

ÉDITION SPÉCIALE

L'intelligence artificielle au service de l'énergie, de l'eau et des déchets

Opportunités, défis et retours d'expérience



PRODUITE CONJOINTEMENT PAR

INSTITUT
 VEOLIA

 Microsoft

Une publication conjointe

Cette publication intitulée « **L'intelligence artificielle au service de l'énergie, de l'eau et des déchets** » est le fruit d'une collaboration entre l'Institut Veolia et Microsoft.

Ce rapport produit conjointement offre un aperçu complet du potentiel de l'intelligence artificielle pour la gestion de l'énergie, de l'eau et des déchets – désignée ci-après par services environnementaux. Il vise à caractériser et, dans la mesure du possible, à quantifier les avantages et les coûts de l'intelligence artificielle à cette fin.

Il s'agit d'une publication interdisciplinaire qui rassemble et partage les expériences et l'expertise de différentes parties prenantes, notamment de chercheurs, de dirigeants et de décideurs politiques issus du monde universitaire, du secteur privé et de la société civile. Ces regards croisés, également complétés par des points de vue d'experts ainsi que plusieurs études de cas, permettent d'explorer les dernières avancées et meilleures pratiques dans ce domaine, d'obtenir une vue d'ensemble des connaissances actuelles, tout comme des lacunes qu'il reste à explorer.

L'Institut Veolia

Plateforme d'échanges et de débats, l'**Institut Veolia** mène un travail prospectif sur les enjeux au carrefour de l'environnement et de la société, depuis sa création en 2001.

Sa mission est de proposer des regards croisés pour éclairer le futur. En lien avec la communauté académique internationale, l'Institut Veolia apporte des éclairages multidisciplinaires sur le monde en mutation. Il analyse les enjeux environnementaux et sociétaux des prochaines décennies, notamment ceux liés à l'évolution des modes de vie urbains et aux modes de production et consommation durables (villes, services urbains, environnement, énergie, santé, agriculture, etc.).

Au fil des ans, l'Institut Veolia a tissé un réseau international de haut niveau, formé d'experts, intellectuels et scientifiques, d'universités et d'organismes de recherche, d'autorités publiques, d'ONG, d'organisations internationales, etc. L'Institut intervient via ses publications et ses conférences ainsi que ses groupes de réflexion prospectifs. Reconnu comme une plateforme légitime sur les enjeux globaux, l'Institut Veolia a été admis comme « Observateur ONG » par la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC).

Grâce à la réputation internationale de ses membres et à leur expertise, le Comité de prospective guide les travaux et le développement de l'Institut.

Ses membres actuels sont :

- **Philippe Aghion**, Économiste professeur au Collège de France et à la London School of Economics, prix Nobel d'Économie 2025
- **Harvey Fineberg**, Président de la Gordon and Betty Moore Foundation et ancien Président de l'Académie nationale de médecine des États-Unis ;
- **Pierre-Marc Johnson**, Avocat international et ancien Premier Ministre du Québec ;
- **Philippe Kourilsky**, Directeur général honoraire de l'Institut Pasteur ;
- **Amy Luers**, Directrice des sciences du développement durable de Microsoft ;
- **Mamphela Ramphele**, ancienne Directrice générale de la Banque Mondiale ;
- **Marie-Laure Salles-Djelic**, Directrice de l'Institut de hautes études internationales et du développement et Présidente du Conseil scientifique de l'Iddri.

www.institut.veolia.org

Microsoft

Microsoft associe des engagements ambitieux, des partenariats stratégiques et la puissance transformatrice de l'IA afin d'accélérer les progrès vers un avenir durable partagé. Grâce à des technologies fondées sur l'intelligence artificielle (IA), Microsoft œuvre à accélérer la protection de la biodiversité, l'accès à une énergie propre et l'efficacité dans l'utilisation des ressources, et s'engage à travailler de manière collaborative pour promouvoir un usage responsable de l'IA au service de solutions de durabilité accessibles à tous.

Ce rapport spécial a été élaboré avec le soutien et en partenariat avec l'AI Economy Institute (AIEI), le *think tank* de référence de Microsoft dédié à la construction d'une économie de l'IA inclusive et digne de confiance. À travers des appels ouverts à la recherche, l'AIEI développe un réseau mondial de chercheurs menant des travaux indépendants et les met en relation avec des experts de Microsoft afin d'analyser la manière dont l'intelligence artificielle transforme le travail, l'éducation et la productivité. L'institut rend cet ensemble croissant de connaissances accessible aux décideurs publics, aux acteurs de l'éducation et aux dirigeants, afin de soutenir une prise de décision éclairée.

Le rapport *L'IA au service de l'énergie, de l'eau et des déchets* se concentre sur la diffusion de l'IA au sein du secteur des services environnementaux. Il s'agit du premier rapport sectoriel publié par l'AIEI.

La mission de l'AIEI est de produire des recherches opérationnelles et des recommandations de politiques publiques permettant aux sociétés, aux gouvernements et aux organisations de s'adapter de manière volontaire et réfléchie aux transformations induites par l'IA, à travers :

Recherche et analyses

L'AIEI soutient des études interdisciplinaires sur les impacts économiques et sociaux de l'IA, donnant lieu à des articles évalués par des pairs et à des ouvrages de référence, traduits en feuilles de route pour les politiques publiques et en cadres pratiques.

Réseau collaboratif

Grâce à des appels à projets, des ateliers et des partenariats internationaux, l'AIEI rassemble un large éventail d'expertises afin d'accélérer le partage des connaissances et l'innovation.

L'intelligence artificielle transforme les économies plus rapidement que toute technologie antérieure. L'AIEI existe pour faire en sorte que cette transformation renforce les opportunités, la confiance et une prospérité partagée.

www.microsoft.com

Chaque contribution à ce rapport a été rédigée de manière indépendante par un chercheur ou un expert concerné. Les opinions exprimées sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de l'Institut Veolia ou de Microsoft. Les contributeurs ont bénéficié d'un soutien éditorial et certains ont reçu des honoraires de Microsoft pour leur participation.

Sommaire

4 AVANT-PROPOS

Estelle Brachlianoff,
Directrice générale, Veolia

Brad Smith,
Vice-président du CA et Président, Microsoft

5 INTRODUCTION

Melanie Nakagawa,
*Directrice du Développement durable,
Microsoft*

Dinah Louda,
Présidente, Institut Veolia

INVESTIR DANS L'IA AU SERVICE DE LA DURABILITÉ

I. INVESTIR DANS L'IA POUR ACCÉLÉRER LES SOLUTIONS DE DURABILITÉ

8

IA et changement climatique : Comment l'IA peut-elle contribuer aux objectifs d'efficacité énergétique dans l'industrie ?

