôle et de commande distants, et par la création de nouvelles fonctions et de nouvelles organisations. La place émergente mais fortement croissante de la réalité virtuelle, augmentée et mixte, ainsi que celle des jumeaux numériques, attestent de l'ampleur des changements en cours et à venir. Le numérique se situe aujourd'hui au cœur de l'évolution de tous les métiers, de tous les secteurs d'activité et de toutes les tailles d'entreprise.

Les infrastructures de communication, de service de données et d'intelligence se sont développées historiquement en strates avec l'apparition successive de nouveaux acteurs (du *cloud*, mais aussi de la cybersécurité, de l'édition, des applicatifs, etc.) et l'évolution des activités classiques des équipementiers et des opérateurs de Télécom. Les grands acteurs de chaque strate définissent leur offre, avec l'émergence dans les interstices et les niches de nouveaux acteurs, mais aussi explorent des mouvements de conquête sur les chaînes de valeur.

Cette sédimentation en couches se voit aujourd'hui ébranlée par les évolutions du *cloud* qui sort des grands centres de données pour se disséminer sur l'ensemble des infrastructures numériques, citons notamment les concepts de mobile (multi-access) *edge computing* et de *cloudRAN*. Par ailleurs, les architectures normalisées pour la 5G dites "stand alone" permettent l'ouverture du cœur de réseau, permettant à de multiples acteurs d'interagir avec le contrôle des réseaux et à terme d'y déposer leurs propres fonctionnalités.

Pour la première fois dans l'évolution des générations de réseaux mobiles, la 5G a été conçue de manière partiellement synergique avec divers secteurs verticaux, ce qui rend possible cette accélération de la pénétration du numérique au cœur des process des entreprises, notamment industrielles et de réseaux.

La 5G permet de créer de multiples réseaux logiques indépendants grâce à la notion de *slicing*, elle porte également la notion de réseaux 5G privés, permettant aux entreprises de déployer leurs propres réseaux 5G, des réseaux adaptés aux besoins notamment industriels, grâce à la faible latence proposée.

Les réseaux non-terrestres apportent des solutions aux problèmes de couverture, mais auront un impact qui va bien au-delà. Leur interopérabilité avec les réseaux terrestres et les transformations que cela induira chez les opérateurs historiques doivent être évaluées.

Tout ceci sera accéléré avec la 6G et l'avènement de nouvelles technologies, telles que les réseaux sans cellules (*cell-free*), les surfaces intelligentes reconfigurables (RIS) et l'utilisation de parties plus hautes du spectre des fréquences radio.

La collecte, la circulation, le stockage et le traitement, de plus en plus distribués, des données de toutes natures, synchrones ou asynchrones, structurées ou non structurés, demandent de nouveaux services de partage, d'échange ou de fédération, avec des fonctionnalités spécifiques de contrôle de l'accès, de l'utilisation et de traçabilité. Ils ouvrent tout l'éventail de la localisation des calculs ou computations, intégrant des solutions mixtes centralisées et localisées, dynamiquement organisées.

La *softwarisation* croissante des infrastructures, permet de remettre en cause les sédimentations existantes : communication, donnée et calcul, lesquelles peuvent maintenant s'interpénétrer et donner lieu à des systèmes dynamiques et auto-organisés sur des infrastructures plus facilement partageables. Il s'agit donc d'un potentiel *big bang* auquel

nous devons faire face, réseaux de communication à la demande, applications temps réel, calcul et intelligence répartis, mais aussi de partage d'infrastructures, d'orchestrations multisectorielles de nouveaux services, de création de solutions dynamiques, de relations complexes de financement entre l'investissement et l'usage.

Par ailleurs, la complexité des nouveaux systèmes explose et requiert de nouveaux paradigmes pour la planification, le déploiement, l'opération, la gestion et la maintenance de ces systèmes. L'intelligence artificielle va jouer ici aussi un rôle de plus en plus central.

Le potentiel d'évolution est à apprécier, d'une part, du fait de l'environnement intensif en capital pour les infrastructures et ouvert à la concurrence et aux coopérations et, d'autre part, d'un univers d'innovations technologiques et de services loin d'être stabilisé à l'horizon de moyen et long terme. Il faut par ailleurs prendre en compte les aspects géopolitique et géoéconomique de la lutte pour le contrôle et le partage intelligent de la valeur ajoutée, mais aussi des conflits d'investissements entre les grandes compagnies mondiales de services numériques et les opérateurs et équipementiers.

