

Le rôle de l'IA dans l'évolution des infrastructures numériques du futur

Par Francis JUTAND
Conseil général de l'Économie

Et Daniel KOFMAN
Télécom Paris

Face à la forte croissance de la complexité et à la dynamique, même à des échelles de temps très courtes, des infrastructures du numérique, l'intelligence numérique va apporter des outils critiques pour leur modélisation, leur conception, leur planification, leur surveillance, leur analyse, et leur exploitation, avec la création dynamique et à la demande de nouveaux services et applications, et donc pour le pilotage global du fonctionnement de ces infrastructures. La disponibilité de tels outils représente un “*game changer*” dans l'évolution des infrastructures et des services qu'ils rendent possibles. En ce sens, ils représentent aussi un élément clé de la souveraineté et un vecteur pour favoriser un positionnement fort de la France dans le contexte extrêmement concurrentiel que nous vivons. L'IA jouera donc un rôle clef dans la réglementation, l'innovation et la concurrence dans les infrastructures numériques, desquelles dépend plus que jamais le potentiel de développement de l'économie et de la société des pays.

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (IA)

Le terme Intelligence artificielle (IA) a été introduit dans les années 1950 pour définir un nouveau champ scientifique d'exploration des possibilités de réalisation technologique des capacités de l'intelligence humaine. Aujourd'hui, suite à certains succès marquants, il recouvre dans les médias et le vocabulaire commun un champ très large du numérique et notamment les robots et les automatismes informatiques, la reconnaissance et l'extraction de la parole et de l'image, le traitement automatique des langues naturelles, la traduction automatique, la modélisation de systèmes par apprentissage, les interfaces homme machine (IHM), ainsi que toutes les fonctions de génération de contenu (textes, voix, musique, images, vidéos, programmes informatiques), et cela notamment en mode interactif, comme pour les *chatbots* fournissant des réponses à des questions concernant de vastes champs de connaissances.

Si on s'intéresse à la partie de l'IA, qui lui a valu à l'origine le nom d'intelligence, des progrès ont été très rapides après 2010 avec l'utilisation de réseaux neuronaux, des grands modèles de langage (LLM pour *Large Language Models*) et les *transformers*.

Que ce soit au sens large de l'IA mentionné plus haut, ou plus restreint des IA fonctionnelles ou génératives et les traitements de données qui lui sont nécessaires, les IA sollicitent déjà massivement les infrastructures numériques. Ce phénomène s'accélère avec leurs nouveaux usages, mais aussi avec une distribution de plus en plus importante de l'IA, qui sort des grands centres de données pour se disséminer sur l'ensemble des

infrastructures, terminaux et objets du numérique. De nouveaux paradigmes, tels que les IA fédératives, ouvrent de nouvelles opportunités et accélèrent ce phénomène de diffusion

Ses usages devraient, comme le reste du numérique, progresser fortement à l'horizon des 10 ans.

Mais l'IA va jouer également un rôle important dans le développement et le pilotage des infrastructures numériques elles-mêmes, pour en maîtriser la complexité croissante et favoriser le plein usage de leurs potentiels, comme nous le verrons plus loin.

L'intelligence numérique

Concentrons-nous sur l'intelligence numérique, terme proposé pour parler du cœur de l'IA modélisatrice, fonctionnelle ou générative. Elle constitue le troisième étage de la fusée numérique après les communications ubiquitaires et le *cloud* et l'Internet des objets qui conjointement permettent d'observer le monde physique, de collecter ses données, de les stocker et de les traiter, ainsi que d'agir à distance sur ce même monde physique. Cette boucle peut s'appliquer à diverses échelles, du contrôle de la température de la maison aux grands écosystèmes planétaires en passant par les systèmes de production. Le troisième étage utilise les grandes masses de données, stockées ou collectées en temps réel, en les transformant en information, connaissances, contenus et décisions, et s'appuie sur les grandes capacités offertes par les deux premiers étages. Par ailleurs, ces divers étages fusionnent progressivement avec les avancées technologiques et les changements de positionnement des acteurs ; ce phénomène est accéléré par l'intelligence numérique qui développe les potentiels et accroît les capacités de l'ensemble.

