

# Impacts de *l'intelligence artificielle* : risques et opportunités pour *l'environnement*

RAPPORTEUR.ES  
Fabienne Tatot et Gilles Vermot Desroches

2024-014  
NOR : CESL1100014X  
Mardi 24 septembre 2024 2024

JOURNAL OFFICIEL  
DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Mandature 2021-2026  
Séance du 24 septembre 2024

---

## **Impacts de l'intelligence artificielle : *risques* et *opportunités* pour l'environnement**

Avis du Conseil économique, social  
et environnemental sur proposition  
de la commission Environnement

---

Rapporteur.es :  
Fabienne Tatot  
Gilles Vermot Desroches

Question dont le Conseil économique, social et environnemental a été saisi par décision de son bureau en date du 6 février 2024 – en application de l'article 3 de l'ordonnance n° 58-1360 du 29 décembre 1958 modifiée portant loi organique relative au Conseil économique, social et environnemental. Le bureau a confié à la commission Environnement, la préparation d'un avis *Impacts de l'intelligence artificielle : risques et opportunités pour l'environnement*. La commission Environnement présidée par M. Sylvain Boucherand, a désigné Mme Fabienne Tatot comme rapporteure et M. Gilles Vermot Desroches comme rapporteur.

# sommaire

## AVIS

<b>Synthèse</b>	<b>4</b>
<b>Introduction</b>	<b>8</b>
<b>PARTIE 01 - L'IA PEUT BÉNÉFICIER DIRECTEMENT ET INDIRECTEMENT À L'ENVIRONNEMENT</b>	<b>12</b>
A. Bénéfices directs et indirects de l'IA pour l'environnement	12
B. Exemples de cas d'usage sectoriels par les entreprises privées et les pouvoirs publics	14
<b>PARTIE 02 - MAIS L'IA AGGRAVE L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DU NUMÉRIQUE : CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ, DE MÉTAUX RARES, D'EAU ET ARTIFICIALISATION DES SOLS ET DES FONDS MARINS</b>	<b>19</b>
<b>PARTIE 03 - LE BILAN ENVIRONNEMENTAL DE L'IA, AUJOURD'HUI INCERTAIN ET MAL DOCUMENTÉ, POURRAIT ÊTRE AGGRAVÉ PAR LES RISQUES D'EFFETS REBONDS ET DE DÉSINFORMATION</b>	<b>25</b>
<b>PARTIE 04 - UN ENSEMBLE DE LEVIERS SONT MOBILISABLES POUR AMÉLIORER LE BILAN DES SYSTÈMES D'IA DANS L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DU NUMÉRIQUE</b>	<b>29</b>
A. Inscrire ce sujet environnemental à l'agenda international	29
B. En matière de recherche et d'innovation sur les IA, concentrer les efforts sur les IA à finalité directement environnementale (« IA for green ») et sur les IA frugales (« Green IA »)	30
❶ La formation initiale et continue	30
❷ Les financements	31

C. Collecter les données liées à l'environnement et les mettre à disposition des acteurs tout en évitant les usages non souhaitables des données	33
D. Sur base de ces données, évaluer l'empreinte environnementale des usages, de la fabrication à l'utilisation	34
E. Sur la base de ces évaluations, choisir les systèmes d'IA et les usages les plus sobres	36
❶ Les pouvoirs publics et les entreprises pourraient poser le principe de progrès incrémentaux vers la neutralité environnementale globale des systèmes d'IA.	36
❷ L'atteinte de cette neutralité environnementale globale peut passer par différents types de mesures, inspirées de la séquence « éviter, réduire, compenser »	36
❸ En particulier, à court terme, une série de mesures sont applicables aux centres de données : objectif de zéro artificialisation nette ; efficacité énergétique et utilisation d'une électricité le plus possible décarbonée ; récupération de la chaleur fatale.	39
<b>Déclarations des groupes</b>	<b>42</b>
<b>Scrutin</b>	<b>46</b>
<b>Annexes</b>	<b>48</b>

# synthèse

**L'IA décuple les risques mais aussi les opportunités du numérique pour l'environnement.** Dans le large domaine du numérique, l'intelligence artificielle (IA) occupe une place spécifique, particulièrement l'IA dite « *générative* », capable de générer de nouveaux contenus (textes, audios, photos, vidéos, etc.) à partir de données.

En termes d'opportunités, **l'IA peut directement contribuer à réduire l'empreinte environnementale par des systèmes créés spécifiquement pour leur utilité écologique.** Par exemple, l'IA contribue à la mesure et à la gestion de la qualité de l'air, en prévoyant plusieurs heures à l'avance la concentration de particules fines à tel ou tel endroit et en conseillant d'adapter en conséquence les déplacements. **L'IA peut aussi indirectement contribuer à réduire l'empreinte environnementale par une amélioration de l'efficacité énergétique de l'ensemble des activités.** Cette optimisation de l'usage des ressources prend des formes multiples dans de nombreux secteurs : pilotage des flux de circulation routière, chauffage des bâtiments, gestion des déchets, etc.

Mais, d'un autre côté, la **consommation d'électricité, de métaux rares, d'eau et d'espaces artificialisés** imputable aux IA est en nette croissance, même si elle reste marginale par rapport à la consommation totale. L'IA aggrave donc l'empreinte environnementale du numérique, à la fois dans ses trois briques matérielles (les terminaux, les réseaux, les centres de données) et dans toutes les étapes du cycle de vie (fabrication, distribution, utilisation et fin de vie).

Par exemple, en 2023, la direction d'Alphabet, la maison-mère de Google, estimait qu'un « *prompt* » fait à une IA générative demandait l'équivalent de dix fois l'énergie consommée par une simple recherche sur Google. Une étude récente établit que les systèmes d'IA pourraient consommer en 2027 entre 4,2 et 6,6 milliards de mètres cubes d'eau, soit une consommation légèrement supérieure à celle du Danemark et équivalente à la moitié de celle du Royaume-Uni.

Dans ce contexte, le CESE formule neuf préconisations.

La France doit d'abord porter au niveau international le sujet du bilan environnemental des systèmes d'IA (*préconisation n°1*) dès lors qu'il s'agit d'une technologie dont les acteurs, les financements et les infrastructures sont globaux. Sur le plan national, les acteurs de la formation initiale et continue doivent veiller à intégrer dans les programmes de formation les exigences d'écoconception et d'usage frugal pour les développements et algorithmes d'IA (*préconisation n°2*). En matière de recherche et d'innovation, il convient de concentrer les financements publics sur les IA à finalité directement environnementale et sur les IA frugales, car les acteurs économiques ont déjà intérêt à financer le développement des IA à finalité d'optimisation des ressources (*préconisation n°3*).

Afin de garantir la fiabilité et rendre possibles la collecte et la mutualisation des données utilisées par les IA, il faut viser l'interopérabilité des systèmes mis en place par les opérateurs, dans le respect de la réglementation sur les données (*préconisation n°4*).

Sur la base de ces données, une évaluation systématique de l'empreinte environnementale des IA devra être réalisée, en exigeant des entreprises concernées la transparence sur la consommation des ressources et en construisant un référentiel d'évaluation. Un tel « *Ecoscore* » des IA permettra aux utilisateurs, citoyens et entreprises, de choisir les IA les plus sobres (*préconisation n°5*). Dans le même temps, les ingénieurs devront davantage s'engager dans une démarche d'écoconception des équipements, notamment les terminaux, dont le renouvellement est accéléré par l'IA (*préconisation n°6*), les usages pourront être responsabilisés par des campagnes d'information sur l'empreinte environnementale des IA et par la possibilité, actuellement inexistante, de déconnecter sur leurs applications les usages d'IA et la collecte de données (*préconisation n°7*).

Enfin, des mesures sont immédiatement applicables aux centres de données. Pour les projets d'implantation de ces *data centers*, les pouvoirs publics devront veiller à faire respecter l'objectif de zéro artificialisation nette, notamment par l'utilisation de sites déjà artificialisés (*préconisation n°8*), le système européen de notation de durabilité de ces centres devra être pris en compte et le principe de récupération de la chaleur fatale devra être intégré (*préconisation n°9*).

### PRÉCONISATION #1

Le CESE préconise que la France porte au niveau international le sujet du bilan environnemental des systèmes d'IA, notamment en proposant d'étudier les impacts de l'IA sur la réalisation des objectifs onusiens de développement durable (ODD) et en proposant la mise en place d'un événement de grande envergure, sur le modèle de la COP 21, pour mettre en avant des initiatives exemplaires et à fort impact.

### PRÉCONISATION #2

Les acteurs de la formation initiale et continue, tels que la commission des titres d'ingénieur, devront veiller à intégrer dans les programmes de formation les exigences d'écoconception et d'usage frugal pour les développements et algorithmes d'IA.

### PRÉCONISATION #3

En matière de recherche et d'innovation sur les IA, concentrer les financements publics sur les projets de développement d'IA « frugales » (« *Green IA* ») et sur les IA à finalité directement environnementale (« *IA for green* »).

### PRÉCONISATION #4

Afin de garantir la fiabilité et rendre possibles la collecte et la mutualisation des données utilisées par les IA, il faut viser l'interopérabilité des systèmes mis en place par les opérateurs, dans le respect de la réglementation sur les données.

### PRÉCONISATION #5

Évaluer l'empreinte environnementale des IA, de la fabrication à l'utilisation, en exigeant des entreprises concernées la transparence sur la consommation des ressources et en construisant un référentiel d'évaluation environnementale garantissant sa légitimité scientifique, politique et démocratique. Cette évaluation permettra aux utilisateurs, citoyens et entreprises, de choisir les IA les plus sobres.

### PRÉCONISATION #6

Intégrer systématiquement la démarche d'écoconception des équipements, notamment les terminaux, dont le renouvellement est accéléré par l'IA, en s'appuyant sur les normes et recommandations existantes.

### **PRÉCONISATION #7**

Responsabiliser les usagers par des campagnes d'information générales et spécifiques sur l'empreinte environnementale des IA et leur garantir la possibilité de déconnecter sur leurs applications les usages d'IA et la collecte de données.

### **PRÉCONISATION #8**

Pour les projets d'implantation de centres de données, les pouvoirs publics devront veiller à faire respecter l'objectif de zéro artificialisation nette, notamment par l'utilisation de sites déjà artificialisés.

### **PRÉCONISATION #9**

Dès l'origine des projets d'implantation de centres de données (data centers), l'usage du système européen de notation de durabilité de ces centres et le principe de récupération de la chaleur fatale devront être intégrés.



# introduction

**L'intelligence artificielle (IA) peut-elle encore devenir un atout pour les transitions environnementales ?** La question se pose depuis que la mise à disposition gratuite au grand public par la société californienne OpenAI de son robot conversationnel (*chatbot*) ChatGPT a fait prendre conscience aux citoyens, aux médias et aux décideurs que la démocratisation de l'IA générative en langage naturel allait devenir une réalité incontournable. Comme toutes les technologies numériques, leur base matérielle (centres de données, composants informatiques, objets connectés, consommation d'énergie, etc.) est d'abord passée inaperçue. De prime abord, l'éloge des systèmes d'IA (SIA), vus comme capables d'optimiser la consommation de ressources (les produits et les services issus des activités humaines devenaient « *smart* », intelligentes<sup>1</sup>) négligeait leur empreinte environnementale. Ainsi, lors de la COP28, l'IA avait été regardée comme instrument de lutte contre le changement climatique : le « *grand défi de l'innovation en matière d'IA* » visait à identifier et soutenir des solutions alimentées par l'IA dans les pays en développement.

Toutefois, très vite, le constat inverse a paru s'imposer : même si les SIA peuvent accélérer les transitions environnementales, ils sont fortement consommateurs de ressources en raison des nombreuses applications appelées à s'accroître, notamment dans le champ des loisirs. « *Il est tout à fait juste de dire que l'IA va avoir besoin de beaucoup plus d'énergie* », a admis Sam Altman,

---

<sup>1</sup> Smart buildings, smart cities, smart grids, etc. jusqu'à l'IA elle-même : smart IA.

fondateur d'OpenAI, lors du sommet de Davos le 16 janvier 2024. « *Le besoin de calcul informatique pour l'IA a été multiplié par un million en six ans et il décuple chaque année* », a souligné en mai 2024 le patron de Google, Sundar Pichai. Certes, actuellement, l'impact environnemental de l'IA reste relativement faible. Pour ne prendre que l'indicateur de consommation d'énergie mondiale, la consommation électrique liée à l'IA représenterait moins de 0,03 % de la consommation totale d'énergie<sup>2</sup>. Mais qu'en sera-t-il à l'avenir ? Si Google assure que pour la « *même quantité d'électricité, nous produisons trois fois plus de calcul informatique qu'il y a cinq ans* », cette efficacité n'a pas empêché la consommation électrique de Google de doubler entre 2018 et 2022. Illustration de l'effet rebond, les besoins en calcul augmentent plus vite que les gains d'efficacité dès lors que l'IA générative est désormais « embarquée » dans les réseaux sociaux, les moteurs de recherche, la bureautique, etc., notamment pour la génération d'images et de vidéos. De fait, les géants américains de l'IA, Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft<sup>3</sup>, sans parler de leurs concurrents chinois (Ant Group, Baidu et Tencent), ou français (MistralAI) ont cessé de communiquer des données précises sur la consommation d'énergie et de ressources naturelles de leurs centres de données (*data centers*) depuis que les usages des IA génératives ont explosé<sup>4</sup>. Or nous savons, selon les rares études disponibles, qu'une requête

sur un assistant comme ChatGPT consomme dix fois plus d'électricité qu'une recherche classique sur Google<sup>5</sup> et qu'une discussion avec ce même assistant consomme l'équivalent d'une bouteille d'eau. Le seul entraînement de GPT-3.5 aurait coûté l'équivalent carbone de 136 allers-retours Paris - New-York : il est vrai que cela ne représente jamais que 1 % du trafic aérien annuel entre Londres/Paris et New-York-Londres<sup>6</sup>, mais la tendance n'en demeure pas moins inquiétante.