Mathias Abitbol,
Collège de France

Philippe Aghion,
Collège de France, INSEAD, et la London School of Economics, Prix Nobel d'Économie 2025

Céline Antonin,
OFCE

Lint Barrage,
ETH Zurich

14

L'écosystème intelligent : Comment nous préparons l'avenir des services environnementaux grâce à l'IA

Stuart Stock,
Veolia

20

Tirer parti de l'IA pour décarboner le secteur de l'énergie : Opportunités, défis et recommandations

Nilushi Kumarasinghe,
Future Earth Canada

Ursula Eicker,
Université Concordia

Shahin Masoumi-Verki,
Concordia University

Kathryn Kaspar,
Université Concordia

Suchit Ahuja,
Université Concordia

Damon Matthews,
Université Concordia

26

L'IA au service de la gestion énergétique des bâtiments : Défis et opportunités

Nofri Yenita Dahlan,
Universiti Teknologi MARA

Nurul Aqilah Mahmud,
Universiti Teknologi MARA

34

Les matériaux : un fondement essentiel de la transition vers la durabilité. Accélérer la découverte de matériaux durables

Bichlien H Nguyen,
Microsoft Research

DONNÉES ET INFRASTRUCTURES

II. DÉVELOPPER DES INFRASTRUCTURES NUMÉRIQUES ET DE DONNÉES POUR UNE IA DURABLE

40

Enjeux des données pour les applications d'IA environnementale

Hamed Alemohammad,
Université Clark

48

Infrastructure de données : Comment développer les services environnementaux basés sur l'IA

David Bamidele Olawade,
University of East London

UTILISATION DES RESSOURCES, ÉNERGIE DECARBONNÉE ET COMMUNAUTÉS LOCALES

III. RÉDUIRE L'USAGE DES RESSOURCES, ÉLARGIR L'ACCÈS À L'ÉNERGIE DECARBONNÉE ET SOUTENIR LES COMMUNAUTÉS LOCALES

58

Comprendre la consommation énergétique de l'IA

Jonathan Koomey,
Koomey Analytics

Eric Masanet,
Université de Californie, Santa Barbara

64

IA et eau : Vers un avenir numérique durable

Ana Pinheiro Privette,
Université de l'Illinois, Urbana-Champaign

POLITIQUES PUBLIQUES ET GOUVERNANCE

IV. RENFORCER LES POLITIQUES PUBLIQUES ET LA GOUVERNANCE DE L'IA AU SERVICE DE LA DURABILITÉ

74

Gouverner la double transition pour un avenir compatible avec la planète

Francesca Larosa,
KTH Royal Institute of Technology

80

Gouvernance des données pour l'intelligence artificielle dans la lutte contre le changement climatique

Masaru Yarime,
Université des sciences et technologies de Hong Kong

RENFORCER LES COMPÉTENCES

V. RENFORCER LES COMPÉTENCES POUR MOBILISER L'IA AU SERVICE DE LA DURABILITÉ

86

Durabilité et IA : Les signaux de la main-d'œuvre issus de la double transition

Rosie Hood,
LinkedIn

92

Repenser les compétences, l'IA et l'avenir du travail en Afrique

Nanjira Sambuli,
Fondation Carnegie pour la paix internationale

96

Former à l'intelligence artificielle chez Veolia : Défis et stratégie

Anne Du Crest,
Veolia

Mélanie Macé,
Veolia

Morgane Vidal,
Renault, ex Veolia

100 RÉFÉRENCES ET NOTES

Avant-propos



L'intelligence artificielle est en train de s'imposer comme un moteur majeur de la transformation écologique. Depuis plusieurs années, elle est mise au service de la gestion de l'eau, des déchets, de l'énergie, de la qualité de l'air, de la résilience face aux catastrophes naturelles, de l'agriculture urbaine et de nombreux autres domaines. Combinée aux outils traditionnels, elle peut être une source majeure de création de valeur: elle améliore l'efficacité opérationnelle des interventions et ouvre la voie à de nouveaux services. En soutenant des décisions plus éclairées, dans les activités courantes comme face aux situations de crise, l'IA s'impose aujourd'hui comme un levier stratégique au service des transitions environnementales. Et nous utilisons à chaque fois des outils dont nous avons vérifié que le bénéfice était plus élevé que l'empreinte environnementale associée.

Estelle Brachlianoff,
Directrice générale de Veolia

Alors que nous explorons les questions que l'intelligence artificielle soulève pour les sociétés du monde entier, une conclusion s'impose : aucune entreprise ni institution ne détient à elle seule toutes les réponses. Nous espérons que ce rapport contribuera à approfondir la compréhension des besoins en ressources de l'IA, ainsi que de son potentiel pour construire un avenir fondé sur l'intelligence artificielle qui soit inclusif, digne de confiance et durable.

Brad Smith
Vice-président du conseil d'administration et Président de Microsoft



Introduction

Melanie Nakagawa

Directrice du développement
durable de Microsoft

Dinah Louda

Présidente de l'Institut
Veolia

Gérer les systèmes les plus vitaux de la planète – l'énergie, l'eau et les déchets – n'a jamais été aussi complexe. La croissance de la demande, le durcissement des normes environnementales, les perturbations climatiques, la raréfaction des ressources naturelles et l'interdépendance de ces systèmes soulèvent des défis face auxquels les approches traditionnelles sont plus limitées.

L'intelligence artificielle (IA) offre une nouvelle manière de faire face à cette complexité, en permettant de prédire, d'optimiser et d'accélérer les solutions à une échelle jusqu'alors inimaginable.

L'IA évolue à une vitesse extraordinaire et ses implications pour la durabilité – positives comme négatives – continuent d'émerger. Comme toute nouvelle technologie puissante, son développement et son déploiement soulèvent des choix stratégiques complexes, notamment en ce qui concerne les impacts environnementaux liés à la consommation d'énergie et d'eau de l'IA.

Dans un secteur en mutation rapide, suivre le rythme des opportunités et des défis exige un apprentissage continu – fondé sur l'expérimentation, l'analyse et le partage d'enseignements entre secteurs et disciplines.

Ce rapport s'inscrit dans un parcours d'apprentissage collectif. Coproduit par l'Institut Veolia et Microsoft, il rassemble les points de vue de chercheurs et de praticiens du monde entier afin d'examiner la manière dont l'IA est mise en œuvre dans la gestion de l'énergie, de l'eau et des déchets – ainsi que les conditions nécessaires à son déploiement à grande échelle.