L'horizon temporel pour l'éclairage prospectif est bien sûr inégal tant les composantes évolutives opèrent à des échelles de temps variées. De nouvelles technologies, notamment de réseaux sémantiques, de calcul et réseaux quantiques peuvent venir modeler ces évolutions ou constituer un deuxième ressort d'évolution.

L'idée est donc dans ce numéro de construire une vision holistique présentant chacune des composantes technologiques, systémiques et applicatives, et leurs évolutions, interactions et interpénétrations. Cela est accompagné par une vision du positionnement des acteurs et de leurs évolutions, avec la mise en évidence d'opportunités majeures pour chacun et pour la société en général, et des risques induits, notamment pour la souveraineté nationale. Ainsi, l'état de l'art et les problématiques majeures qui se posent aujourd'hui sont décrits et, quand cela est possible, une projection de moyen/long terme est fournie, même si la complexité des évolutions et les transformations des acteurs en jeu, rend cet exercice périlleux, du fait de la complexification des facteurs et de leurs interactions, ainsi que de la multiplicité des scénarios futurs envisageables.

Nous avons donc fait appel à des acteurs de divers horizons (entreprises, académiques, bureaux d'études et experts, en cœur de métier mais également de divers acteurs de marchés verticaux) afin de couvrir le volet « éléments transversaux », le volet « technologies et architectures », le volet « impact sectoriel » et enfin le volet « technologies de ruptures » qui composent ce numéro spécial.

Le premier chapitre traite donc des grandes tendances ou éclairages transversaux :

- l'intégration numérique et sectorielle des systèmes de communication ;
- le *cloud* dans la chaîne de valeur industrielle du numérique ;
- les éléments de géopolitique et de régulation ;
- les données économiques de l'évolution des infrastructures ;
- des impacts écologiques ;
- la politique européenne.

Le second chapitre traite des technologies qui vont agir en levier et facteurs d'innovation :

- les promesses de la 6G ;
- les communications satellitaires ;
- la complexité et géométrie stochastique ;
- les systèmes cyber-physiques ;
- les apports de Gaia-X ;
- la virtualisation ;
- la *softwarisation* ;
- l'optique et les terminaux de réalité virtuelle et augmentée ;

- le *metavers* ;
- la cybersécurité ;
- les composants.

Le troisième chapitre traite d'impacts sectoriels :

- le secteur agricole à l'ère de la donnée ;
- le numérique et la distribution d'électricité ;
- les systèmes de transport intelligent coopératifs ;
- les infrastructures publiques de données ;
- le système de santé ;
- le commerce électronique.

Le quatrième chapitre traite de deux technologies de ruptures :

- l'intelligence artificielle ;
- les réseaux sémantiques.

Le choix de n'aborder dans ce numéro que le champ des infrastructures est forcément limitatif pour la perception des impacts majeurs des usages et des attendus éthiques du développement du numérique, même si les contributions sur les secteurs applicatifs pallient partiellement cette limitation, mais le sujet en lui-même est déjà suffisamment complexe.

Nous n'avons donc pas prévu une approche géopolitique globale du développement du secteur numérique, ni une analyse historique étendue qui permettrait de comprendre en profondeur les retards industriels européens d'aujourd'hui dans le domaine du *cloud*, des réseaux sociaux, des moteurs de recherche, des places de marché, de l'IA générative et de l'édition logicielle.

Il est donc nécessaire de construire des éléments de souveraineté dans ces domaines, notamment autour de quelques grands acteurs et des réseaux de PME et ETI très actives, et pour cela de garder globalement la main sur le secteur des télécoms, progresser dans le secteur du *cloud* et prendre le train en marche dans le domaine de l'intelligence numérique ou de l'IA et des IA génératives, pour accélérer par la suite grâce à un écosystème industriel comportant un réseau d'entreprises bien positionnées au niveau international sur divers secteurs d'activité.

Par ailleurs, l'environnement numérique et cognitif que tissent autour de l'humain les technologies numériques : services et applications, robotique, automates et drones, interfaces intelligentes, et les problèmes de confiance liés à leurs conceptions et au risque de leur manipulation géopolitique, mercantile ou hostile est seulement partiellement présenté et constitue également un sujet qui doit éclairer le développement des infrastructures et qui méritera des développements plus approfondis.