Dans ces conditions, les bénéfices environnementaux de l'IA pourront-ils compenser son impact sur l'empreinte environnementale du numérique ? À l'heure actuelle, personne ne peut le dire mais force est de constater que l'IA est surtout mise au service de domaines tels que la finance, le marketing ciblé et désormais l'industrie, et non pour entraîner et faire fonctionner des algorithmes d'optimisation bénéfiques à l'environnement. Et l'histoire d'Internet suggère que la plus grande partie des ressources utilisées par les SIA le seront pour générer des contenus de faible utilité sociale, voire pouvant renforcer des rapports sociaux inégaux (ex : la pornographie). Cet aspect, difficile à mesurer à l'heure actuelle, pourra faire l'objet d'autres travaux du CESE.

**Quoi qu'il en soit, en termes d'opportunités et de menaces pour l'environnement, l'IA représente une vraie rupture d'impact et d'usage par rapport au domaine plus large du numérique.**

<sup>2</sup> Selon l'Agence internationale de l'énergie, la consommation totale d'énergie dans le monde est actuellement d'environ 170 000 terawatt-heure (TWh) et l'IA consommerait 4,5 gigawatts-heure (GWh) selon l'étude de Schneider Electric *The AI Disruption: Challenges and Guidance for Data Center Design* (2023).

<sup>3</sup> Microsoft ayant été le premier à lancer la course aux investissements dans l'IA avec l'achat en décembre 2023 de 49 % d'OpenAI, l'éditeur de ChatGPT.

<sup>4</sup> Plus de 100 millions d'utilisateurs actifs de ChatGPT toutes les semaines.

<sup>5</sup> Selon l'Agence internationale de l'énergie.

<sup>6</sup> Selon une étude du MIT.

Alors que le numérique recouvre l'ensemble des technologies de l'informatique et de l'internet, l'IA désigne les algorithmes basés sur l'apprentissage machine qui permettent le développement de logiciels effectuant des tâches s'exécutant automatiquement sur différents types de données, comme simuler des systèmes virtuels et optimiser des réponses (données tabulaires), prédire des phénomènes (historiques de données), analyser des images (photos) ou encore extraire des informations de documents (texte), proposer des traductions multilingues y compris en braille ou en langue des signes. Dans sa branche la plus avancée, l'IA dite « générative » est désormais en mesure de générer de nouveaux contenus à partir d'énormes quantités de données.

En ce sens, l'IA n'est pas seulement une technologie capable de traiter de gigantesques bases de données. Elle ne se réduit pas à une analyse statistique particulièrement performante. Elle apparaît comme disruptive par rapport aux autres technologies numériques.

Pour le dire abruptement, entre une IA générative et, par exemple, un tableur Excel, la différence de degré est telle qu'elle s'apparente à une différence de nature, tant en termes de consommation de ressources que d'opportunités et d'usages. La plupart des IA actuelles (antifraude, marketing, maintenance) utilisent des modèles simples nécessitant des ressources proches d'autres usages numériques. Mais l'IA générative marque une rupture. Elle est une « IA à part » qui « se distingue par sa capacité à générer du contenu : texte, image, vidéo... »<sup>7</sup>.

La présente étude intervient alors que le règlement européen relatif à l'IA (« AI Act »)<sup>8</sup> n'a pas pour objet de traiter les enjeux environnementaux de la question. Ce règlement se concentre sur d'autres sujets : limitation de l'utilisation des systèmes d'identification biométrique par les services répressifs ; interdiction d'utiliser la notation sociale et l'IA pour manipuler les utilisateurs ou exploiter leurs vulnérabilités ; obligations d'explicabilité et de transparence des modèles et algorithmes dont l'utilisation peut présenter un danger pour la société, etc.

7 « Démystifier l'IA générative : le vrai, le faux et l'incertain », article de Laure Soulier, maîtresse de conférences à Sorbonne Université au sein de l'équipe « Machine Learning and Information Access », paru dans la revue « Polytechnique Insights ».

8 Règlement adopté le 13 mars 2024 par le Parlement de l'Union européenne et formellement ratifié par le Conseil de l'Union européenne le 21 mai 2024.

Ce constat doit cependant être nuancé dans la mesure où, après des négociations en trilogue, le règlement inclut des dispositions visant à garantir une protection élevée des droits fondamentaux inscrits dans la Charte de l'Union européenne, parmi lesquels figure la protection de l'environnement<sup>9</sup>.

C'est sur le plan national que la plupart des actions ont été engagées sur le sujet de l'IA et de l'environnement. À titre d'exemple, le numérique et l'IA constituent l'un des six chantiers de la planification écologique, avec le financement, la différenciation territoriale, les emplois et compétences, les services publics exemplaires, la transition juste avec ses mesures d'accompagnement, la sobriété. De même, une stratégie nationale pour l'intelligence artificielle (SNIA) a été initiée en mars 2018, dont une phase dite d'« accélération » dotée d'un budget d'1,5 Md€ est en cours pour la période 2022-2025. Plus généralement, les parties prenantes, qu'il s'agisse de fédérations d'entreprises dans différents secteurs, de syndicats de salariés, d'associations de protection de l'environnement, etc., définissent des principes et mettent en œuvre des cas d'usage.

**La présente étude est centrée sur l'impact environnemental, positif et négatif, des usages de l'IA et plus particulièrement de l'IA générative dans l'écosystème numérique.** Elle comporte des focus thématiques. Volontairement, elle n'aborde pas les questions transversales (macroéconomie, participation démocratique, aspects éthiques et sociétaux, etc.) et n'approfondit pas les questions sectorielles (agriculture, santé, etc.) qui pourront faire l'objet de travaux ultérieurs du CESE.

---

<sup>9</sup> À ce titre, l'AI Act intègre les considérations environnementales à plusieurs niveaux : l'impact environnemental d'un système d'IA doit être pris en compte afin de déterminer s'il est à haut risque (considérant 48) ; les autorités de surveillance du marché peuvent autoriser temporairement la mise sur le marché de systèmes d'IA n'ayant pas conduit de test de conformité si ces derniers ont vocation à protéger l'environnement (considérant 130, article 46 (1) et (2)) ; les États membres sont invités à soutenir la recherche et le développement de SIA bénéfiques pour l'environnement (considérant 142) ; concernant le code de conduite volontaire pour l'application de critères spécifiques sur la base d'objectifs clairs et d'indicateurs de performance clés, le texte intègre une disposition permettant d'évaluer et de minimiser de l'impact des systèmes d'IA sur la durabilité environnementale, y compris en termes de conception, formation et utilisation des SIA (article 95) ; enfin, la liste des infractions pénales visées à l'article 5 (sur les pratiques interdites) inclut les « crimes environnementaux » (annexe II).

## PARTIE 01

# L'IA peut bénéficier directement et indirectement à l'environnement

## A. Bénéfices directs et indirects de l'IA pour l'environnement

**L'IA peut directement contribuer à réduire l'empreinte environnementale par des systèmes créés spécifiquement pour leur utilité écologique.**

Phénomènes climatiques, biodiversité, océanographie, pollutions : les illustrations de l'usage de l'IA sont déjà nombreuses.

L'IA permet ainsi une meilleure compréhension des écosystèmes et espaces naturels et un meilleur entretien des parcelles. *« L'IA va nous permettre de comprendre la dynamique et l'évolution des écosystèmes en se basant sur la réalité de leur complexité biologique, d'optimiser la gestion de nos ressources, notamment énergétiques, de préserver notre environnement et d'encourager la biodiversité. »*<sup>10</sup> Dernièrement, les travaux de Claire Monteleoni, titulaire de la chaire Choose France AI et directrice de recherche à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique, ont démontré que l'utilisation de données issues de

modèles physiques combinée à un réseau neuronal permettait de prévoir la trajectoire des ouragans, phénomènes complexes très difficiles à prédire. De même, Pl@ntNet est une plateforme de science citoyenne qui s'appuie sur l'IA pour faciliter l'identification et l'inventaire des espèces végétales. Il s'agit de l'un des plus grands observatoires de la biodiversité au monde avec plusieurs millions de contributeurs dans la quasi-totalité des pays. L'application Pl@ntNet permet d'identifier des dizaines de milliers d'espèces de plantes simplement en les prenant en photo. Seules les observations qui atteignent un degré de confiance suffisant sont ajoutées à la base de données publique et utilisées pour le réentraînement de l'IA sur une base mensuelle, plutôt que quotidienne ou hebdomadaire, afin de limiter la consommation d'énergie et les émissions de carbone. Par les mêmes procédés, l'application BirdNet permet d'identifier près de 3 000 espèces d'oiseaux

<sup>10</sup> Rapport de la mission Villani, partie 4 *L'intelligence artificielle au service d'une économie plus écologique*, 2018.

d'Amérique du Nord et d'Europe<sup>11</sup>. Autre exemple, la gestion durable de l'océan peut être améliorée par des systèmes numériques renforcés par l'IA. Mercator Ocean International, organisme créé par des entités de recherches françaises et étendu à d'autres pays européens<sup>12</sup>, élabore des systèmes complexes de simulation de l'océan basés sur des données d'observation (satellite et *in situ*) qui sont capables de décrire, analyser et prévoir l'état physique et biogéochimique de l'océan à tout moment, en surface ou en profondeur, à l'échelle globale ou pour une zone spécifique, en temps réel ou en différé.

Les SIA permettent également de lutter plus efficacement contre les pollutions. Ainsi, ils peuvent directement contribuer à la mesure et à la gestion de la qualité de l'air, en prévoyant plusieurs heures à l'avance la concentration de particules fines à tel ou tel endroit.

De même, les SIA permettent un meilleur contrôle de la législation environnementale. Les images aériennes et satellites constituent à cet égard un gisement de données considérable. Des dépôts d'ordures illégaux peuvent être détectés, ce qui peut réduire les contaminations des sols et des nappes phréatiques. De même, plusieurs pays recourent à des SIA exploitant les images satellites et aériennes pour contrôler l'usage des sols et vérifier si les conditions d'octroi des subventions dans le cadre de la politique agricole commune (PAC) sont remplies.

### **L'IA peut aussi indirectement contribuer à réduire l'empreinte environnementale par une amélioration de l'efficacité énergétique de l'ensemble des activités.**

Cette optimisation de l'usage des ressources prend des formes multiples : dans le transport, le véhicule électrique et le pilotage de la recharge, le véhicule autonome et la réduction des congestions ; dans la production d'énergie, l'intégration d'un important niveau de renouvelables dans le mix de production d'électricité, les *smart grids* (gestion de l'intermittence, stockage intelligent, effacement) ; systèmes d'autoconsommation qui permettent un dialogue direct entre la production quand elle est disponible et une grande partie des usages ; systèmes de *mesh grids* (réseaux émaillés), c'est à dire de partage, par exemple dans un quartier ou un village, de l'énergie stockée par chaque système d'autoconsommation. L'optimisation concerne aussi les consommations énergétiques des bâtiments (éclairage, chauffage/ climatisation, bâtiments à énergie positive, etc.) et, dans l'ensemble de l'industrie, l'automatisation, l'optimisation des *process* de production et des chaînes logistiques. Dans l'agriculture, une bonne utilisation de l'IA peut permettre un suivi au plus près des besoins du sol et des plantes, en eau et en nutriments et une surveillance précise des animaux d'élevage.

<sup>11</sup> BirdNet a été développée conjointement par le laboratoire d'ornithologie de l'université de Cornell (Etats-Unis) et l'université technologique de Chemnitz (Allemagne).

<sup>12</sup> Audition de Nicolas Arnaud, directeur de recherche au CNRS et directeur de l'institut national des sciences de l'Univers. Mercator a été fondé par le CNRS, Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), l'IfalRD (Institut de recherche pour le développement), Météo-France et SHOM (Service hydrographique et océanographique de la marine nationale).

**À noter que ces bénéfices directs et indirects concernent à la fois la lutte contre le changement climatique et l'adaptation au changement climatique.**

D'une part, les SIA peuvent aider à mesurer les émissions de GES, mais aussi à les réduire à hauteur de 5 à 10 % par organisation selon le cabinet de conseil Boston Consulting Group<sup>13</sup>. D'autre part, ils permettent d'anticiper les risques liés au climat, que ce soit en améliorant les projections à long terme d'événements localisés, tels que l'élévation du niveau

de la mer, ou en améliorant les systèmes d'alerte précoce pour les phénomènes extrêmes, tels que les ouragans ou les sécheresses. Autre exemple : en combinant des données satellitaires et une modélisation avancée des inondations, l'IA permet d'identifier les infrastructures essentielles telles que les hôpitaux et les zones humides les plus exposées aux inondations, et comprendre où des barrières artificielles placées stratégiquement pourraient être les plus utiles.