À ses débuts, deux branches de l'IA sont apparues. D'une part, une approche basée sur la logique formelle, visant à décrire et formaliser les mécanismes de la pensée, d'autre part, l'approche neuronale, visant d'une certaine manière à émuler le comportement du cerveau. C'est la première qui l'a emporté dans les premières phases, mais c'est la deuxième, avec les réseaux de neurones artificiels et l'apprentissage profond, qui a permis les succès récents.

Dans un premier temps, on n'a pas pu atteindre les objectifs escomptés avec les réseaux de neurones qui requièrent l'accès à de très grandes masses de données et une puissance de calcul qui ne sont devenus disponibles que dans la dernière décennie, notamment grâce au *cloud* et aux composants adaptés aux algorithmes sous-jacents. D'ailleurs, ces nouvelles approches de calcul, bien au-delà des processeurs graphiques (GPU¹), sont en train de transformer profondément l'écosystème des producteurs de composants électroniques.

Les données existent depuis que l'on mesure ou utilise des capteurs et elles se sont numérisées. Les mathématiques appliquées, statistiques et probabilités ont développé des outils d'extraction de connaissance et de modélisation à partir des données. Avec la prolifération des données et les systèmes de *big data* permettant de les stocker et les traiter, on est passé de la logique et des mathématiques appliquées au *machine learning* ou apprentissage automatique, puis au *deep learning* avec la maîtrise de l'apprentissage de réseaux de neurones géants.

L'Intelligence numérique s'est ainsi développée à la rencontre de deux mouvements : la modélisation phénoménologique de systèmes par des réseaux de neurones et l'abondance de données. Elle est venue compléter la construction de modèles d'artefacts par analyse et assemblage de modèles de composantes et le développement du traitement de données par des approches statistiques et probabilistes.

¹ Citons par exemple les produits de l'entreprise Cerebras.

Finalement, dans divers domaines, il a été mis en évidence l'avantage d'une hybridation entre des modèles dynamiques décrivant le comportement d'un système (par exemple, sur la base d'équations différentielles, potentiellement stochastiques, ou des modèles décrivant des processus interagissant entre eux) et les approches statistiques et les modèles résultant des réseaux de neurones, souvent perçus comme une boîte noire, malgré les efforts en cours pour leur interprétation.

Les IA génératives

Les IA génératives représentent une innovation critique majeure pour faire face à la complexité grandissante en volume et diversité des données et connaissances. Du point de vue ontologique, les IA génératives donnent la possibilité de compléter les outils de raisonnement sémantique et causal opérant dans le champ temporel d'entrée sorties, par des outils statistiques.

Les IA génératives et leur développement massif reposent non pas sur une forme de modélisation première du comportement d'un système, mais sur les données et connaissances et informations diverses sur le système que l'on peut assembler et exploiter statistiquement de façon aveugle. Elles disposent ainsi de capacités d'exploiter des données non structurées, de faire ressortir des propriétés latentes, et de modéliser les réponses à des contextes et des questions posées par les opérateurs ou dispositifs automatiques de commande et de contrôle. Bien sûr la puissance de leurs usages réside dans le filtre des propriétés statistiques, mais il faut faire face en retour à des problèmes d'erreurs pour des réponses à des requêtes qui échapperaient au filet statistique et à sa modélisation par le *deep learning*.

On peut ainsi produire de nouveaux contenus, sur la base de contenus existants. À titre d'exemple, citons les systèmes de *generative design*, qui permettent de générer à partir de spécifications, une multitude d'objets y répondant. Rappelons par exemple que déjà en 2019 cette approche était utilisée en France pour concevoir des cadres de vélos. Plus récemment, les LLM capables de générer du texte, ont permis l'essor de solutions telles que ChatGPT, et les annonces d'IA capables de produire des images, de la musique, des vidéos et même des jeux vidéo fleurissent tous les jours.