À travers des cas d'usage concrets, les articles explorent les opportunités offertes par l'IA ainsi que les défis qu'elle soulève, qu'ils concernent la maturité technologique, la gouvernance, les ressources ou l'équité.

Les articles sont structurés autour des cinq leviers du [Playbook AI and Sustainability](#) de Microsoft :

- (1) Investir dans l'IA pour accélérer les solutions de durabilité
- (2) Développer des infrastructures numériques et de données pour un usage inclusif de l'IA au service de la durabilité
- (3) Réduire l'usage des ressources, élargir l'accès à l'électricité décarbonée et soutenir les communautés locales
- (4) Faire progresser les principes de politique publique et de gouvernance de l'IA au service de la durabilité
- (5) Renforcer les compétences de la main-d'œuvre pour l'usage de l'IA au service de la durabilité

Ces priorités font émerger plusieurs thèmes :

Défis, arbitrages et incertitudes. Si l'IA recèle un potentiel majeur pour accélérer les solutions durables, elle comporte aussi des risques qui appellent une gestion rigoureuse. Savoir arbitrer est essentiel pour garantir que les bénéfices l'emportent sur les conséquences non intentionnelles, dans un contexte où les technologies évoluent rapidement et où de nouveaux défis émergent.

Gouvernance, politiques publiques et garde-fous. Des cadres de gouvernance solides sont indispensables pour aligner le développement de l'IA avec les objectifs de durabilité en matière de gestion de l'énergie, de l'eau et des déchets. Cela passe par une collaboration entre industries, secteurs et régions, ainsi que par une coopération internationale visant à définir des normes et des mécanismes de responsabilité communs.

Équité et inclusion. Ces principes doivent guider le développement de l'IA afin d'éviter de porter préjudice aux communautés marginalisées, de prévenir l'aggravation de la fracture numérique et de garantir que ses bénéfices contribuent pleinement aux objectifs de durabilité. Un accès équitable aux ressources et aux données est déterminant pour un développement inclusif. Enfin, l'intégration des contextes locaux dans la mise en œuvre est essentielle pour que les solutions répondent aux besoins des communautés et favorisent des pratiques équitables à l'échelle mondiale.

Confiance, transparence et responsabilité. Instaurer la confiance dans l'IA au service de la durabilité repose sur l'ouverture et la collaboration. La démocratisation et l'interopérabilité doivent être intégrées aux solutions d'IA afin de favoriser des progrès partagés. La transparence et le reporting sont essentiels pour établir la confiance et la redevabilité. L'intégration de principes de durabilité dès la conception et le déploiement des solutions d'IA contribuera à renforcer une innovation responsable.

Préparation technique et infrastructures. Le succès de l'IA dans la réalisation des objectifs de durabilité repose sur des infrastructures solides, un accès fiable aux données et une connectivité étendue. Il dépend tout autant du développement des compétences nécessaires à la conception et au déploiement de solutions d'IA au service de la durabilité. Des écosystèmes d'innovation associant recherche, industrie et politiques publiques sont essentiels pour accélérer les progrès de l'IA et garantir que la préparation technique se traduise par des résultats durables.

Face à des enjeux complexes et en évolution rapide, aucune institution ni aucun secteur ne peut agir seul. À travers cette collaboration, Veolia et Microsoft entendent apprendre aux côtés d'experts du monde entier, les conditions nécessaires pour exploiter de manière responsable l'IA au service d'une gestion de l'énergie, de l'eau et des déchets plus intelligente, plus efficace, plus durable et plus résiliente.

En reliant la recherche, l'industrie et les politiques publiques, nous espérons que ce rapport contribuera à faire progresser la compréhension et à orienter l'innovation vers un avenir plus durable.



INVESTIR DANS L'IA POUR ACCÉLÉRER LES SOLUTIONS DE DURABILITÉ

Alors que le monde est confronté à une aggravation des crises environnementales, l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans les stratégies de durabilité devient de plus en plus indispensable. Cette première section met en lumière les usages actuels de l'IA et explore son potentiel de transformation dans de nombreux secteurs – notamment la gestion des eaux usées, la décarbonation du secteur énergétique et la découverte de matériaux – tout en soulignant l'importance d'un déploiement et d'un passage à l'échelle responsables afin de garantir des impacts positifs durables.

Au cœur de cette évolution, il est désormais reconnu que l'IA n'est plus seulement un outil d'amélioration incrémentale : elle est un moteur de transformations profondes dans les modes de fonctionnement des industries et dans la manière dont les objectifs de durabilité sont atteints. La convergence entre IA et durabilité ouvre de nouvelles perspectives pour repenser les processus traditionnels et adopter des solutions plus proactives, fondées sur les données. Cette section rassemble ainsi plusieurs regards clés sur la manière dont l'IA est mobilisée pour relever certains des défis environnementaux les plus déterminants de notre époque.

La section s'ouvre avec un article de **Philippe Aghion, Mathias Abitbol, Céline Antonin et Lint Barrage**, consacré au rôle de l'IA dans l'efficacité énergétique et l'atténuation du changement climatique. Philippe Aghion, récemment lauréat du **prix Nobel d'économie**, apporte une lecture économique structurante, mettant en évidence la manière dont l'IA peut contribuer à concilier performance industrielle et contraintes environnementales. En s'appuyant sur la gestion des eaux usées de Veolia comme cas d'étude, les auteurs comparent les coûts énergétiques directs liés aux opérations d'IA et les économies d'énergie générées grâce à son usage. Les premiers résultats indiquent que l'IA contribue à des économies d'énergie et de réduction des émissions proches de 10 %. Pour les auteurs, les enseignements sont prometteurs : une IA bien gouvernée et conçue pour des usages ciblés constitue une voie pragmatique pour accélérer la décarbonation.

Le deuxième article, rédigé par **Stuart Stock**, présente la stratégie IA de Veolia et la manière dont le groupe intègre l'IA au cœur de ses opérations pour une gestion plus efficace de l'énergie, de l'eau et des déchets. À travers le programme GreenUp, une initiative de 4 milliards d'euros, Veolia vise à décarboner ses activités, réduire les pollutions et régénérer les ressources, tout en démontrant que les objectifs environnementaux peuvent être pleinement compatibles avec la performance économique. Grâce à un portefeuille croissant de solutions d'IA – telles que les jumeaux numériques pour le traitement des eaux usées ou la vision par ordinateur pour la gestion des déchets – Veolia réalise des avancées concrètes en matière de durabilité, dans le cadre d'une stratégie fondée sur une gouvernance robuste et une IA responsable.