## **B. Exemples de cas d'usage sectoriels par les entreprises privées et les pouvoirs publics**

**Dans le secteur du bâtiment, les cas d'usage concernent à la fois la conception et la modélisation, la gestion de la construction, la gestion des actifs et de la maintenance, la performance énergétique et la durabilité, l'analyse prédictive et la prévention des risques.**

Les données sont utilisées pour créer des modèles numériques des bâtiments, ce qui permet aux équipes de mieux visualiser et simuler les projets avant leur construction. Les logiciels de modélisation des informations du bâtiment (BIM) intègrent des données sur la conception, la construction et la maintenance des bâtiments, ce qui facilite la coordination entre les différentes parties prenantes et réduit les erreurs.

Elles sont aussi utilisées pour suivre et gérer les projets de construction, en fournissant des informations sur l'avancement du chantier, la gestion des coûts, la planification des ressources et la coordination des équipes. Les capteurs et les dispositifs IoT (Internet des objets) sont utilisés pour collecter des données en temps réel sur les sites de construction, permettant ainsi d'optimiser l'utilisation des ressources et de détecter les problèmes potentiels.

En matière de gestion des actifs et de la maintenance, les données sont utilisées pour suivre et gérer les actifs immobiliers tout au long de leur cycle de vie. Certains algorithmes peuvent également générer des données manquantes. Les propriétaires et les gestionnaires de bâtiments utilisent

<sup>13</sup> *The power of A.I. to help mitigate and manage climate change*, article du directeur général de BCG paru dans la revue *Fortune* (septembre 2022).

des systèmes de gestion des installations pour collecter et analyser les données sur les performances des bâtiments, la consommation d'énergie, la maintenance préventive, etc. Cela permet d'optimiser l'efficacité énergétique, de prévoir les besoins en maintenance et de prolonger la durée de vie des actifs.

Pour améliorer la performance énergétique et la durabilité des bâtiments, des systèmes de surveillance et de gestion de l'énergie collectent des données sur la consommation énergétique des bâtiments, permettant ainsi d'identifier les inefficacités et de mettre en œuvre des mesures d'économie d'énergie. Les données sont également utilisées pour évaluer, dès la conception, et suivre les performances environnementales des bâtiments, notamment en ce qui concerne les émissions de carbone et l'empreinte écologique.

Enfin, les données historiques peuvent être utilisées pour prévoir les pannes d'équipement, permettant ainsi de planifier la maintenance de manière proactive. De même, l'analyse des données peut aider à identifier les risques liés à la sécurité sur les chantiers de construction, ce qui permet de prendre des mesures préventives.

**Dans les transports et la mobilité, les SIA sont déjà largement déployés commercialement, notamment dans les applications de calcul d'itinéraires et de guidage routier accessibles sur les téléphones mobiles.**

Ces systèmes peuvent notamment :

→ aider à la gestion des flux et à l'optimisation du plan de circulation en prévoyant le trafic routier rue par rue et quartier par quartier en fonction d'un très grand nombre de paramètres explicatifs et de capteurs fixes ou mobiles (transports publics, véhicules dédiés, mais aussi l'ensemble

des usagers de la route acceptant de partager des données), en ajustant les leviers de circulation (ouverture/fermeture de voies, extinction/allumage et changement de rythme des feux tricolores) en temps réel en fonction du trafic constaté ou des besoins des services d'urgence (pompiers, ambulances). La capitale estonienne, Tallinn, expérimente depuis 2018 un SIA recourant à la vision par ordinateur, qui utilise des caméras situées à certains carrefours pour compter des véhicules de différents types et, à l'avenir, les piétons, cyclistes et autres usagers de la route, afin de prévoir la congestion dans certaines zones ;

- faciliter le stationnement par l'identification des véhicules par lecture des plaques d'immatriculation (cas d'usage désormais courant dans les parkings collectifs) ou en informant en temps réel les automobilistes des places disponibles et qui devraient le rester lorsqu'ils arriveront sur place (solution « ParkAm » en Israël, utilisant des caméras sur la voie publique et un algorithme de vision par ordinateur) ;
- accroître l'efficacité des services de mobilité partagée, notamment par l'appariement performant entre l'offre et la demande (covoiturage, vélo, etc.) ;
- automatiser des transports collectifs ou en commun de surface, notamment les taxis (projet de Waymo à San Francisco, tests de taxis autonomes en Chine) et les bus (premier essai commercial à Singapour en 2021, expérimentation à Malaga en Espagne, etc.) ou les petites navettes autonomes (Lyon, Rouen Normandie, Vernon-Giverny, etc.). À terme, des transports aériens autonomes de proximité (« taxis volants ») sont également concevables (projet « VoloCity » à Rome par exemple) ;



- orienter les décisions de réfection et d'amélioration de la voirie routière à partir des données relevées par des capteurs embarqués (le cas échéant un simple smartphone fixé au pare-brise d'un véhicule administratif), en utilisant un algorithme d'apprentissage (vision par ordinateur) permettant d'identifier et de catégoriser les détériorations de la chaussée (fissures, nids de poules, etc.).

**En matière de gestion des déchets, le déploiement de SIA s'appuie en général sur la collecte de données issues de poubelles connectées<sup>14</sup>.**

Un SIA peut être utilisé, par exemple :

- au niveau des poubelles individuelles, pour calculer le montant de la redevance d'enlèvement des ordures ménagères en fonction du poids des déchets (cas de la communauté de communes Pays Haut Val d'Alzette) ; pour optimiser les tournées d'enlèvement<sup>15</sup> ;
  - au niveau de containers situés sur la voie publique, pour identifier, classer et trier les déchets dès leur dépôt à l'aide d'un algorithme de reconnaissance d'objet ;
  - au niveau de bennes à ordures situées en déchetteries, comme c'est le cas de plus de 200 bennes connectées déployées dans l'aire urbaine toulousaine (syndicat
- Décoset) : le SIA peut identifier le type de déchets déposés et le nombre de fois où la benne a été tassée, calculer le taux de remplissage et, là encore, diminuer les distances parcourues par les camions) ;
- au stade du centre de tri, pour classer et trier les déchets en tenant compte de leur type, de leur composition et de leur éventuelle contamination par des produits chimiques, en utilisant notamment la vision par ordinateur, le traitement algorithmique de données issues de capteurs divers (infrarouges, détecteurs de métaux, scanners 3D, radio-identification par les « tags RFID », etc.) et la robotique pour le geste de tri proprement dit. Un SIA est susceptible de permettre de procéder à un tri plus rapide, plus fiable et surtout plus fin, et peut contribuer à la diversification des filières de tri et à la performance de l'économie circulaire. En l'état des technologies, le tri des déchets de construction semble largement automatisable, alors que celui des déchets ménagers s'avère plus délicat en raison de la diversité des matériaux et des matières. Il fait l'objet de nombreuses expérimentations (tri optique sur une chaîne de tri à Amiens) ;

<sup>14</sup> Exemples tirés de l'étude du Conseil d'Etat *Intelligence artificielle et action publique : construire la confiance, servir la performance* (mars 2022).

<sup>15</sup> Exemple de Rotterdam où des capteurs ont été posés sur plus de 6 000 poubelles afin de mesurer le taux de remplissage, d'adapter les tournées en conséquence et d'améliorer la maintenance des containers. L'objectif de ce système déployé depuis 2018 est de passer de 203 trajets fixes à 165 trajets dynamiques, réduisant de 20 % le nombre de kilomètres parcourus et, en conséquence, les émissions de GES.

→ au niveau global, pour améliorer la qualité du service à l'utilisateur, la qualité de vie au travail et l'allocation optimale des ressources : les SIA permettent de prévoir les conditions et les proportions dans lesquelles les déchets sont jetés et adapter les décisions publiques en conséquence (format des poubelles, fréquence des ramassages, etc.), d'optimiser les organisations de travail (détermination des tournées, etc.) et de favoriser l'appariement entre l'offre et la demande (économie circulaire, problématique du gaspillage alimentaire, etc.).

**En matière de gestion de l'eau, les SIA auront également des bénéfices environnementaux.**

Puisque les infrastructures de production et de traitement de l'eau sont déjà équipées d'un très grand nombre de capteurs connectés, les SIA ouvrent la voie à :

→ une meilleure anticipation et prévention des fuites et de la dégradation de la qualité de l'eau, le cas échéant en combinaison avec des données d'information générale – météorologiques par exemple (algorithme d'apprentissage machine développé par le groupe de production d'eau Ramboll en Finlande), le paramétrage des pompes en vue d'ajuster finement l'offre et la demande (projet CHAIN à Aarhus, au Danemark, basé sur l'apprentissage machine) ;

→ la réduction de la consommation d'énergie nécessaire au fonctionnement du système de pompage (expérimentation d'un système de coordination des mouvements de pompage en fonction de la quantité d'eau traitée nécessaire pour une journée donnée, basé sur un algorithme à Melbourne en Australie) ;

→ au niveau des consommateurs, à la détection précoce des fuites en raison d'une surconsommation manifeste, ce que doit permettre, par exemple, la généralisation des compteurs d'eau « intelligents » à Paris, pilotée par Eau de Paris ; à la mesure du taux d'humidité des sols des parcs qui permet, en combinaison avec les prévisions météorologiques, d'évaluer la nécessité d'arroser (projet développé à Montpellier).

**L'éclairage public est déjà optimisé par les SIA dans certaines collectivités.**

Outre l'installation de capteurs sur les lampadaires d'éclairage public pour la collecte de données utiles à des finalités tierces (trafic routier, flux de piétons, mesure de la qualité de l'air, évaluation des nuisances sonores et détection de bruits anormaux, etc.), le système d'éclairage peut être connecté et paramétré afin de moduler son utilisation en fonction de la fréquentation des sites et de réduire tout à la fois la pollution lumineuse nocturne et l'empreinte écologique de ces équipements.

**La prévention des risques naturels se prête tout particulièrement au déploiement de SIA afin de mieux les prévoir et de déclencher le plus tôt possible des alertes.**

Ces alertes concernent les inondations (chaire Hydr.IA à Alès, lancement de projets expérimentaux à Louvain et Rhode-Saint-Genèse en Belgique, déploiement d'un système d'alerte en Inde et au Bangladesh), les feux de forêts (cartographie des zones de végétation à débroussailler pour la limiter et protéger les habitations et les réseaux en Australie, outil Radfire du Laboratoire national Nord-ouest Pacifique aux États-Unis pour détecter les départs de feux déclenchés par la foudre à partir des images satellites et contrôler l'utilisation des

produits ignifuges, prévision de la propagation des incidences en Bolivie...), les tremblements de terre (identification et cartographie des failles sismiques grâce à la vision par ordinateur appliquée aux images satellites, compréhension du phénomène par l'exploitation des statistiques à l'aide de l'apprentissage profond, prévision précoce des sinistres, anticipation des répliques) ou des avalanches

Tous ces bénéfices potentiels s'inscrivent dans une vision favorable aux enjeux environnementaux et dans une société démocratique. Mais il faut rappeler que les SIA peuvent tout autant être utilisés dans des contextes de régimes autoritaires et défavorables aux enjeux climatiques.

# Mais l'IA aggrave l'empreinte environnementale du numérique : consommation d'électricité, de métaux rares, d'eau et artificialisation des sols et des fonds marins

**Une évaluation de l'impact environnemental de l'IA au sein de l'ensemble plus large du numérique est actuellement difficile. Quoi qu'il en soit, comme pour le numérique, elle doit prendre en compte l'ensemble de ces impacts, des composantes matérielles et des phases de leur cycle de vie dès la conception des algorithmes.**

Cette évaluation doit donc porter à la fois sur :

- le maximum d'indicateurs environnementaux et pas seulement l'empreinte carbone ;
- les trois briques matérielles que sont les terminaux, les réseaux terrestres, aériens et marins et les centres de données ;
- les impacts générés lors de toutes les étapes du cycle de vie de chacune de ces trois briques, à savoir les phases de conception, fabrication, distribution, utilisation et fin de vie.

Une telle évaluation n'est pas disponible à l'heure actuelle mais elle existe pour le numérique en général. Il ressort en effet d'une étude conduite par l'Ademe et l'Arcep<sup>16</sup> que :

- à côté des impacts environnementaux liés à la consommation énergétique (incluant entre autres l'empreinte carbone, les radiations ionisantes et l'épuisement des ressources abiotiques fossiles qui décrivent environ 64 % de l'impact) qui sont des impacts communs à de nombreux secteurs, l'épuisement des ressources abiotiques naturelles (minéraux et métaux) représente 27 % de l'impact environnemental du numérique ;
- des trois briques qui constituent le périmètre de l'étude, ce sont les terminaux (et en particulier les écrans et téléviseurs) qui sont à l'origine de 65 à 90 % de l'impact environnemental, selon l'indicateur environnemental considéré ;

<sup>16</sup> Ademe et Arcep, *Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France* (janvier 2022).

- de toutes les étapes du cycle de vie des biens et services considérées, la fabrication et l'utilisation peuvent atteindre près de 100 % de l'impact environnemental.