Des outils pour aborder la complexité croissante des infrastructures numériques

Les infrastructures numériques sont en pleine évolution, comme cela est décrit dans diverses parties de ce document. La *softwarisation* des réseaux a permis une très grande flexibilité pour l'intégration de nouvelles fonctionnalités et pour la création dynamique, à la demande, non seulement de nouveaux services, mais également de réseaux grâce à la virtualisation qu'elle facilite amplement. L'orchestration efficace et efficiente de multiples fonctions, de multiples acteurs, dans le cadre des architectures convergentes réseau-*cloud*, pour la mise en œuvre dynamique de nouveaux services et applications, se traduit par une complexité accrue de la conception, de la planification, de l'exploitation et de la maintenance de ces systèmes, et l'IA peut apporter ici une contribution majeure. De même, l'intégration dans les infrastructures de nouveaux paradigmes et technologies, notamment radio, par exemple pour la mise en place des réseaux sans cellules (*cell-free*) ou de surfaces reconfigurables intelligentes pour une optimisation de l'usage du spectre, impose de nouvelles approches de conception et opération, hybrides entre modélisation mathématique et intelligence artificielle.

Sur ce potentiel de réalisation à la diversité colossale, il est nécessaire de construire des outils, des représentations, et de nouvelles modalités de conception et de contrôle pour faire face à la complexité grandissante.

Et tout cela dans un environnement contraint par la physique des communications, la sûreté de fonctionnement liée à la criticité des usages des infrastructures, ainsi que par des menaces de cybersécurité dont le champ potentiel croît avec la numérisation, mais aussi en prenant en compte la minimisation de l'impact environnemental.

Toujours face à une complexité qui croît exponentiellement, ces outils doivent être introduits dans un cadre qui facilite l'appréhension du contexte dans lequel se déroulent les événements à contrôler et qui simplifie les interactions homme-système. On voit ici l'intérêt des jumeaux numériques, comme cas d'usage particulier des concepts introduits dans notre autre article au début de la première partie de ce numéro. L'ensemble des choix à chaque instant étant impossible à évaluer par les méthodes actuelles, ces jumeaux numériques apportent la possibilité de simuler à large échelle l'impact de choix d'architecture ou des choix de configuration. L'IA joue un rôle clé dans l'orientation de ces simulations, afin de se focaliser sur des cas qui fournissent *a priori* le plus grand bénéfice potentiel. Ces jumeaux numériques utiliseront aussi d'autres types de modélisation, comme la modélisation stochastique et notamment la géométrie aléatoire, telles que présentées dans l'article de François Baccelli intitulé « Maîtrise de la complexité dans la 6G - L'approche par la géométrie stochastique » dans ce même numéro. L'hybridation mentionnée plus haut entre divers types de modélisation est ici essentielle et l'IA générative se présente comme un outil clé pour les interactions entre les opérateurs humains et ces jumeaux numériques.

LES USAGES DE L'INTELLIGENCE NUMÉRIQUE POUR LES INFRASTRUCTURES

On peut donc envisager, sous réserve d'une politique de qualification et de test approfondie et de modalités rodées d'interfaçages avec d'autres outils, la délégation aux IA d'opérations de conception, de planification, de surveillance, d'analyse, d'opération avec création dynamique de nouveaux services, et donc de pilotage global du fonctionnement des infrastructures numériques.

Il est évident qu'étant donné les standards de qualité hérités du monde des télécommunications, les "five nine"², et l'impact des pannes sur le fonctionnement des systèmes numériques critiques, récemment illustré, et des actions malveillantes comme les attaques de cybersécurité, la conception, le test et la mise en œuvre d'outils d'IA numériques vont être exploratoires, progressifs et donneront lieu à des politiques de sûreté et de résilience spécifiques, dont la validation reste aujourd'hui un problème largement ouvert.

Pour persévérer dans ce sens, il faut comprendre et apprécier les besoins pour des évaluations rapides de demandes de solutions utilisant l'adaptativité des infrastructures et leurs mises en œuvre opérationnelle, pour utiliser pleinement le potentiel d'ouverture des infrastructures (voir notamment la première partie de l'article), et proposer des réponses *ad hoc* de création de réseaux ou services dédiés, mobilisant des ressources tout en préservant des contraintes d'ensemble de réalisation et de sûreté de service.