Dans le secteur de l'énergie, **Nilushi Kumarasinghe, Ursula Eicker, Shahin Masoumi-Verki, Kathryn Kaspar, Suchit Ahuja et Damon Matthews** analysent le rôle que l'IA peut jouer dans la décarbonation du secteur, ainsi que les risques et défis associés à l'innovation fondée sur l'IA.

Les auteurs soulignent que, malgré son immense potentiel, l'IA se heurte à des difficultés liées à son déploiement à l'échelle mondiale, aux disparités régionales et à la nécessité de veiller à ce que ses usages contribuent aux objectifs de durabilité. L'article met en évidence l'importance d'une conception stratégique et réfléchie des solutions d'IA afin d'accélérer la transition énergétique et de répondre aux principaux impacts environnementaux du secteur.

Les applications de l'IA ne se limitent pas aux processus industriels. **Nofri Dahlan et Nurul Aqilah Mahmud** explorent son impact sur la gestion énergétique des bâtiments. Dans un contexte où ces derniers représentent une part significative de la consommation énergétique mondiale et des émissions de carbone, l'IA transforme en profondeur la manière dont l'énergie est utilisée, pilotée et optimisée. Les auteurs montrent que les systèmes intelligents améliorent l'efficacité énergétique, la résilience et la durabilité des bâtiments, notamment grâce au pilotage des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC). Ils facilitent également l'intégration des énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire photovoltaïque et le stockage par batteries. Malgré des défis persistants liés à la fragmentation et à l'intégration des données, l'IA s'impose comme un levier essentiel pour améliorer la gestion énergétique des bâtiments.

Enfin, **Bichlien Nguyen** met en lumière le rôle déterminant des matériaux dans la transition vers la durabilité et la manière dont l'IA ouvre un nouveau paradigme pour accélérer la découverte et la conception de matériaux durables. L'IA est également de plus en plus mobilisée pour optimiser l'utilisation des matières premières, réduire les déchets et promouvoir des pratiques plus durables dans des secteurs tels que la construction et l'industrie manufacturière. L'auteure montre comment les innovations fondées sur l'IA, en science et en gestion des matériaux, contribuent à faire progresser les objectifs de circularité des matériaux, de transition énergétique propre et de résilience climatique.

Ces cinq articles illustrent la manière dont l'IA favorise des transformations systémiques dans de nombreux secteurs, en aidant les organisations non seulement à atteindre leurs objectifs de durabilité, mais aussi à ouvrir de nouvelles voies d'innovation et de croissance. De la réduction des émissions de carbone à l'amélioration de l'efficacité énergétique, en passant par l'optimisation de la gestion des ressources, l'IA joue un rôle central dans la transformation écologique.

IA et changement climatique

Comment l'IA peut-elle contribuer aux objectifs d'efficacité énergétique dans l'industrie ?

Mathias Abitbol
Collège de France

Philippe Aghion
Collège de France, INSEAD
et la London School
of Economics

Céline Antonin
OFCE

Lint Barrage
ETH Zurich

L'essor de l'intelligence artificielle (IA) générative a relancé le débat sur le coût énergétique de l'IA. Cependant, jusqu'à présent, le potentiel de l'IA pour optimiser l'utilisation des ressources ou faciliter la transition des entreprises vers des technologies de production plus propres et plus durables a été largement négligé. Aucune évaluation rigoureuse n'a encore été menée pour mesurer le coût énergétique global et/ou les bénéfices énergétiques nets de l'IA. Les modèles d'IA traditionnels nécessitent des phases d'entraînement et d'inférence nettement moins énergivores et peuvent permettre aux entreprises d'améliorer l'efficacité énergétique de leurs technologies, tout en les aidant à atteindre leurs objectifs environnementaux dans les années à venir. Les modèles d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond utilisés dans l'industrie, notamment lorsqu'ils sont déployés à l'aide de jumeaux numériques, permettent de piloter des processus complexes, d'optimiser l'utilisation des ressources dans des secteurs fortement énergivores et de générer des économies d'énergie significatives. Le traitement des eaux usées est emblématique à cet égard : l'aération pendant le traitement secondaire représente généralement environ la moitié de la consommation électrique d'une station d'épuration. Dans cet article, nous nous concentrons sur la comparaison entre le coût énergétique direct des opérations d'IA et les économies d'énergie qu'elle permet de réaliser lorsqu'elle est mise en œuvre par Veolia.

Veolia, en partenariat avec PureControl, a mis en place l'un des premiers déploiements à grande échelle de l'IA pour l'efficacité climatique, couvrant environ 200 installations. Le système de PureControl ingère des données à haute fréquence (environ toutes les 15 minutes) sur les prix de l'électricité, les conditions météorologiques, les données issues de capteurs et les analyses de qualité en laboratoire afin de maintenir une réplique numérique en direct des installations. L'IA planifie et ajuste ensuite l'aération afin de minimiser les coûts et la consommation d'énergie, tout en garantissant la qualité des effluents et le respect des seuils réglementaires.

Nous évaluons l'effet net de l'IA à partir des données opérationnelles au niveau des sites, d'expériences naturelles (interruptions non planifiées) et d'un calcul complet de la consommation électrique propre à la couche d'IA. Les résultats préliminaires issus d'environ 15 installations indiquent une réduction de près de 10 % de la consommation d'électricité et des émissions de gaz à effet de serre (GES), tandis que la consommation électrique directe de l'IA représente moins de 1 % des économies d'énergie brutes réalisées. Même avec des hypothèses prudentes sur les équipements matériels supplémentaires nécessaires, le coût carbone total de l'IA sur l'ensemble de son cycle de vie reste largement inférieur aux émissions évitées, ce qui confirme une contribution climatique nette et positive.

Introduction

L'IA est souvent présentée comme une source de consommation d'énergie ayant un impact environnemental important, mais cette vision néglige les systèmes compacts et spécialisés, intégrés aux dispositifs de contrôle industriel. Dans de tels contextes, l'IA

agit comme un optimiseur en continu, alignant les opérations sur les contraintes et les prix en temps réel. Le traitement des eaux usées constitue à cet égard un cas d'étude déterminant : l'aération du traitement secondaire est à la fois fortement énergivore et strictement réglementée.

Cette étude a été menée par le Collège de France en partenariat avec Veolia et PureControl, une start-up française qui développe des jumeaux numériques basés sur l'IA afin d'optimiser la consommation d'électricité de ce processus tout en garantissant la qualité des effluents et le respect des exigences réglementaires. À l'aide d'un jeu de données inédit et très détaillé couvrant plusieurs installations de Veolia, nous quantifions les économies brutes d'énergie et d'émissions de GES, puis en déduisons la consommation électrique propre à la couche d'IA. Nous examinons également les possibilités de transfert de charge vers les heures creuses, tout en garantissant la qualité des effluents et la conformité réglementaire. Les premiers résultats indiquent qu'une réduction de près de 10 % de la consommation d'électricité est réalisable à grande échelle.