Même si l'impact environnemental spécifique de l'IA au sein du numérique est difficile à évaluer, il est certain que les SIA décuplent la consommation d'électricité et imposent de changer les matériels pour accueillir des capacités nouvelles. À titre d'exemple, l'empreinte environnementale d'une image créée par une IA générative sur la base d'une ou plusieurs requêtes (*prompts*) est supérieure à celle d'une image photographique. Or, comme le relevait déjà en 2019 une étude du Shift Project, 80% des flux de données mondiaux sont des flux vidéo : « *la vidéo est un support d'informations dense : 10 h de film haute définition, c'est davantage de données que l'intégralité des articles en anglais de Wikipédia en format texte !* ».<sup>17</sup>

Il est cependant important de souligner que l'impact environnemental du secteur numérique, et par extension de l'IA, varie en fonction du pays où la technologie est développée et utilisée. En effet, faire du numérique dans un pays ayant un mix énergétique faiblement carboné, comme la France, rend de fait cette activité moins émettrice de GES. L'empreinte carbone de la production de matériels numériques est très dépendante

de l'intensité carbone de l'énergie des pays producteurs. Celle-ci diminue tendanciellement au niveau mondial, mais elle varie fortement, selon les pays du simple au triple. Par ailleurs, lors de l'usage du numérique, l'empreinte carbone dépend fortement du bouquet de production d'électricité dans les pays d'utilisation. À titre d'exemple, l'impact environnemental (en kg de CO<sub>2</sub>eq) d'un entraînement unique de GPT-3 équivaut à 93 300 kg pour la France, contre 858 360 kg pour l'Inde, ou encore 485 160 kg en Corée du Sud<sup>18</sup>. Les écarts sont significatifs.

Quoi qu'il en soit, il est essentiel de ne pas faire d'amalgame entre les produits, les logiciels, et les usages, car chaque acteur a sa responsabilité et son rôle spécifique à jouer dans la chaîne de valeur.

### La consommation d'électricité

La tendance vers plus de consommation électrique et les conséquences en matière d'empreintes environnementales au niveau mondial (carbone, eau, ressources naturelles, biodiversité, etc.) interroge au regard des capacités de production électrique et leur partage entre les usagers, sachant que l'électrification décarbonée est une des meilleures solutions pour lutter contre le réchauffement climatique. Selon OpenAI, entraîner le modèle de langage GPT-3 a demandé l'équivalent de l'énergie consommée annuellement par 120 foyers

<sup>17</sup> Etude du Shift Project *L'insoutenable usage de la vidéo en ligne. Un cas pratique pour la sobriété numérique* (juillet 2019).

<sup>18</sup> Article *Artificial Intelligence and the Climate Emergency: Opportunities, Challenges, and Recommendations*, CellPress (mai 2021).

américains. Son successeur, GPT-4 en a nécessité quarante fois plus, soit la consommation d'un peu moins de 5 000 foyers américains. En 2023, la direction d'Alphabet, la maison-mère de Google, estimait qu'un « *prompt* » fait à une IA générative demanderait l'équivalent de dix fois l'énergie consommée par une simple recherche sur Google. Et ce, alors même que « *les entreprises du secteur se gardent bien de publier la grande partie de leurs données sur la question* », souligne un groupe d'associations environnementales, dont Greenpeace et Les Amis de la Terre, dans une étude parue en mars 2024<sup>19</sup>.

La puissance de calcul déployée pour la construction de modèles complexes d'apprentissage machine requiert une consommation électrique considérable. Celle-ci peut être exposée en pure perte si le modèle n'est finalement pas mis en production. La course à la performance, en particulier à l'exactitude du modèle, peut conduire à une disproportion inacceptable entre son incidence environnementale et les bénéfices obtenus, lorsqu'il s'agit de réduire de quelques dixièmes un taux d'erreur sans enjeu majeur au regard de la destination du système – même s'il convient de tenir compte des usages en cascade et, en particulier, des possibilités d'adaptation, par un réentraînement sur un ensemble limité de données et à un coût énergétique faible, de giga-modèles correctement pré-entraînés. Il est aussi

à noter le risque de concurrence entre l'utilisation de l'électricité décarbonée pour les SIA et son utilisation croissante pour d'autres usages, qui eux sont incontestablement indispensables à la transition écologique<sup>20</sup>.

Dans la plupart des cas, l'empreinte carbone de la phase d'utilisation des IA est supérieure à celle de la phase d'entraînement qui serait, selon Google, dans une proportion de 60/40<sup>21</sup>. Des chercheurs de l'Université de Berkeley, en Californie, se sont intéressés dès 2021 à la consommation d'énergie et à l'empreinte carbone de plusieurs grands modèles (T5, Meena, GShard, Switch Transformer et GPT-3). Selon eux, l'impact environnemental de leur phase d'entraînement est estimé à 552 tonnes CO<sub>2</sub>eq sur quinze jours, soit une énergie consommée de 1 287 megawatts-heure (environ 200 allers-retours entre Paris et New York ou 2 500 000 km parcourus en voiture)<sup>22</sup>. D'autres études ont été analysées, notamment l'évaluation de l'impact environnemental de Bloom, qui s'est révélé 18 fois inférieur à celui de GPT-3. « *Différents facteurs entrent en compte dans la consommation d'énergie, comme le profil de consommation des serveurs utilisés, la durée de l'entraînement ou encore l'architecture du modèle* », indique Data For Good dans son livre blanc,<sup>23</sup> tout en indiquant que la part des émissions de GES liées à la phase d'inférence (exécution et déploiement du modèle) pourrait

<sup>19</sup> *Climat contre la désinformation (CAAD), Global Action Plan (GAP), Check My Ads, Greenpeace, étude The AI threats to climate change (mars 2024)*. Disponible seulement en anglais.

<sup>20</sup> Dans son « *Bilan prévisionnel 2023-2035* » paru en 2023, le gestionnaire français du réseau de transport d'électricité (RTE) estime que l'effort de production d'électricité bas-carbone en France, c'est-à-dire d'origine renouvelable ou nucléaire, doit passer de 395TWh en 2022 à une fourchette comprise entre 640 et 700 TWh en 2035.

<sup>21</sup> *Etude The Carbon Footprint of Machine Learning Training Will Plateau, Then Shrink (reference : arXiv:2204.05149 ; (avril 2022)*.

<sup>22</sup> « *Carbon emissions and large neural network training* », D. Patterson, J. Gonzalez, Q. Le, C. Liang, L.M. Munguia, D. Rothchild, D. So, M. Texier, J. Dean, (avril 2021).

<sup>23</sup> « *Les grands défis de l'IA générative* », Data For Good, (juillet 2023).

largement dépasser celle liée à l'entraînement : « *dans ce cas, l'utilisation du modèle prend le dessus sur son entraînement en termes d'impact, notamment poussé par le nombre d'utilisateurs. Autrement dit, la consommation unitaire est plus faible, mais le volume est beaucoup plus élevé* ». L'association souligne aussi, à propos de GPT-4 : « *GPT-4 serait composé de 8 sous-modèles, chacun plus gros que GPT-3 pour un nombre total de paramètres d'environ 1 760 milliards [...] L'énergie consommée et les impacts à l'usage d'un tel modèle sont probablement entre 10 et 100 fois plus importants.* ».

### Les besoins en métaux critiques

Comme pour les autres postes de consommation, la consommation des métaux critiques pour l'IA est sans doute encore modeste rapportée à la consommation totale. Toutefois, ce qui est vrai du numérique le sera encore davantage pour l'IA.

La performance à moindre coût de l'industrie des terminaux, réseaux et centre de données dépend d'une quantité et d'un nombre croissants de matières premières dites « critiques »<sup>24</sup>. Entre 1980 et 2008, la demande globale de métaux a augmenté de 87 %. De 1980 à 2010, le nombre de métaux utilisés a été multiplié par six en raison principalement

du numérique. D'ici à 2050, pour répondre aux projections de demandes, la quantité de métaux requis pourrait représenter trois à dix fois les volumes de production actuels. Il faudrait donc produire plus de métaux au cours des trente-cinq prochaines années que la quantité cumulée produite depuis l'Antiquité<sup>25</sup>. De plus, leur taux de recyclage reste très limité du fait de la miniaturisation des objets et de la multitude de matériaux qui les composent. « *Plus on est high tech, moins on est recyclable* », de sorte que « *sur 60 métaux qui composent un smartphone, seuls 17 ont des chances d'être recyclés* »<sup>26</sup>.

Cinq matières premières peuvent ainsi être qualifiées de critiques pour le numérique et donc aussi pour l'IA : l'indium, le gallium, le tantale, le néodyme et le germanium.

L'essor de l'IA est de nature à renforcer les tendances observées dans le numérique en général : stockage et échange d'un volume croissant de données, augmentation de la puissance de calcul, pression sur le renouvellement des équipements pour augmenter les performances, etc.

Il est difficile aujourd'hui de quantifier le facteur d'accroissement de ce besoin, ou d'imaginer de quelle manière la dépendance envers ces minerais pourrait être réduite. Les ordinateurs quantiques, dont les spécialistes estiment que nous sommes encore très loin de

<sup>24</sup> France Stratégie, *La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé* (juin 2020) ; Carbone 4, *Les matières de l'immatériel : existe-t-il des risques d'approvisionnement en matières premières pour les entreprises du numérique ?* (juin 2023).

<sup>25</sup> Olivier Vidal, *Impact de différents scénarios énergétiques sur les matières premières et leur disponibilité future*, Annales des mines (Série Responsabilité et environnement, 2020, N°99).

<sup>26</sup> Éric Vidalenc, *Pour une écologie numérique* (2019). L'auteur cite une étude du recycleur Belge Umicore.

pouvoir annoncer un fonctionnement dans des conditions qui permettraient leur généralisation, auraient pour effet certain de diminuer le besoin de ces ressources mais ne supprimeraient pas totalement le problème. « *Le besoin de calculs pour l'IA a été multiplié par un million en six ans et il décuple chaque année* » et « *les GPU<sup>27</sup> représentent moins de 10 % des processeurs dans nos data centers, mais déjà bien plus de 10 % de notre consommation électrique et cette part va augmenter* », selon Charles Meyers, le patron d'Equinix<sup>28</sup>.

Les conséquences environnementales sont multiples :

- l'exploitation s'opère souvent dans de mauvaises conditions environnementales et sociales (gaspillage énergétique, détérioration et pollution des milieux, conditions de travail dégradées...) d'autant que les pays où les gisements majeurs se trouvent n'appliquent pas les mêmes standards que l'Union européenne ;
- les ressources en cause sont naturellement finies, et leur épuisement incite à rechercher l'exploitation de sites moins riches appelant là encore des conséquences environnementales négatives significatives (plus de consommation énergétique, plus de pollution, etc.) ;
- le transport maritime des matières premières, voire aérien pour les produits finis, ont des empreintes écologiques négatives ;

→ enfin, il est à craindre une concurrence des usages entre les SIA et la production d'équipements nécessaires pour les énergies renouvelables (éolien, solaire). Aux SIA s'applique cette remarque générale sur la transition écologique : « *les secteurs risquent de se livrer une guerre féroce pour s'approprier les ressources rares sur lesquelles la tension va aller croissant. Sans une articulation à court terme et une hiérarchisation à long terme des usages [...], la loi du plus fort l'emportera : les secteurs les plus « riches » ou dont les clients sont les plus solvables, pourraient faire main basse sur les ressources [...]* »<sup>29</sup>.

### La consommation d'eau

La consommation mondiale d'eau est de 4,3 trillions de mètres cubes. Entraîner un grand modèle de langage comme celui de GPT-3 a demandé 700 000 litres d'eau, aussi bien pour refroidir les serveurs<sup>30</sup> que pour produire une partie de l'électricité renouvelable qui les alimentaient, selon plusieurs études. De fait, les géants de la « *big tech* » sollicitent des quantités toujours plus importantes d'eau : 34 % de plus en un an, entre 2021 et 2022, pour Microsoft à travers le monde et 20 % de plus, sur la même période, pour Google. Le ministère américain de l'énergie a estimé que les centres de données américains ont consommé 1,7 milliard de litres par jour en 2014, soit 0,14 % de la consommation

<sup>27</sup> Le *graphic processing unit* (GPU) est un processeur composé de nombreux cœurs plus petits et plus spécialisés. En travaillant ensemble, les cœurs offrent des performances remarquables lorsqu'une tâche de traitement peut être répartie sur plusieurs cœurs en même temps (ou en parallèle). Le GPU est un composant essentiel aux jeux vidéo modernes, car il permet d'obtenir des images de meilleure qualité et un gameplay plus fluide. Les GPU sont également utiles dans le domaine de l'IA.

<sup>28</sup> *Le Monde* daté du 15 juin 2024.

<sup>29</sup> David Djaïz et Xavier Desjardins, *La révolution obligée* (Allary Editions, 2024)

<sup>30</sup> Début 2023, il existait 4 000 centres de données dans le monde dont près de 300 en France.



quotidienne d'eau aux États-Unis<sup>31</sup> et un rapport de chercheurs de Virginia Tech a révélé qu'au moins un cinquième des centres de données fonctionnaient dans des zones où le stress hydrique est élevé<sup>32</sup>. Une étude plus récente établit que les SIA pourraient consommer en 2027 entre 4,2 et 6,6 milliards de mètres cubes d'eau, soit une consommation légèrement supérieure à celle du Danemark et équivalente à la moitié de celle du Royaume-Uni<sup>33</sup>. Une telle consommation contribue donc à la pénurie d'eau locale dans des zones déjà vulnérables et pourrait exacerber les problèmes d'accès à l'eau. Par exemple, le projet de *data center* de Meta à Talavera de la Reina, en Espagne, devrait prélever 665 millions de litres d'eau par an dans une région en plein stress hydrique.