Le potentiel des IA génératives peut être utilisé pour la création automatique de solutions et de services, ainsi que pour leur contractualisation : caractéristiques, performances, règles d'usage, tarification, engagements, pénalités, déni de service, résilience.

L'utilisation de l'intelligence numérique peut concerner la création dynamique de réseaux virtuels (potentiellement privés) et la mobilisation de ressources physiques de communication (notamment partagées), de stockage et de calcul, mais aussi les structures logiques de services, et les décisions d'intelligence des infrastructures pour implémenter par exemple

² Taux de disponibilité de 99,999 %.

des solutions de routage sémantique, orientés objectifs (voir l'article de Laurent Clavier et Marios Kountouris dans ce même numéro) et assurer la méta-résilience d'ensemble.

Plus prêt dans le temps, l'intelligence numérique jouera un rôle bien plus important qu'aujourd'hui dans la gestion d'automates pour les relations clients, la réalisation de transactions ou l'assistance personnelle. Mais aussi pour les terminaux eux-mêmes en les dotant de capacités d'interaction intelligente avec le pilotage des infrastructures physiques, de service ou d'intelligence.

LES PROBLÉMATIQUES D'USAGE DE L'INTELLIGENCE NUMÉRIQUE

Cependant, l'usage de ces technologies n'est pas sans poser de problèmes qu'il faut intégrer rapidement et précocement dans les attendus et les méthodes de développement. Ces problèmes sont de trois natures : la confiance, l'impact écologique et la souveraineté.

La confiance dans les usages

Le sujet de la confiance se pose de plusieurs façons : la confiance opérationnelle, la traçabilité et la perte de compétences.

Le sujet de la confiance opérationnelle a déjà été abordé plus haut et sera bien sûr au cœur des préoccupations dans le développement et la mise en œuvre de solutions d'intelligence numérique. Cet aspect est accentué par la multiplicité d'acteurs pouvant fournir simultanément des composants de solutions ou de solutions partielles à base d'IA et devant être orchestrés (voir la première partie de l'article).

La confiance de traçabilité concerne, d'une part, le fait que la modélisation par réseau de neurones n'offre pas de propriétés simples d'explicabilité et, d'autre part, vu l'impact majeur des jeux de données ayant servi à l'apprentissage sur les solutions proposées, les garanties pouvant être fournies sur les critères de choix de ces données et, plus amplement, sur les données effectivement utilisées, lesquelles ne peuvent souvent pas être fournies du fait de règles de confidentialité. Cet élément de la confiance se pose fortement dans un cadre d'insuffisance de solutions souveraines.

La confiance se construit en particulier par la capacité à valider les résultats de l'usage de l'IA. Dans ce cadre, des compétences avancées sont nécessaires, à la fois sur les systèmes traités (e.g. une installation industrielle) et sur les technologies d'IA utilisées. L'efficacité de l'IA peut, paradoxalement, engendrer une perte de compétences rendant impossible cette capacité de validation des usages de l'IA. Cette efficacité peut en effet amener progressivement à une perte de compréhension des systèmes, perte d'intérêt dans cette compréhension et une raréfaction des compétences en IA, par exemple, de statistiques et probabilités nécessaires pour pallier les problèmes et faire évoluer les modèles.

L'impact écologique de l'usage de l'intelligence numérique

L'impact écologique est à apprécier d'une part dans le cadre du développement des infrastructures numériques et de leurs usages et d'autre part dans les spécificités liées à l'usage de l'intelligence numérique.

Cet impact s'exprime en termes d'énergie consommée dans le fonctionnement des infrastructures numériques, leur fabrication et leur cycle de vie, ainsi que leur consommation d'eau et de ressources rares, entre autres. L'utilisation de l'IA du point de vue de la fabrication et de l'usage de ressources rares ne présente pas de spécificité qualitative par rapport au numérique en général. Par contre, l'IA est un outil important pour la

conception de solutions au problème mentionné, notamment dans sa contribution à la conception de nouveaux matériaux.