Le rôle de l'IA dans l'accélération de la transition énergétique

Un débat public animé

La diffusion rapide de l'IA a suscité des inquiétudes quant à l'augmentation potentielle de la demande mondiale en électricité liée à la numérisation. Les médias généralisent souvent à l'ensemble des usages de l'IA la forte consommation énergétique associée à l'entraînement des grands modèles de langage de l'IA générative. L'Artificial Intelligence Policy Institute a mené une enquête qui révèle que 72 % des électeurs américains s'inquiètent de l'augmentation de la consommation énergétique des centres de données d'IA¹. La légitimité de ces préoccupations dépend toutefois moins de la consommation énergétique globale que du rythme et de la concentration géographique des déploiements, qui peuvent mettre à rude épreuve la capacité des réseaux électriques locaux. Par ailleurs, considérer l'IA comme une technologie unique et homogène occulte des différences essentielles, notamment entre les déploiements dans le *cloud* et en périphérie (*edge*), entre les systèmes généralistes et les systèmes de contrôle spécialisés, ainsi que selon les contraintes propres aux infrastructures régionales.

Un impact net encore ambigu

Les analyses de scénarios suggèrent que la demande en électricité des centres de données pourrait augmenter considérablement au cours de cette décennie². Cependant, ces mêmes technologies numériques peuvent également réduire la consommation d'énergie en optimisant les processus énergivores dans l'industrie, les bâtiments, les transports et l'agriculture. La question clé est donc de savoir quel est l'impact énergétique net de l'utilisation de l'IA dans des contextes réels spécifiques. Les économies réalisées grâce à l'IA sont-elles supérieures aux coûts énergétiques liés à son fonctionnement, et dans quelles conditions ? Les jumeaux numériques (répliques virtuelles alimentées par des données en temps réel) offrent une voie prometteuse pour améliorer l'efficacité³,

permettre un pilotage en boucle fermée, une maintenance prédictive et une simulation de scénarios contrefactuels afin d'optimiser les processus sans perturber les actifs physiques.

Pourquoi les jumeaux numériques sont essentiels

Un jumeau numérique se synchronise en continu avec le processus physique, apprend sa dynamique et teste des ajustements hypothétiques (*what-if*) avant leur mise en œuvre. Dans les opérations à forte intensité énergétique, l'utilisation de l'IA peut contribuer à améliorer l'efficacité des processus en réduisant les surconsommations inutiles, à renforcer la flexibilité en déplaçant la consommation vers des heures creuses ou à faible intensité carbone tout en préservant la qualité des performances.

Ces leviers sont particulièrement pertinents dans le traitement des eaux usées, où les exigences de qualité sont

strictes, les processus physiques complexes et la consommation d'énergie concentrée sur un nombre limité d'étapes clés.

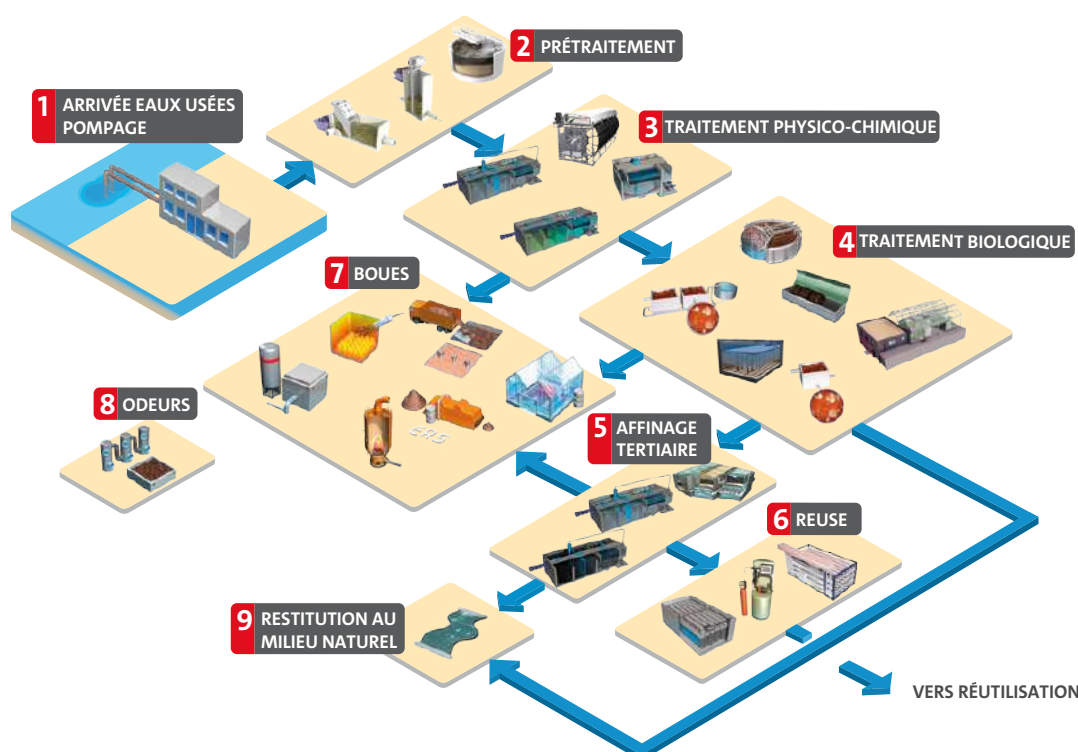
Réduire la consommation d'énergie dans le secteur de l'eau grâce à l'IA : le cas Veolia

Contexte : où se concentre la consommation d'énergie

Dans le traitement conventionnel des eaux usées, le traitement secondaire (oxydation biologique) constitue généralement le principal poste de consommation énergétique. L'aération continue fournit l'oxygène dissous nécessaire à la dégradation microbienne des polluants ; les surpresseurs et les compresseurs représentent souvent environ la moitié de la facture d'électricité d'une installation⁴. Historiquement, le contrôle repose sur des mécanismes basés sur des règles liées à des seuils, afin de garantir la conformité malgré les incertitudes opérationnelles. Ces règles sont fiables, mais conservatrices : pour éviter tout dépassement des seuils, elles conduisent fréquemment à une aération excessive.

Les jumeaux numériques (répliques virtuelles alimentées par des données en temps réel) offrent une voie prometteuse pour améliorer l'efficacité (...)