### L'artificialisation des sols

L'illusion du stockage des données dans le nuage (*cloud*) fait oublier sa matérialité. La multiplication à l'infini du nombre de données liées aux SIA, exige des sites de traitement et de stockage dont la surface, en l'état de la technique, est de plusieurs dizaines d'hectares.

Le CESE signale qu'un certain nombre de centres de données ont été installés sur des sites artificialisés préalablement, comme celui de Digital Realty (ex-Interxion) dans un ancien silo à sucre à Marseille.

D'autre part, un aspect méconnu et pourtant non négligeable de cette artificialisation concerne les fonds marins. Par les tuyaux qui les sillonnent, ils constituent le plus grand circuit de circulation des données, bien avant l'espace et l'espace émergé. Aujourd'hui 98 % des réseaux de données mondiales transitent par les câbles sous-marins, tissant une toile au fond des mers et des océans dont les impacts négatifs pourraient faire l'objet d'un programme de recherche<sup>34</sup>.

Par ailleurs, cet avis n'a pas étudié l'impact de l'IA sur la pollution spatiale (constellations de satellites de communication) ou le déploiement des réseaux d'antennes terrestres.

<sup>31</sup> U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, rapport *United States Data Center Energy Usage Report* (juin 2016).

<sup>32</sup> *Environmental Research Letters*, étude *The environmental footprint of data centers in the United States* (mai 2021).

<sup>33</sup> Etude « *Making AI Less "Thirsty": Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models* » (arXiv:2304.03271, Cornell University, octobre 2023).

<sup>34</sup> Camille Morel, *Les câbles sous-marins*, 2023 CNRS éditions.

## PARTIE 03

# Le bilan environnemental de l'IA, aujourd'hui incertain et mal documenté, pourrait être aggravé par les risques d'effets rebonds et de désinformation

**Les coûts environnementaux risquent d'être exponentiels en raison d'une logique économique qui conduit à des effets rebonds imprévisibles à ce jour.**

Comme pour tout gain d'efficacité, des effets rebonds peuvent annuler les gains environnementaux liés à l'IA. L'effet rebond est un phénomène par lequel les économies d'énergie ou de ressources initialement prévues par l'utilisation d'une nouvelle technologie peuvent être partiellement ou complètement gommées à la suite d'une adaptation du comportement de la société. Il peut s'exprimer de diverses manières : augmentation de la consommation sur le même poste de dépense, ou bien sur un autre poste de dépense. Cela est néanmoins à pondérer en fonction du bilan positif attendu par le déploiement des technologies d'efficacité énergétique et l'électrification, pilier stratégique de la décarbonation.

À cet égard, les SIA risquent de découpler des usages à faible utilité sociale et énergivores dans les modes de consommation. Elles constituent alors un nouveau frein à la sobriété, d'autant

que les entreprises de l'IA générative se font concurrence pour proposer les algorithmes les plus efficaces aux yeux des clients.

À mesure que les GAFAM et autres grandes sociétés technologiques s'emparent de ce nouveau marché<sup>35</sup>, le nombre de serveurs nécessaires et leur consommation énergétique risquent d'augmenter massivement. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime qu'un doublement des centres de données dans les deux à dix prochaines années pourraient passer leur part dans la consommation mondiale d'électricité de 1 %, à l'heure actuelle, à 13 %. Une telle augmentation ne sera pas neutre en carbone, quand le secteur de l'énergie reste dépendant du charbon à l'échelle mondiale (65 %) et a émis, en 2023, 37,4 milliards de tonnes de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), nouveau record annuel. Et ce, quand bien même Google, par l'intermédiaire d'une étude commandée en novembre 2023 au cabinet Boston Consulting Group, avance que l'amélioration des connaissances permise par les progrès en IA pourrait « atténuer

<sup>35</sup> Selon l'OCDE, les start-ups spécialisées dans l'IA ont ainsi attiré près de 12 % du capital-investissement mondial au cours du premier semestre de 2018, par rapport à 3 % en 2011.

*de 5 à 10 % les émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici à 2030 ».*

Par ailleurs, les gains d'efficacité occasionnés par l'IA peuvent servir à renforcer le recours aux hydrocarbures. Ainsi, d'après l'étude précitée *The IA threats to climate change*, environ « 92 % des sociétés pétrogazières de la planète emploient des technologies d'intelligence artificielle dès à présent, ou les emploieront dans les cinq prochaines années, pour extraire plus d'hydrocarbures plus facilement et en moins de temps ».

**De plus, les SIA peuvent nourrir le climato-scepticisme, forme particulière de désinformation.**

Les IA, en particulier celles qui génèrent du contenu sur commande, peuvent intensifier la désinformation. Les textes produits par les IA deviennent de plus en plus convaincants. Un certain nombre d'études scientifiques confirment que les arguments élaborés sont plus persuasifs que ceux écrits par des humains, même sur des sujets polémiques. Et sur une thématique aussi clivante que le réchauffement climatique, il n'est alors pas difficile de produire des contenus de désinformation niant la nécessité d'une transition écologique voire suscitant l'indignation contre les politiques environnementales (ex : faux scandale des éoliennes offshore responsables de l'échouage de baleines aux États-Unis apparu sur Facebook lors du premier trimestre 2023).

De plus, face à l'apparition de nouveaux sites web s'appuyant uniquement sur la production d'IA génératives, la diffusion de désinformation climatique se fait non seulement plus facilement mais devient économiquement rentable, grâce aux profits générés par la publicité.

La désinformation, dans tous les cas, repose sur des données d'entrées non qualifiées, fausses ou volontairement inexactes, et sur des algorithmes biaisés. Elle est parfois le résultat du fonctionnement des IA sans mauvaise volonté humaine. En effet, l'IA enchaîne des mots en obéissant uniquement à des critères statistiques : elle choisit celui qui est le plus souvent utilisé dans un contexte linguistique donné. Une ancienne chercheuse de la société Google, Timnit Gebru, spécialisée dans l'éthique de l'IA, affirmait que ces machines sont des « perroquets stochastiques » : perroquets parce qu'ils répètent les textes à partir desquels ils ont appris ; stochastiques car ils font uniquement appel à des probabilités. Rien n'assure de la validité des assertions formulées. Le *chatbot* construit uniquement avec des LLM<sup>36</sup> ne vérifie pas ce qu'il dit, il se contente d'accoler les mots les uns à la suite des autres en les sélectionnant selon leur vraisemblance d'apparition (c'est-à-dire selon un critère probabiliste).

<sup>36</sup> LLM (large language model) : les grands modèles de langage sont des modèles d'apprentissage automatique capables de comprendre et de générer des textes en langage humain. Ils fonctionnent en analysant des ensembles de données linguistiques massives.

Ces affabulations peuvent contribuer à la désinformation des populations puisque ce que l'on voit, ce que l'on entend et ce que l'on lit peut se révéler erroné.

### **Les prévisions restent très incertaines à ce jour.**

Les études sur les incidences environnementales de l'IA sont foisonnantes, évolutives et parfois contradictoires. Leurs méthodologies variables et leur caractère largement prospectif renforcent les incertitudes. À l'heure actuelle, il est donc très difficile d'évaluer, même par des ordres de grandeur, les bénéfices et coûts environnementaux de l'IA. Il en résulte des débats très clivés entre partisans et détracteurs de l'IA, sur une technologie qui constitue une des priorités stratégiques de la France et de l'Union européenne.

### **Enfin, le contexte politique est peu propice à la vigilance sur l'empreinte environnementale de l'IA.**

Entre 2019 et 2021, nonobstant la pandémie de la Covid-19, de nombreux compromis ont été trouvés au niveau de l'Union européenne et ont permis l'adoption, en application du « Pacte Vert » et parfois au-delà, de textes ambitieux. On peut mentionner des textes européens (réglementation *Ecodesign for Sustainable Products Regulation* -ESPR-, mécanisme d'ajustement carbone aux frontières -MACF-, classification, étiquetage, emballage -CLP) mais aussi français (loi AGECE, loi Climat, MaPrimRenov') qui viennent accompagner et encadrer les enjeux environnementaux.

La situation s'est toutefois transformée dans la seconde partie de la mandature 2019-2024 du Parlement européen, à partir du déclenchement de la guerre en Ukraine en 2022 : inflation des prix énergétiques et alimentaires inégalée depuis trente ans ; augmentation de l'importation de produits agricoles ukrainiens (afin de soutenir l'effort de guerre de Kiev) ; renforcement d'une réflexion antérieure sur la souveraineté européenne. Dans le même temps, surtout à partir de 2023, les protestations dans plusieurs pays contre des mesures environnementales perçues comme trop coûteuses (isolation des logements et adoption de pompes à chaleur, taxation carbone, électrification du parc automobile, déploiement de zone à faibles émissions, diminution des intrants agricoles et préservation de jachères) se sont multipliées, parfois de façon instrumentalisée (selon la logique du « *green blaming* » ou de la « construction d'un épouvantail écologique »<sup>37</sup>). S'y sont ajoutées des protestations du monde agricole, d'abord aux Pays-Bas dès 2019, puis au début 2024 en France et dans d'autres pays de l'Union (Allemagne, Pologne, Roumanie).

Ce constat pessimiste doit être nuancé au vu des nombreuses initiatives qui ont émergé sur le sujet ces dernières années, particulièrement en France : haut comité pour un numérique écoresponsable (2022) ; feuille de route pour la décarbonation du numérique (2023) ; étude de l'Ademe et de l'Arcep sur l'empreinte environnementale du numérique (trois volets publiés, un à venir) ; stratégie d'accélération numérique écoresponsable (2023) ; planification écologique et feuille de route numérique

37 Construire l'écologie, *Greenblaming. La construction de l'épouvantail écologique*, Paris, janvier 2024. Voir plus généralement l'article paru dans la revue *The Economist* « *The global backlash against climate policies has begun* » (11 octobre 2023).

et données (2023) ; stratégie nationale bas-carbone avec nouveau volet numérique (à venir) ; programme sobriété numérique de l'Ademe ; le baromètre Arcep ; les travaux de l'Afnor sur l'IA frugale ; la loi anti-gaspillage et économie circulaire (AGEC, 2020) ; la loi pour réduire l'empreinte environnementale du numérique en France (REEN, 2021).

En matière d'empreinte environnementale du numérique, une étape a déjà été franchie. La France s'est dotée d'un écosystème où se sont fédérés entreprises et pouvoirs publics pour agir sur le sujet : Planet Tech Care, GreenTech Forum, ainsi que les initiatives précitées (AGEC, REEN). Cela a déjà permis d'aboutir à la feuille de route de décarbonation du secteur numérique, déclinaison de l'article 301 de la loi dite « Climat et Résilience ».

## PARTIE 04

# Un ensemble de leviers sont mobilisables pour améliorer le bilan des systèmes d'IA dans l'empreinte environnementale du numérique

## A. Inscrire ce sujet environnemental à l'agenda international

S'agissant d'une technologie dont les acteurs, les financements et les infrastructures sont globaux, il apparaît d'abord indispensable de s'investir dans la régulation de l'IA à l'échelle internationale. La France pourrait y prendre toute sa place et proposer d'étudier les impacts de l'IA sur la réalisation des objectifs de développement durable des Nations Unies, tant en termes de climat que de biodiversité. Ces études pourraient par exemple figurer dans les « contributions déterminées au niveau national »<sup>38</sup> des États parties à l'Accord de Paris et dans les plans d'action nationaux pour la biodiversité<sup>39</sup> des États parties à la convention sur la diversité biologique (CDB). En quoi l'IA compromet-elle la réalisation de certains objectifs ?

Comment peut-elle à l'inverse y concourir ? La France serait ainsi à l'avant-garde sur ce type d'étude, qui n'a pas encore été initiée par d'autres pays. Ces travaux pourraient être coordonnés avec des impulsions dans le cadre de l'Accord de Paris sur le climat et du Pacte mondial pour l'environnement. La France pourrait également porter de manière plus systématique l'articulation entre les deux transitions, écologique et numérique, au sein des instances internationales, notamment au sein du G7 et de l'Organisation pour la coopération et le développement économique (OCDE). L'initiative pourrait trouver sa place au sein du sommet sur IA organisé à Paris début février 2025.

<sup>38</sup> En anglais, *Intended nationally determined contributions* (INDC).

<sup>39</sup> En anglais, *National biodiversity strategies and action plans* (NBSAP).

**PRÉCONISATION #1**

Le CESE préconise que la France porte au niveau international le sujet du bilan environnemental des systèmes d'IA, notamment en proposant d'étudier les impacts de l'IA sur la réalisation des objectifs onusiens de développement durable (ODD) et en proposant la mise en place d'un événement de grande envergure, sur le modèle de la COP 21, pour mettre en avant des initiatives exemplaires et à fort impact.

## **B. En matière de recherche et d'innovation sur les IA, concentrer les efforts sur les IA à finalité directement environnementale (« IA for green ») et sur les IA frugales (« Green IA »)**

### **1. La formation initiale et continue**

Pour que les entreprises puissent limiter l'empreinte environnementale de leur activité numérique liée à l'IA, tant dans la conception (ex : des applications) que dans l'usage (ex : des *prompts* efficaces), elles auront besoin d'initier ou de renforcer leurs compétences en la matière. Pour ce faire, les métiers actuels, tels les ingénieurs et experts informatiques, devront intégrer ces exigences d'écoconception et d'usage frugal. À titre d'exemple, la commission des titres d'ingénieur pourrait jouer un rôle moteur pour adapter le cadre de formation intégrant les enjeux de l'empreinte environnementale de l'intelligence artificielle.