C'est du point de vue quantitatif, notamment avec l'avènement des IA génératives et leur usage, que se situe le problème de frugalité. Les propositions des GAFAM de développer les IA génératives sur des modèles géants de large usage ont un impact déraisonnable en termes de consommation d'énergie si on les utilise pour des applications spécifiques. Si l'on parle d'IA pour les réseaux, il n'est pas nécessaire de savoir traduire ou répondre à des questions de culture générale dans toutes les langues pour travailler à leur optimisation. Le développement d'IA spécialisées est la solution pour développer des usages frugaux dont les apports en économie d'énergie peuvent venir rendre du point de vue écologique, positif ou acceptable, l'utilisation de solutions d'intelligence numérique.

En matière écologique, si l'on se penche avec raison sur la consommation directe d'énergie apportée par le numérique en général et l'intelligence numérique en particulier, il faut aussi prendre en compte les usages par les entreprises pour la conception de produits et services qui apportent des gains en optimisation de consommation de matières ou d'énergie, ou l'utilisation de l'IA pour optimiser le fonctionnement de réseaux de toute nature ou de bâtiments : des gains significatifs et massifs mais aujourd'hui rarement mesurés et difficilement comptabilisables, tant ils sont dispersés.

La souveraineté des infrastructures

Le dernier point à aborder est celui de la souveraineté. Celle-ci est déjà plus que compromise au niveau européen en matière d'infrastructures de réseaux et de *cloud*, ce d'autant que les contraintes visant certains fournisseurs de technologies constituent une arme à double tranchant : en diminuant la concurrence elles peuvent ralentir l'innovation. La *softwarisation* des réseaux qui se poursuit ne fait que renforcer les problèmes de souveraineté en changeant la structure du marché (voir notre article intitulé « Des services réseaux aux plateformes du numérique et aux services multisectoriels » dans ce même numéro). Il en résulte dans ces domaines le besoin impérieux de renforcer les acteurs européens existants, favoriser l'émergence de nouveaux et agir pour la mise en place d'une puissance collective. Dans le domaine de l'IA et spécifiquement des IA génératives, il est donc vital de développer un écosystème européen d'offre et de demande souverain, sauf à perdre le contrôle des solutions de pilotage des infrastructures et à subir des failles de cybersécurité et d'intelligence dont l'impact socio-économique est incommensurable.

EN CONCLUSION :

L'INTELLIGENCE NUMÉRIQUE EST CLEF POUR LES INFRASTRUCTURES NUMÉRIQUES DU FUTUR

Du trafic et des fonctions nouvelles, les infrastructures numériques pour l'IA

L'IA et ses usages existent au travers des infrastructures numériques et imposent à celles-ci de nouvelles contraintes, certes en termes de capacité, mais aussi en termes d'urbanisation et de nouvelles propriétés fonctionnelles et non fonctionnelles. Tout d'abord le développement des IA élargit le champ des usages et accentue les besoins de capacité pour les échanges de données et de traitements massifs pour l'apprentissage et l'inférence. Mais les nouveaux usages demandent une diffusion accrue des capacités de calcul et d'intelligence, une nouvelle urbanisation des infrastructures numériques (voir la première partie de l'article) et apportent de nouvelles contraintes, notamment pour le contrôle de systèmes tels que ceux du transport ou des usines de demain, par exemple en termes de sécurité et de latence.

Leurs spécificités et les besoins de confiance dans leurs usages vont demander aux infrastructures la mise en place de nouvelles fonctions de traçabilité et d'audit pour les services développés à base d'intelligence numérique.

Des outils de rupture, l'IA pour la maîtrise de la complexité des infrastructures

Concernant le sujet du pilotage des infrastructures numériques du futur, l'intelligence numérique va apporter des outils critiques pour la planification, la surveillance, l'analyse, l'opération avec création dynamique de nouveaux services, et donc le pilotage global du fonctionnement de ces infrastructures. La disponibilité de tels outils représente un "*game changer*" dans l'évolution de long terme des infrastructures et des services qu'elles autorisent. En ce sens, ils représentent aussi un élément clé de la souveraineté et un vecteur pour favoriser un positionnement fort de la France dans le contexte extrêmement concurrentiel que nous vivons. L'IA jouera donc un rôle clef dans la réglementation, l'innovation et la concurrence dans les infrastructures numériques, desquelles dépend plus que jamais le potentiel de développement de l'économie et de la société des pays.