Figure 1 : Représentation d'une station d'épuration des eaux à boues activées



Veolia x PureControl : de l'automatisation au pilotage par apprentissage

Veolia, acteur mondial des services de l'eau, s'est associé à PureControl pour déployer des jumeaux numériques basés sur l'IA à l'échelle de son parc d'installations. Près de 300 usines Veolia fonctionnent avec la solution PureControl. Le système agrège des données à haute fréquence (généralement toutes les 15 minutes) provenant de plusieurs sources :

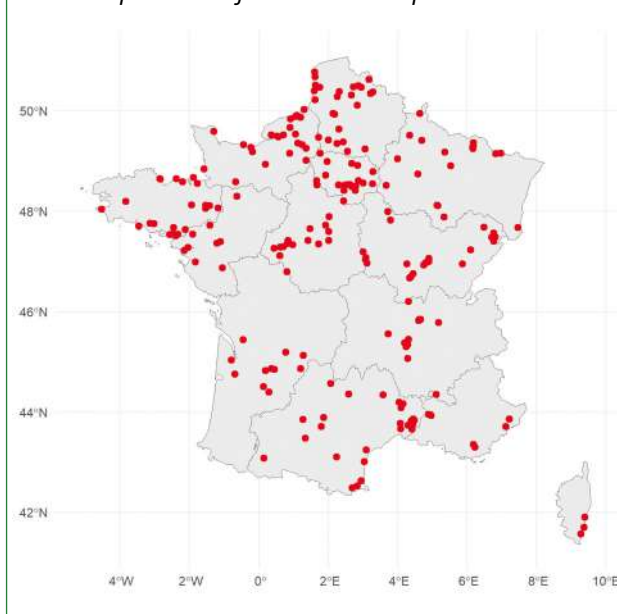
- **Capteurs internes** : débit d'eau, potentiel redox³, temps d'aération, puissance électrique.
- **Analyses en laboratoire** : indicateurs réglementaires de qualité (par exemple, nitrate, ammonium).
- **Signaux externes** : prévisions météorologiques et conditions ambiantes (neige, pluie, humidité, température).
- **Marchés de l'électricité** : tarifs, prix selon l'heure d'utilisation et charges liées à la demande.

Ces données sont intégrées dans plusieurs niveaux de modélisation. Des méthodes statistiques classiques permettent de prévoir les résultats à court terme (débit et niveau de pollution), tandis que des réseaux neuronaux d'apprentissage profond servent à optimiser des processus plus avancés, comme la durée et l'intensité de l'aération. L'IA est ainsi utilisée pour déterminer une stratégie d'aération des bassins minimisant les coûts et la consommation d'énergie, tout en respectant des contraintes strictes de qualité des effluents et des marges de sécurité.

Principe de fonctionnement

L'IA n'assouplit pas les exigences de conformité, mais elle affine la manière dont celles-ci sont atteintes. Dans la pratique, cela consiste à éviter un apport systématique excessif d'oxygène, à décaler l'aération vers les heures creuses lorsque cela est possible, sans compromettre la qualité des effluents, et à adapter en continu le pilotage aux flux de données en temps réel. L'intervention humaine reste toutefois nécessaire, et les opérateurs gardent la maîtrise et peuvent reprendre la main à tout moment si nécessaire.

Figure 2 : Répartition géographique des installations Veolia exploitant les jumeaux numériques de PureControl

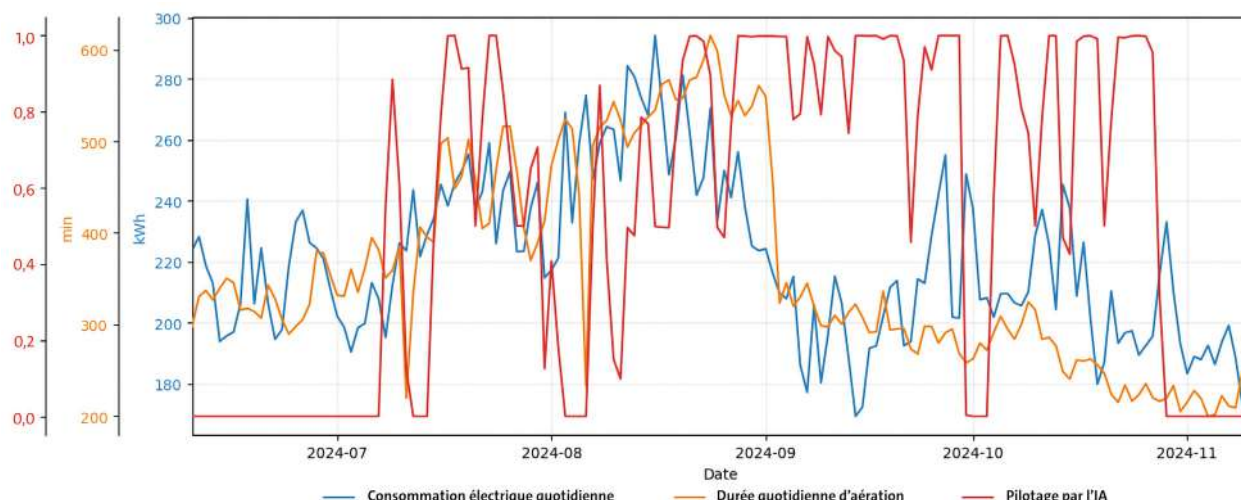


Évaluation de l'impact : méthodes et premières conclusions

Architecture et granularité des données

L'étude utilise la télémétrie au niveau des installations, les résultats d'analyses en laboratoire et les données météorologiques en libre accès, rassemblées par PureControl. Les variables comprennent la consommation électrique détaillée, les durées de fonctionnement et les consignes des surpresseurs d'aération, les concentrations en oxygène dissous et en nutriments, les caractéristiques des effluents, les conditions ambiantes ainsi que les tarifs d'électricité selon l'heure d'utilisation. Cette résolution permet aux usines de suivre à la fois les niveaux de consommation (kWh, kg CO₂e) et les courbes associées, notamment la répartition de la charge au cours de la journée.

Figure 3 : Profil de la consommation d'énergie, durée médiane d'aération et utilisation de l'IA (en proportion du temps) autour de la mise en œuvre de l'IA pour une installation donnée



Le 15 septembre, l'IA était active 36 % du temps. L'installation a consommé 1108 kWh d'électricité et le système d'aération a fonctionné pendant 551 minutes.

Stratégie empirique pour mesurer l'impact de l'IA

Notre approche repose sur des stratégies complémentaires visant à isoler l'effet de l'IA des facteurs de confusion potentiels.