Cette commission est chargée de l'accréditation des diplômes et élabore des documents de références et d'orientations (R&O) afin de prendre en considération les évolutions de la société<sup>40</sup>.

**PRÉCONISATION #2**

Les acteurs de la formation initiale et continue, tels que la commission des titres d'ingénieur, devront veiller à intégrer dans les programmes de formation les exigences d'écoconception et d'usage frugal pour les développements et algorithmes d'IA.

<sup>40</sup> Cette commission est prévue par l'article R. 642-5 du code de l'éducation.

## 2. Les financements

Comme il a été dit en introduction, l'IA est actuellement surtout mise au service de domaines tels que la finance, le marketing ciblé, et désormais l'industrie et non pour entraîner et faire fonctionner des algorithmes d'optimisation bénéfiques à l'environnement. À titre d'exemples : les dépenses mondiales en IA dans le marketing étaient estimées à environ 5 milliards de dollars pour l'année 2022, avec une croissance prévue de 30 % par an<sup>41</sup> ; elles étaient estimées pour 2023 à 20 milliards de dollars dans le secteur bancaire<sup>42</sup>.

Dans ces conditions, il est à craindre que manquent les financements pour les IA conçues directement pour protéger l'environnement (« IA for green »). Certains projets, comme Pl@ntNet, choisissent alors délibérément de ne recourir qu'à des financements publics<sup>43</sup> et aux dons afin de maintenir la gratuité de l'accès à l'application.

C'est ce qui justifie l'intervention de financements publics pour des programmes de recherche et d'innovation qui peuvent associer acteurs publics et privés.

De tels problèmes de financement peuvent aussi concerner des projets qui ne pourront être rentables économiquement qu'à plus long terme ou de façon incertaine, et qui pour cette raison risquent de ne pas trouver

de financements privés à hauteur des besoins. Ainsi, la recherche et l'innovation sont décisives pour que les systèmes d'IA soient plus économes en métaux rares et en électricité. À titre d'exemples, la consommation de silicium et d'électricité des calculs par des GPU (*graphic processing unit*<sup>44</sup>), utilisés par l'IA, pourrait être réduite. On peut imaginer des IA « légères », spécialisées par champ d'application et s'inspirant aussi de l'efficacité énergétique du cerveau humain<sup>45</sup> : il ne consomme que 20 watts, comparativement aux 150 000 watts d'AlphaGo, comme l'a rappelé Damien Querlioz, chercheur au CNRS<sup>46</sup>. De même, M3GNet, une IA *open source* développée par l'université de Californie, promet 31 millions de nouveaux matériaux de construction, dont certains très écologiques : développer une telle IA pourrait se justifier, s'agissant d'un secteur aussi consommateur d'énergie et de ressources que le bâtiment.

Déjà, le rapport de la mission Villani soulignait en 2018 l'urgence de « fédérer l'industrie et les chercheurs français et européens du semi-conducteur autour de ces enjeux de recherche et d'expérimentation ». Six ans après, force est de constater que les efforts de recherche n'ont que marginalement porté sur une « IA frugale ». Il est frappant de constater que si la « Feuille de route intelligence artificielle et transition écologique » publiée en 2021 comporte

41 Forbes, *How AI Is Transforming Marketing* (mars 2024).

42 Business Insider, *Banks will spend \$19.5 billion on AI by 2023* (Février 2022).

43 Pl@ntNet est financée par Agropolis, fondation de coopération scientifique, reconnue d'utilité publique, qui regroupe le Cirad, l'Inrae, l'institut Agro de Montpellier et l'IRD.

44 Cf. note 27.

45 Le neuromorphisme est un développement assez récent en électronique, qui s'inspire du cerveau humain et de la spintronique intégrée dans les circuits.

46 Article « Copier le fonctionnement du cerveau pour économiser de l'énergie », paru dans la revue « Techniques de l'ingénieur » (mars 2020). Dans un ordinateur, la quasi-totalité de l'énergie dépensée est consacrée à déplacer des informations ; dans un cerveau, la mémoire est déjà à disposition pour les calculs : les synapses, qui connectent les neurones entre eux, sont les lieux de stockage de la mémoire donc l'information est sur place, d'où une faible consommation d'énergie.



un volet « frugalité », encore trop peu de projets sont déjà en cours<sup>47</sup>. Or, de plus en plus, l'acceptabilité sociale du développement de l'IA sera fondée sur une analyse de l'impact environnemental par rapport aux bénéfices attendus.

L'« IA frugale » pourrait désormais constituer un axe prioritaire du quatrième Programme d'investissements d'avenir (PIA4, 2021-2026)<sup>48</sup> et du plan d'investissement France 2030<sup>49</sup>, qui pourront financer des projets sur cette thématique. De même, la Cour des comptes recommande désormais de davantage intégrer les questions environnementales dans les programmes de recherche conduits dans la dernière phase de la stratégie nationale d'intelligence artificielle<sup>50</sup>.

Plus généralement, on l'a vu, l'IA peut jouer un rôle crucial dans l'accélération de la réalisation des objectifs de développement durable (ODD). Grâce à ses capacités de traitement des données et d'apprentissage automatique, l'IA peut aider à collecter, analyser et interpréter de grandes quantités de données pour éclairer la prise de décision. Une piste de réflexion serait de créer un mécanisme de soutien à la mise en œuvre des projets IA contribuant aux objectifs ODD de la France.

### PRÉCONISATION #3

En matière de recherche et d'innovation sur les IA, concentrer les financements publics sur les projets de développement d'IA « frugales » (« *Green IA* ») et sur les IA à finalité directement environnementale (« *IA for green* »).

47 <https://presse.economie.gouv.fr/france-2030-lia-comme-un-accelereur-et-un-differentiateur-dinnovation/>

<https://list.cea.fr/fr/page/poser-les-bases-scientifiques-pour-des-ia-de-confiance-frugales-embarquees-et-distribuees/>

<https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/pepr-intelligence-artificielle-la-recherche-francaise-la-pointe-95298>

48 Le PIA4 est doté de 20 milliards d'euros pour l'enseignement supérieur, la recherche et l'innovation.

49 Le plan « France 2030 », doté de 54 milliards d'euros déployés sur cinq ans, vise à développer la compétitivité industrielle et les technologies d'avenir.

50 Cour des comptes, *La stratégie nationale de recherche en intelligence artificielle* (avril 2023).

## C. Collecter les données liées à l'environnement et les mettre à disposition des acteurs tout en évitant les usages non souhaitables des données

La réduction de l'impact environnemental des SIA et la maximisation des bénéfices environnementaux supposent d'assurer non seulement la qualité des données mais aussi leur usage frugal (utiliser de manière qualitative moins de données) et la mutualisation des données pertinentes à la transition écologique afin de favoriser la rénovation mutualisée de l'habitat, la valorisation des énergies renouvelables et des déchets, l'efficacité énergétique, les circuits courts, etc. Cet échange de données est d'ores et déjà encadré par le règlement européen sur la gouvernance des données (entré en vigueur en septembre 2023) et bientôt par le règlement européen sur les données (adopté en 2023 ; entrée en vigueur en septembre 2025) qui visent à créer un marché européen des données, qu'elles soient personnelles ou non. Sur cet enjeu, il convient de trouver un équilibre entre les données nécessaires à la conduite du changement et le respect des intérêts concurrentiels des entreprises. Le partage de données doit bénéficier à toutes les parties prenantes et favoriser les investissements de R&D des entreprises.

Cela suppose en premier lieu l'interopérabilité des systèmes mis en place par les opérateurs. C'est également vrai pour l'ensemble des IA contribuant à optimiser la consommation des ressources. Par exemple en agriculture, il s'agit de développer des capteurs interopérables et si possible autonomes au niveau national et européen (en substitution des matériels fournis par les multinationales non européennes).

La collecte et la mutualisation des données doivent être réalisées dans le respect de la protection des données personnelles et de la propriété intellectuelle. Cette problématique, qui dépasse la thématique purement environnementale, sera abordée dans le cadre d'une prochaine saisine du CESE. Précisons dès à présent qu'il s'agit de définir les modalités d'accès en évitant que les données soient utilisées pour moduler les primes d'assurance, alimenter la spéculation sur les produits ou donner lieu à une captation par les acteurs dominants. La Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL), par son laboratoire d'innovation numérique, a commencé à élaborer des fiches précisant comment une organisation peut utiliser des données pour les SIA conformément à la loi du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés et au règlement (UE) du 27 avril 2016 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données (RGPD). En particulier, il est important d'anonymiser les données. C'est le cas par exemple du système d'aide à la gestion du trafic dénommé Odevia, de l'entreprise Odeven, qui se base sur les données GPS des voitures et de la téléphonie mobile afin d'estimer le nombre de véhicules sur la route. Ces données anonymes servent à l'IA pour améliorer la synchronisation des feux tricolores et donc fluidifier la circulation.

## PRÉCONISATION #4

Afin de garantir la fiabilité et rendre possibles la collecte et la mutualisation des données utilisées par les IA, il faut viser l'interopérabilité des systèmes mis en place par les opérateurs, dans le respect de la réglementation sur les données.

## D. Sur base de ces données, évaluer l'empreinte environnementale des usages, de la fabrication à l'utilisation

L'évaluation de l'empreinte environnementale spécifique des SIA est une condition pour responsabiliser l'ensemble des parties prenantes qui concourent à l'offre (les entreprises) et à la demande (les consommateurs, au sens large). L'Ademe a montré, à propos du numérique en général, que la fabrication (notamment des terminaux et des objets connectés) et l'utilisation concentrent souvent près de 100 % de l'impact environnemental (respectivement 71% pour la fabrication et 21% pour l'utilisation<sup>51</sup>). Dans la mesure du possible, et même s'il est difficile de distinguer techniquement ce qui relève d'un usage de l'IA d'un usage simplement numérique, il faudrait généraliser l'évaluation environnementale de l'IA, avec une publication des résultats.

Ceci suppose d'abord d'exiger la transparence des acteurs de l'IA sur les consommations tant pour l'entraînement des modèles que pour leurs usages (inférences).

Il faut *a minima* disposer de données brutes permettant une notation environnementale des systèmes d'IA. Parallèlement, il s'agit de créer un référentiel d'évaluation environnementale des IA, constitué d'indicateurs et de méthodes de mesure de l'empreinte écologique, y compris en amont des usages, qui soient à la fois fiables et partagés. L'évaluation des systèmes d'IA doit intégrer celle de l'efficacité énergétique et, plus largement, de la soutenabilité environnementale. Pour l'élaboration d'un tel « Ecoscore » de l'IA ou « IAScore »... l'IA elle-même pourrait être utilisée. Cette mission de consolidation de la méthode et de compilation et publication des principaux résultats pourrait être confiée à l'Ademe.

<sup>51</sup> <https://infos.ademe.fr/magazine-avril-2022/faits-et-chiffres/numerique-quel-impact-environnemental/>

L'Académie des technologies se porte aussi volontaire pour contribuer à de telles évaluations<sup>52</sup>. Le CNRS dispose d'ores et déjà d'un groupe de réflexion du groupement de service Ecoinfo du CNRS qui vise en particulier à établir une première méthode simple d'estimation de la consommation d'un système d'IA, à compléter par la suite par le cycle de vie des matériels puis, à plus long terme, par les impacts indirects. Vont dans le même sens les initiatives de GreenIT.fr et du collectif « Conception numérique responsable » qui fournissent des comparatifs de services numériques. De même, le Shift Project a publié une étude d'évaluation nommée SMERT4 (*Smart Technologies Energy Relevance Model*) déterminant si l'économie d'énergie réalisée par la technologie mise en place est plus importante que la propre dépense énergétique de cet outil. Par exemple, selon le Shift Project, les lampes connectées qui font varier la luminosité d'une pièce en fonction de la présence de personnes ou non se révéleraient utiles dans le cas d'un usage collectif (des bureaux par exemple) mais pas dans une maison d'habitation.

#### PRÉCONISATION #5

Évaluer l'empreinte environnementale des IA, de la fabrication à l'utilisation, en exigeant des entreprises concernées la transparence sur la consommation des ressources et en construisant un référentiel d'évaluation environnementale garantissant sa légitimité scientifique, politique et démocratique. Cette évaluation permettra aux utilisateurs, citoyens et entreprises, de choisir les IA les plus sobres.

<sup>52</sup> Académie des technologies, *Matières à penser sur la sobriété* (synthèse du séminaire 2022), p. 9 : « L'Académie des technologies peut contribuer à une analyse des bénéfices et des coûts, impacts et risques de diverses options technologiques et promouvoir un meilleur discernement technologique, afin d'informer les choix collectifs sans prétendre les prescrire. »

## E. Sur la base de ces évaluations, choisir les systèmes d'IA et les usages les plus sobres

### 1. Les pouvoirs publics et les entreprises pourraient poser le principe de progrès incrémentaux vers la neutralité environnementale globale des systèmes d'IA.

C'est en effet à un niveau global que la neutralité doit être recherchée, combinant bilan positif et bilan négatif de chaque système pour une enveloppe globale neutre, au niveau par exemple d'une entreprise, d'un établissement public, ou d'un territoire. Cet objectif demande en conséquence une planification raisonnée du déploiement des systèmes d'IA, et la mise en place de mécanismes d'évaluation environnementale objectifs, sincères, et indépendants, pour à la fois dessiner les objectifs et mesurer leur atteinte. L'Ademe, mais aussi la Commission de régulation de l'énergie (CRE) et Réseau de transport d'électricité (RTE), pourraient sans doute jouer un rôle significatif, du moins pour le volet énergétique, en définissant des cadres de référence, des bonnes pratiques, et des modèles d'évaluation.

### 2. L'atteinte de cette neutralité environnementale globale peut passer par différents types de mesures, inspirées de la séquence « éviter, réduire, compenser »

Mise à part l'interdiction possible de certains usages, il y a d'autres moyens pour éviter des usages de l'IA qui seraient nuisibles pour l'environnement.

La définition de l'offre conditionne largement la nature et l'intensité des usages. La conception et l'ergonomie des systèmes génèrent des usages. C'est pourquoi les premières préconisations concernent les concepteurs des SIA et les entreprises.

Une première piste consiste, à propos des nombreux capteurs de données indispensables pour alimenter les IA, d'utiliser dans la mesure du possible les capteurs qui existent déjà pour d'autres usages. Par exemple, pour nourrir un système d'aide à la gestion du trafic, il est tentant de fabriquer de nombreux capteurs et de les installer sur la chaussée. Mais l'impact environnemental de la fabrication, de l'entretien et du renouvellement de ces capteurs est considérable. Il vaut mieux, comme l'application Odevia précitée, tirer parti des données « flottantes » de géolocalisation des téléphones portables et des véhicules.

Lorsque l'évitement n'est pas possible, la réduction des impacts<sup>53</sup> est un moindre mal.

Ainsi, il conviendrait de promouvoir des normes pour favoriser l'écoconception des équipements, notamment les terminaux, dont le renouvellement est accéléré par l'IA. Les entreprises devront écoconcevoir les appareils et, pour certains usages, proposer des appareils moins performants, afin de réduire l'empreinte matière, et recyclables en fin de vie.

Les enjeux consistent ici à promouvoir l'allongement de la durée de vie, à augmenter la durée de maintien en conditions opérationnelles des applications et logiciels. L'IA peut d'ailleurs elle-même aider à ce verdissement de la chaîne de valeur des SIA. Ainsi, en 2016, *Deepmind* a optimisé la consommation énergétique de ses centres de données et de ses systèmes de refroidissement grâce à l'apprentissage machine. Il a ainsi augmenté l'efficacité énergétique de ses centres de données de 15 %<sup>54</sup>. Dans le même esprit, le cabinet de conseil Capgemini recommande aux entreprises : « *Avant de commencer à déployer des cas d'utilisation de l'IA, les organisations doivent évaluer soigneusement l'impact environnemental, sensibiliser davantage et élaborer des solutions d'IA avec des principes fondamentaux d'écoconception, afin de s'assurer que les bénéfices de leurs déploiements d'IA l'emportent sur le coût de leurs émissions* »<sup>55</sup>.

## PRÉCONISATION #6

Intégrer systématiquement la démarche d'écoconception des équipements, notamment les terminaux, dont le renouvellement est accéléré par l'IA, en s'appuyant sur les normes et recommandations existantes.

Du côté de la demande, les usagers (entreprises, administrations, individus) doivent également être responsabilisés. Pour certaines études, c'est même la piste essentielle dès lors que l'IA est principalement « *considérée comme un vecteur de croissance économique par beaucoup de secteurs d'activité et, qu'en l'état, tous les progrès scientifiques dans l'efficacité énergétique des IA seront annulés par effet rebond.* »<sup>56</sup>. En tout état de cause, les pouvoirs publics pourraient informer le public de l'empreinte environnementale des différents usages afin de l'inciter à la frugalité. Les évaluations évoquées plus haut pourraient être traduites en campagnes d'information à destination du public. Elles inciteraient à distinguer « IA utile et IA futile »<sup>57</sup> même si cette distinction est largement subjective. Le ministère de l'éducation nationale pourrait par exemple informer les élèves de l'empreinte environnementale d'un « *prompt* » créant une vidéo. Des démarches de sobriété tendront également à maîtriser

53 Ces impacts pourraient alors être compensés.

54 Exemple cité p. 128 du rapport Villani, partie 4, *L'intelligence artificielle au service d'une économie plus écologique*, novembre 2018.

55 Capgemini, étude *L'IA pour lutter contre le changement climatique - Réduire ses émissions de gaz à effet de serre et améliorer son efficacité énergétique grâce à l'IA* (février 2023).

56 « *Les défis d'une IA frugale* », CNRS Le journal, 24 novembre 2023.

57 Expression d'Arnault Pachot et Céline Patissier dans leur ouvrage *Intelligence artificielle et environnement : alliance ou nuisance ?* (2022).

l'augmentation du nombre d'écrans par personne, et à inciter au recours à des appareils reconditionnés, plutôt que l'achat de neuf<sup>58</sup>. Il s'agit donc d'encourager les « écogestes IA » pour éviter une surutilisation.

Au croisement de l'offre et de la demande, les utilisateurs devraient avoir systématiquement la possibilité de déconnecter sur leurs applications les usages d'IA et la collecte de données, ce qui suppose qu'au stade de la conception et du paramétrage cette possibilité soit offerte. Ainsi, les utilisateurs auraient les moyens de répondre eux-mêmes à la question : « A-t-on vraiment besoin de l'IA générative partout ? ».

#### PRÉCONISATION #7

Responsabiliser les usagers par des campagnes d'information générales et spécifiques sur l'empreinte environnementale des IA et leur garantir la possibilité de déconnecter sur leurs applications les usages d'IA et la collecte de données.

Dans le même esprit, les entreprises comme les pouvoirs publics pourraient intégrer le critère de l'empreinte environnementale dans leurs décisions de recourir à un

SIA : arbitrage entre l'achat et la conception en interne ; critères de l'achat et choix internes de conception. A-t-on réellement besoin d'un modèle totalement nouveau ou peut-on utiliser un système déjà sur le marché et, le cas échéant, quel est l'impact d'un éventuel réentraînement ? A-t-on besoin de concevoir un modèle aussi complexe au regard de l'enjeu ou peut-on se contenter d'un modèle plus fruste, donc aussi plus « frugal » sur le plan environnemental ? Dans tous les cas, une évaluation sommaire de l'impact environnemental, tenant compte de l'intégralité du cycle de vie, devrait être menée, afin d'alimenter le bilan global.

Le dialogue social dans les entreprises et les administrations jouera un rôle central pour encourager des usages de l'IA plus responsables de l'intégration à l'utilisation.

À noter que les entités qui conçoivent et entraînent leurs propres modèles d'IA sont les mieux placées pour s'engager dans cette démarche de sobriété. Par exemple, l'IA de Pl@ntNet est régulièrement réentraînée, mais tous les mois et non tous les jours, afin de prendre en compte les nouvelles données fournies par les utilisateurs<sup>59</sup>. Ce réentraînement seulement mensuel permet de limiter la consommation d'énergie et les émissions de carbone.

58 CESE, avis *Consommation durable : favoriser une économie de la sobriété pour passer de la prise de conscience aux actes* (juillet 2023).

59 Les utilisateurs ayant créé un compte sur Pl@ntNet peuvent partager leurs observations et celles-ci peuvent être révisées par la communauté et utilisées par l'IA pour lui apprendre à reconnaître les plantes. Il est par exemple possible de confirmer le nom d'une espèce ou bien de suggérer une autre détermination si l'on s'y connaît un peu en botanique. Seules les observations qui atteignent un degré de confiance suffisant sont ensuite ajoutées à la base de données publique et utilisées pour l'entraînement de l'IA.

**3. En particulier, à court terme, une série de mesures sont applicables aux centres de données : objectif de zéro artificialisation nette ; efficacité énergétique et utilisation d'une électricité le plus possible décarbonée ; récupération de la chaleur fatale.**

À propos des centres de données, les pouvoirs publics devront faire respecter l'objectif de zéro artificialisation nette pour les sites de traitement et de stockage. Une planification des besoins d'espace, répondant aussi à l'exigence de protection de la souveraineté française, en laissant sur le territoire national celles des données dont l'intégrité est estimée essentielle à la défense de nos intérêts, et de ceux de la population, devrait conduire à subordonner le développement de ces lieux à l'objectif gouvernemental d'arrêt de l'artificialisation des sols. C'est donc dans la réutilisation des anciens sites, en apportant un soin particulier à l'insertion dans le tissu urbain ou rural de bâtiments dont l'attractivité architecturale et la contribution à l'animation ne sont pas les qualités premières, que réside un développement acceptable et durable des sites de stockage.

**PRÉCONISATION #8**

Pour les projets d'implantation de centres de données, les pouvoirs publics devront veiller à faire respecter l'objectif de zéro artificialisation nette, notamment par l'utilisation de sites déjà artificialisés.

Les pouvoirs publics pourraient n'avoir recours qu'à des fournisseurs de *clouds* écologiques et européens. Ces fournisseurs seraient écologiques, *via* un label qui pourrait être créé par l'Ademe ; européens, car les grands espaces de calcul et de stockage sont plus optimaux sur le plan environnemental. Pour rappel, l'article 10 du décret 25 mars 2016 relatif aux marchés publics autorise déjà des clauses environnementales.

En matière d'efficacité énergétique et de bilan carbone des centres de données, il serait intéressant de prendre en compte les travaux élaborés au niveau européen en la matière. En effet, la nouvelle directive relative à l'efficacité énergétique<sup>60</sup>, cinq ans après sa première révision en 2018 et onze ans après sa publication initiale en 2012, introduit l'obligation de rendre compte de la performance énergétique et de la durabilité des centres de données. En application de cette directive, la Commission européenne a publié en mai 2024 un règlement délégué sur l'efficacité énergétique des centres de données, qui définit les informations que les exploitants de ces centres doivent fournir à la base de données européenne lorsque la puissance demandée par les technologies installées est supérieure à 500 kW. Ces informations doivent contribuer à construire le futur système de notation de durabilité de ces installations. Il serait utile de prendre en compte cette notation dans le choix des centres de données par les entreprises et les administrations.

À noter qu'une innovation pourrait à l'avenir diminuer drastiquement l'empreinte environnementale des centres de données : le stockage de données numériques dans l'ADN de synthèse. Il semble que Biomemory, start-up

<sup>60</sup> Directive (UE) 2023/1791 du 13 septembre 2023 relative à l'efficacité énergétique et modifiant le règlement (UE) 2023/955 (refonte).



française issue des laboratoires de la Sorbonne et du CNRS, a développé ce procédé unique au monde. Les 64 zettaoctets<sup>61</sup> de données numériques de l'humanité entière en 2020 ( $6,4 \times 10^{13}$  gigaoctets) actuellement stockées dans des millions de centres de données pourront l'être « sur seulement 200 grammes d'ADN »<sup>62</sup> ne nécessitant aucun apport énergétique pour la conservation. Afin que ce type de technologie reste souveraine, il faudra parvenir à mobiliser assez de financement au sein même de l'Europe<sup>63</sup>.

Enfin, la récupération de la chaleur fatale devrait être systématisée afin de compenser une partie de l'empreinte environnementale des SIA. Ainsi, l'Établissement public d'aménagement Paris-Saclay a signé une convention avec le CNRS pour récupérer la chaleur produite par le supercalculateur Jean Zay, permettant de récupérer l'équivalent de la consommation en chaleur de 1 000 logements. Le centre de données d'Infomaniak à Genève a été construit au sous-sol d'un ensemble de logements qu'il alimente en chaleur, celui d'Equinix chauffe la piscine olympique de Saint-Denis, celui de la banque Natixis alimente les réseaux de Marne-La-Vallée. Des solutions existent également pour récupérer la chaleur fatale sous forme de production électrique.

### PRÉCONISATION #9

Dès l'origine des projets d'implantation de centres de données (data centers), l'usage du système européen de notation de durabilité de ces centres et le principe de récupération de la chaleur fatale devront être intégrés.

En conclusion, il ne fait aucun doute que les IA et leurs applications vont connaître une croissance importante. Comme le montre cet avis, cette croissance ne sera possible qu'avec le développement d'une infrastructure dédiée qui nécessite d'être planifié pour en limiter les impacts. Les alertes sur l'empreinte environnementale de l'IA et les opportunités liées à ses usages pourront s'intégrer à l'avis que le CESE publiera dès le début de 2025 sur les enjeux de l'IA.

61 Unité de mesure de quantité d'information numérique valant  $10^{21}$  octets.

62 Selon Stéphane Lemaire, directeur de recherche CNRS au Laboratoire de Biologie Computationnelle Quantitative (LCQB, CNRS / Sorbonne Université), cofondateur et directeur scientifique de Biomemory.

63 Article *Comment Biomemory va stocker nos données numériques dans l'ADN de synthèse* paru dans le journal Les Echos (octobre 2023).