Tout d'abord, le déploiement et les éventuelles défaillances de l'IA offrent un cadre expérimental naturel pour identifier l'effet causal de l'IA sur la consommation d'électricité et isoler des facteurs de confusion potentiels. Nous exploitons en particulier des interruptions exogènes du pilotage assisté par l'IA (qui ramènent temporairement les installations à leur mode de fonctionnement initial, sans intervention de l'IA). La comparaison de fenêtres temporelles adjacentes avant et après ces chocs, au sein d'une même installation, permet d'estimer l'effet causal de l'IA sur la consommation et la qualité, en contrôlant la saisonnalité et les différences de charge entre les installations. Par ailleurs, l'adoption échelonnée de l'IA dans différentes installations permet de réaliser des modèles d'étude d'événements comparant les installations équipées à celles qui ne le sont pas encore. Ces modèles intègrent des effets fixes granulaires au niveau de chaque usine, pour chaque période calendaire, ainsi que par classes de conditions météorologiques. Cette approche permet de saisir les changements persistants attribuables à l'IA, tandis que les effets fixes absorbent les chocs communs qui affectent l'ensemble des unités, les empêchant ainsi de biaiser l'impact estimé.

Ensuite, nous pouvons déduire la consommation électrique propre à la couche d'IA, en estimant l'électricité utilisée par les serveurs nécessaires à son fonctionnement. Les économies nettes correspondent alors aux réductions brutes observées au niveau des installations, diminuées de cette consommation additionnelle.

Enfin, nous analysons les profils de consommation afin de distinguer l'effet de l'IA sur la consommation totale de son effet sur la répartition de la consommation dans le temps. Cette analyse permet de vérifier si l'IA déplace effectivement les usages vers les heures creuses, sans dégrader la qualité des effluents, en utilisant l'exposition aux prix de l'électricité et des courbes de charge infrajournalières.

Résultats préliminaires

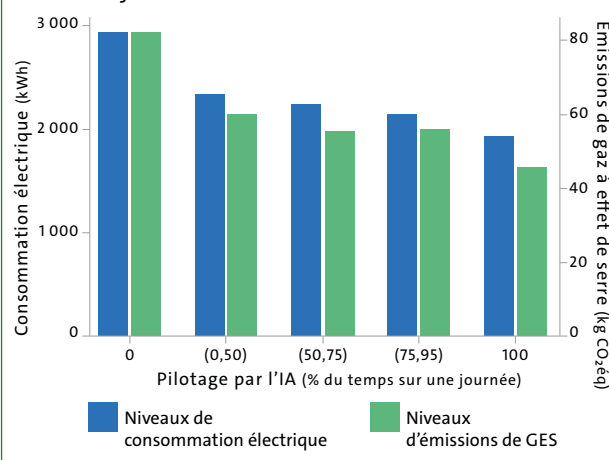
Dans un premier sous-échantillon, et sous réserve d'analyses complémentaires de ces données, nous observons :

- **Énergie et émissions** : une réduction moyenne de près de 10 % de la consommation d'électricité et des émissions de GES associées est observée les jours où l'IA est pleinement active, par rapport aux jours où le procédé n'est pas piloté par l'IA. Ces résultats n'ont jusqu'à présent été établis que sur la base d'hypothèses restrictives, et leur fiabilité sera évaluée dans les phases ultérieures du projet.
- **Consommation propre de l'IA** : la consommation électrique liée à la couche PureControl est estimée à moins de 1 % des économies d'énergie brutes réalisées, ce qui se traduit par une réduction nette significative. Même dans les scénarios les plus prudents – notamment dans les rares cas où des ajustements matériels sont nécessaires sur site – les émissions de GES induites sur l'ensemble du cycle de vie de l'IA ne dépassent jamais 30 à 45 % des émissions évitées.
- **Décalage de charge** : des éléments probants indiquent une réallocation partielle de la consommation vers des périodes à tarifs heures creuses, avec un potentiel accru d'intégration au réseau à mesure que les signaux de prix se confirment.

Nous observons également des variations significatives de l'impact de l'IA sur la consommation d'énergie et les émissions de GES en fonction de la durée d'utilisation de l'IA au cours d'une journée donnée. Plus précisément, lorsque l'IA est mobilisée sur une période plus longue au cours d'un cycle opérationnel

quotidien, sa capacité à réduire la consommation d'énergie et les émissions associées augmente. Cet effet s'explique vraisemblablement par la capacité de l'IA à optimiser le fonctionnement des installations sur de longues périodes, en ajustant plus efficacement les cycles d'aération et en favorisant le décalage de la consommation vers les heures creuses. Une exposition prolongée au pilotage assisté par l'IA fournit au système davantage de données et de temps pour affiner les paramètres opérationnels, ce qui entraîne des réductions plus importantes et plus durables de la consommation d'énergie. À l'inverse, lorsque l'IA n'est utilisée que sur de courtes périodes, les possibilités d'optimisation sont plus limitées et les économies d'énergie et les réductions d'émissions qui en résultent sont moins importantes.

Figure 4 : Consommation quotidienne moyenne et émissions de GES en fonction de la part du temps de pilotage par l'IA au cours de la journée



Mise à l'échelle et gouvernance

Pour déployer l'IA efficacement à grande échelle sur plusieurs installations, quelques conditions préalables essentielles doivent être remplies :

1. **Infrastructure de données** : un système fiable doit être mis en place pour collecter et partager les données. Plus l'IA a accès à des volumes de données importants et de qualité, plus ses capacités de prédiction et d'optimisation s'améliorent. Des protocoles de connectivité appropriés sont nécessaires pour garantir que l'IA puisse accéder en temps réel aux données dont elle a besoin.
2. **Accès et pilotage des systèmes** : pour que l'IA puisse gérer les opérations des installations, elle doit être en mesure d'interagir avec les systèmes de contrôle. Cela implique que les opérateurs autorisent l'IA à ajuster certains paramètres des équipements ou à automatiser des processus spécifiques.
3. **Systèmes à jour** : les technologies supportant l'IA doivent être régulièrement mises à jour et correctement maintenues. Cela implique notamment de s'assurer que tous les appareils sont compatibles avec les solutions d'IA. La modernisation des matériels permet aux systèmes de rester efficaces et de traiter davantage de données à mesure que les opérations se développent.

Ces éléments structurants garantissent que l'IA peut être intégrée efficacement dans les opérations des installations et déployée à grande échelle avec succès, tout en assurant la maîtrise et la sécurité des systèmes.