# Déclarations des groupes

IMPACTS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE :  
RISQUES ET OPPORTUNITÉS POUR L'ENVIRONNEMENT

Agir autrement pour  
l'innovation sociale  
et environnementale



# Déclarations des groupes

IMPACTS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE :  
RISQUES ET OPPORTUNITÉS POUR L'ENVIRONNEMENT



# Scrutin

**Scrutin sur l'ensemble de l'avis.  
Le CESE a adopté.**

**Nombre de votantes  
et de votants : 114**

**Pour : 114**

**Contre : 0**

**Abstention : 0**

## Ont voté pour

GROUPE

COMPOSITION

**Ont voté contre**

GROUPE	COMPOSITION
--------	-------------

--	--

**Se sont abstenu.e.s**

GROUPE	COMPOSITION
--------	-------------

--	--



# Annexes

1

## Composition de la commission Environnement à la date du vote

### Président

Sylvain BOUCHERAND

### Vices-Présidents

Evanne JEANNE-ROSE  
Gilles VERMOT  
DESROCHES

### Agir autrement pour l'innovation sociale et environnementale

Claire TUTENUIT

### Agriculture

Antoine AMÉCOURT (d')  
Thierry COUÉ  
Alain DURAND  
Pascal FERÉY

### Alternatives sociales et écologiques

Eric MEYER

### Artisanat et professions libérales

Aminata NIAKATÉ

### Associations

Martin BOBEL  
Benoît MIRIBEL  
Jean-Pascal THOMASSET

### CFDT

Soraya DUBOC  
Pascal GUIHÉNEUF  
Marie-Hélène MEYLING  
Albert RITZENTHALER

### CFTC

Eric HEITZ

### CGT

Claire BORDENAVE  
Fabienne ROUCHY  
Fabienne TATOT

### CGT-FO

Béatrice CLICQ  
Hervé QUILLET

### Entreprises

Pierre GOGUET  
Catherine GUERNIOU  
Nadine HAFIDOU  
Gilles VERMOT  
DESROCHES

### Environnement et nature

Sylvain BOUCHERAND  
Julie MARSAUD  
Élodie MARTINIE-  
COUSTY  
Nicolas RICHARD

### Familles

Marie-Josée  
BALDUCCHI

### Non Inscrits

Corine BEAUFILS

### Organisations étudiantes et des mouvements de jeunesse

Evanne JEANNE-ROSE

### Outre-mer

Ghislaine ARLIE  
Hélène SIRDER

### UNSA

Fanny ARAV

## 2

## Listes des personnes auditionnées et rencontrées

### **Laura Letourneau**

Directrice de programme Numérique et transformation publique au Secrétariat général à la planification écologique (SGPE)

### **Jacques Sainte-Marie**

Adjoint au directeur scientifique d'Inria en charge de l'environnement, responsable de l'équipe ANGE à l'université de la Sorbonne

### **Arnault Pachot**

Co-auteur de l'ouvrage « Intelligence artificielle et environnement : alliance ou nuisance ? », chercheur et entrepreneur

### **Pierre Bonnet**

Cadre scientifique au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) et coordinateur de l'initiative PI@ntNet

### **Alexis Joly**

Directeur scientifique et technique de la plateforme PI@ntNet

### **Karine Levêque-Lhote**

Présidente du Groupe IA de la Fédération Française du Bâtiment (FFB)

### **Raphaël Guastavi**

Directeur adjoint de la direction économie circulaire de l'Ademe

### **Gilles Babinet**

Coprésident du Conseil national du numérique (CNN), défenseur du numérique de la France auprès de la Commission européenne, contributeur à l'ouvrage collectif « L'important c'est le CO<sub>2</sub> »

### **Masa Kageyama**

Directrice de recherche au CNRS, responsable de la modélisation du climat au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), coresponsable du programme TRACCS (transformer la modélisation du climat pour les services climatiques) du CNRS et de Météo France

### **Vincent Courboulay**

Maître de conférences en informatique à La Rochelle Université, cocréateur de l'Institut du numérique responsable

### **Anne-Laure Ligozat**

Professeure en informatique au LISN et à l'ENSIIE, maîtresse de conférences en informatique à l'ENSIIE et référente développement durable du LISN

### **Jérôme Bailly**

Directeur innovation, recherche et services chez Suez

### **Frédéric Tran Kiem**

Directeur Digital et Innovation Groupe RATP

### **Alexandre d'Aspremont**

Co-fondateur de Kayrros, directeur de recherches au CNRS

### **Katya Lainé**

Administratrice et présidente de la commission IA de Numeum, CEO de la société Talkr.ai

### **Atef Ben Othman**

Délégué aux usages numériques IA de Numeum

### **Clément Emine**

Délégué aux Affaires publiques de Numeum

### **Nicolas Arnaud**

Directeur de l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS, directeur scientifique référent pour les sites de PSL, Lille et Paris Est

### **Frédéric Huynh**

Directeur de l'Infrastructure de Recherche Dataterra, la e-infra française en charge des données de l'environnement, de leur curation, et de leur service à l'IA

**Samuel Morin**

Chercheur et directeur du CNRM,  
unité de recherche CNRS/  
MétéoFrance

**Philippe Stoop**

Directeur recherche et innovation ITK,  
membre de l'Académie d'Agriculture  
de France

**Jérémie Wainstain**

Fondateur de TheGreenData,  
cofondateur et directeur scientifique  
de Carbon Maps

## 3

### Définition et histoire de l'IA

#### **L'intelligence artificielle (IA) : brève histoire et essai de définition**

Dès 1950, le mathématicien et cryptologue britannique Alan Turing s'est intéressé à la capacité d'une machine à imiter une conversation. Durant plusieurs décennies, cette aptitude n'était pas suffisante pour tromper un humain, qui savait distinguer une conversation simulée d'une conversation réelle.

En 1956, Marvin Minsky (1927-2016), professeur au MIT, crée l'expression « intelligence artificielle » au cours d'un colloque dans le New Hampshire (Etats-Unis). Il la définit comme la « construction de programmes informatiques capables d'accomplir des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisantes par des êtres humains. » Des programmes de recherche et développement s'enclenchent, dans des domaines très différents, afin de faire accomplir divers tâches par des programmes informatiques.

Par la suite, le système américain Mycin de diagnostic de maladies du sang et de prescription (années 1970), la construction du premier véhicule à conduite autonome Navlab (1986), la victoire de la machine Deep Blue sur le champion du monde d'échec Gary Kasparov (1997), l'assistant virtuel Siri intégré aux portables iPhone (2011), la défaite du champion mondial Ke Jie au jeu de go face à la machine AlphaGo (2017) ou le robot conversationnel ChatGPT (2023) ont tous été décrits comme de l'intelligence artificielle.

**Il faut toutefois distinguer l'IA symbolique de l'IA statistique dont la forme la plus achevée est l'IA générative.**

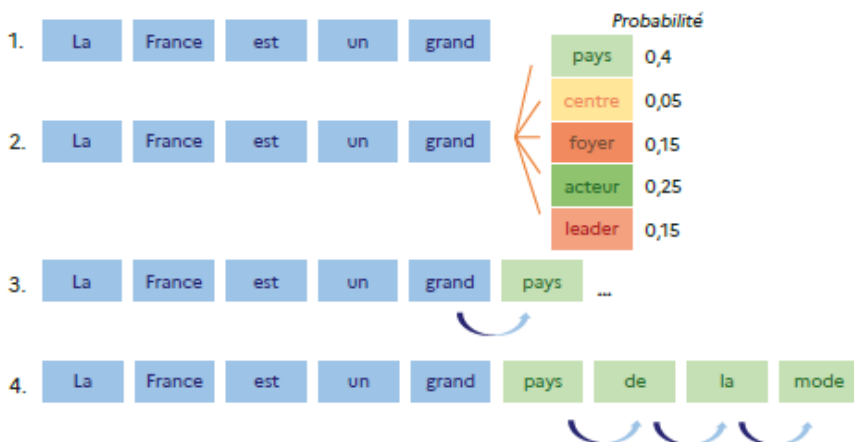
L'IA s'est d'abord développée sous la forme de règles déductives du type « si... alors ». Cette approche dite symbolique, fondée sur le raisonnement et des instructions, était largement majoritaire jusque dans les années 1990.

Sans que cette approche symbolique soit abandonnée, une approche statistique de l'IA a pris de l'ampleur à compter des années 1990 : l'apprentissage automatique, également appelé apprentissage machine. Contrairement à l'approche symbolique, l'humain ne détermine pas un ensemble de règles « si... alors ». Il veille à ce que l'ordinateur « apprenne » à identifier des relations statistiques entre les données. Il n'y a donc pas d'instruction explicite d'un humain : la machine est entraînée à reconnaître des liens à partir d'un ensemble de données dites d'entraînement. La machine applique ensuite ces liens à des données nouvelles pour effectuer une tâche.

#### **Exemple de fonctionnement d'une IA générative**

Prenons le cas particulier de la génération de texte. Lorsque l'on adresse la requête « Complète la phrase suivante : La France est un grand (...) », le modèle de langue commence par décomposer cette requête en une série d'unités élémentaires de texte appelées token. Un token correspond à une série de quelques lettres qui ne forment pas toujours des mots complets. Pour simplifier, associons un token à chaque mot : « La », « France », « est », « un », « grand ».

## 0. La France est un grand



# 4

## Table des sigles

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
Afnor	Association française de normalisation
AI Act	Loi européenne sur l'intelligence artificielle
AIE	Agence internationale de l'énergie
Arcep	Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse
BCG	Boston Consulting Group, cabinet international de conseil en stratégie
BIM	Building information modeling - modélisation des informations du bâtiment
CAAD	Climate Action Against Disinformation - climat et la lutte contre la désinformation
Chatbot	Agent conversationnel
Chat GPT	Chat Generative Pre-trained Transformer, agent conversationnel utilisant l'intelligence artificielle générative, développé par OpenAI et spécialisé dans le dialogue. Il s'appuie sur les grands modèles de langage d'OpenAI GPT-3.5, GPT-4 et le plus avancé GPT-4o
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CLP	Classification, Labelling, Packaging, règlement relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges
CNIL	Commission nationale de l'informatique et des libertés
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
COP21	21 <sup>ème</sup> Conférence des Parties sur les changements climatiques, s'est tenue à Paris
COP28	28 <sup>ème</sup> Conférence des Parties sur les changements climatiques, s'est tenue à Dubaï
<i>Choose France</i>	Programme de recherche, initié par le CNRS
ESPR	Ecodesign for Sustainable Products Regulation, législation de l'Union européenne qui vise à promouvoir la durabilité des produits en intégrant des critères environnementaux dès la phase de conception
G7	Groupe des sept, groupe de discussion et de partenariat économique
GAFAM	Entreprises du Web : Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft
GAP	Global Action Plan
GES	Gaz à effet de serre
GPU	Graphics Processing Unit - unité de traitement graphique
GPS	Global Positioning System
Green IT	Collectif des experts de la sobriété numérique et du numérique responsable
HCNE	Haut Comité pour le Numérique Écoresponsable
IA	Intelligence artificielle
IAG	Intelligence artificielle générale

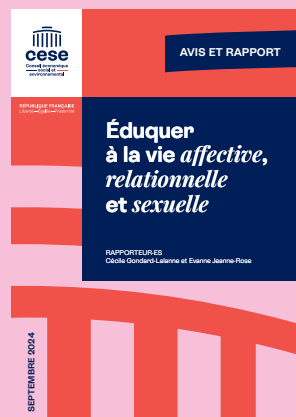
Ifremer	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
INRAE	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
<i>IoT</i>	Internet of Things, décrit le réseau de terminaux physiques
IRD	Institut de recherche pour le développement
LLM	Large language model, modèles d'apprentissage automatique capables de comprendre et de générer des textes en langage humain
Loi AGECE	Loi anti-gaspillage et économie circulaire
Loi Climat et résilience	Loi portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets
Loi REEN	Loi qui vise à limiter l'impact écologique des technologies numériques en encourageant une utilisation plus responsable et durable
MACF	Mécanisme d'ajustement carbone aux frontières
MaPrime Rénov	Permet de financer les dépenses engagées pour les travaux d'amélioration de la performance énergétique de votre logement
<i>MIT</i>	Massachusetts Institute of Technology
<i>NIST</i>	National Institute of Standards and Technology
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ODD	Objectifs de développement durable
Open IA	Entreprise spécialisée dans le raisonnement artificiel, à but lucratif plafonné
Pacte vert pour l'Europe	Mesures importantes pour faire face aux risques climatiques
RFID	Radio frequency identification - Radio Fréquence Identification
RGPD	Règlement général de protection des données
RTE	Réseau de transport d'électricité
SIA	Service de l'intelligence artificielle de la CNIL
SHOM	Service hydrographique et océanographique de la marine nationale
SMERT4	Smart Technologies Energy Relevance Model
SNBC	Stratégie Nationale Bas-Carbone
SNIA	Stratégie nationale pour l'intelligence artificielle
<i>The Shift Project</i>	Think tank qui oeuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone







# Dernières publications du Conseil économique, social et environnemental



Retrouvez l'intégralité des travaux du CESE sur le site

[cece.fr](https://cece.fr)

## Retrouvez le CESE sur les réseaux sociaux



Imprimé par la Direction de l'information légale et administrative, 26, rue Desaix, Paris 15<sup>e</sup>, d'après les documents fournis par le Conseil économique, social et environnemental • N° 411230014-000924 - Dépôt légal : septembre 2024 • Crédit photo : Dicom

# lecese.fr

9, place d'Iéna  
75 775 Paris Cedex 16  
01 44 43 60 00



**PREMIER  
MINISTRE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

Direction de l'information  
légale et administrative



*Les éditions des*  
**Journaux officiels**

N° 41124-0014

ISSN 0767-4538 ISBN 978-2-11-077573-3



9 782110 775733