Conclusion

L'impact énergétique de l'IA n'est pas univoque. Dans le traitement des eaux usées, les jumeaux numériques pilotés par l'IA peuvent générer des réductions mesurables et vérifiables de la consommation d'électricité et des émissions de gaz à effet de serre, précisément là où celles-ci sont les plus concentrées – au niveau de l'aération secondaire – sans compromettre la conformité réglementaire. Dans le cadre du partenariat entre Veolia et PureControl, les premiers résultats observés sur un nombre croissant d'installations indiquent une baisse de près de 10 % de la consommation d'énergie et des émissions associées, une charge opérationnelle négligeable liée à la couche d'IA, ainsi que des bénéfices prometteurs en matière de décalage de charge.

À mesure que le projet de recherche s'élargit, des évaluations rigoureuses à l'échelle du portefeuille permettront d'affiner ces estimations. Pour les opérateurs de services publics et les décideurs publics, le message est clair : une IA ciblée et spécialisée, intégrée dans une gouvernance solide, peut constituer dès aujourd'hui un levier concret de décarbonation.

À propos des auteurs

Mathias Abitbol est diplômé de l'École normale supérieure et de HEC Paris, et affilié à l'Innovation Lab du Collège de France.

Philippe Aghion est professeur au Collège de France, à l'INSEAD et à la London School of Economics. En 2025, il a reçu le prix Nobel d'économie.

Céline Antonin est chercheuse et professeure affiliée à Sciences Po (OFCE), et chercheuse associée à l'Innovation Lab du Collège de France.

Lint Barrage est professeur associé à l'ETH Zurich.





L'écosystème intelligent

Comment nous préparons l'avenir des services environnementaux grâce à l'IA

Stuart Stock
Veolia

Alors que l'économie mondiale est confrontée au double impératif de la préservation de l'environnement et du progrès technologique, Veolia met en œuvre une stratégie globale qui place l'intelligence artificielle (IA) au cœur de ses activités et de sa croissance future. Dans cet article, je propose une analyse approfondie de la manière dont nous exploitons l'IA non seulement dans une approche d'optimisation progressive, mais aussi pour repenser en profondeur notre façon d'aborder la gestion de l'eau, des déchets et de l'énergie. Notre intégration de l'IA repose sur une stratégie à plusieurs niveaux, portée par notre vision d'entreprise et rendue possible par une architecture à double plateforme. Nous avons prouvé son efficacité grâce à un portefeuille diversifié de solutions, toutes encadrées par un modèle de gouvernance tourné vers l'avenir.

L'élan stratégique de cette transformation est donné par notre programme GreenUp (2024-2027), un programme d'entreprise ambitieux soutenu par un investissement de 4 milliards d'euros, visant à atteindre des objectifs exigeants en matière de décarbonation, de dépollution et de régénération des ressources. Cette approche redéfinit la durabilité non plus comme une contrainte réglementaire ou un centre de coûts, mais comme un moteur essentiel de création de valeur et de compétitivité à long terme. Nous avons explicitement identifié l'IA comme l'un des catalyseurs permettant d'atteindre ces objectifs, créant ainsi une puissante synergie entre les résultats environnementaux et les performances financières.

L'architecture de notre stratégie repose sur deux plateformes complémentaires. La première, *Talk to my plant* (TTMP), est notre système d'IA à l'échelle industrielle, développé dans le cadre d'une alliance stratégique avec Mistral AI. Il vise à concevoir des installations intelligentes pouvant être copilotées via le langage naturel et, à terme, capables d'exécuter des actions de manière autonome. La seconde, VeoliaSecureGPT, est un outil d'IA interne et démocratisé que nous avons développé afin de donner les moyens d'agir à l'ensemble de nos 180 000 collaborateurs connectés, favorisant ainsi une culture d'innovation *bottom-up* et l'émergence d'une main-d'œuvre augmentée.

Ce cadre stratégique et architectural est étayé par un portefeuille croissant de solutions d'IA concrètes, déployées à l'échelle de l'ensemble de nos lignes d'activité. Des systèmes de jumeaux numériques appliqués au traitement des eaux usées, permettant de réduire l'empreinte carbone jusqu'à 60 %, aux dispositifs de vision par ordinateur embarqués sur nos camions de collecte des déchets, qui améliorent la pureté du recyclage, nous déployons un large éventail de technologies d'IA pour répondre à des défis environnementaux réels.

Enfin, notre stratégie repose sur un engagement fort en faveur d'une IA responsable. À travers notre implication au sein de la Coalition for Sustainable AI (Coalition pour une IA durable), nous contribuons de manière proactive à la structuration du cadre éthique et réglementaire, et à la construction de l'acceptabilité sociale indispensable au déploiement de l'IA dans les infrastructures critiques.

Je pense que notre stratégie en matière d'IA établit une nouvelle norme pour le secteur des services environnementaux. Elle illustre la manière dont nous mobilisons les technologies intelligentes non seulement pour renforcer la performance commerciale, mais aussi pour générer des gains écologiques continus, redéfinissant ainsi les contours d'une réussite durable pour un leader industriel.



Introduction : au croisement de l'écologie et de l'IA

Le secteur des services environnementaux se trouve à un tournant critique, sous l'effet de la convergence entre l'escalade des crises écologiques et la croissance exponentielle de l'IA. Cette expansion n'est pas spéculative ; elle est alimentée par une combinaison puissante d'impératifs climatiques urgents, de réglementations gouvernementales de plus en plus strictes – telles que l'objectif de l'Union européenne de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 55 % d'ici 2030 – et de la maturité croissante des technologies d'IA elles-mêmes, désormais capables d'analyses avancées et de prises de décision en temps réel^{1,2,3,4}. L'IA est en train de passer du statut d'outil académique de niche à celui de technologie structurante pour la réduction de l'impact du changement climatique, l'optimisation de la gestion des ressources et la conservation de la biodiversité⁵.

Dans ce contexte dynamique, nous nous positionnons non pas simplement comme un acteur parmi d'autres, mais comme un pionnier de ce que nous définissons comme la transformation écologique. À une époque où l'IA suscite souvent des inquiétudes, notre stratégie présente un contre-discours convaincant, démontrant le profond potentiel de cette technologie en matière d'impact environnemental. Notre conviction est que l'IA est un levier essentiel pour atteindre nos objectifs stratégiques, en permettant de repenser en profondeur la manière dont les services environnementaux sont fournis.

Notre stratégie en IA repose sur une vision claire, un déploiement opérationnel *bottom-up* sur le terrain et un cadre de gouvernance structurant. Elle constitue une étude de cas emblématique sur la manière dont nous pouvons exploiter l'IA non seulement pour améliorer progressivement l'efficacité, mais aussi pour repenser fondamentalement ses services afin de garantir un avenir plus résilient et durable. Cette stratégie incarne une évolution majeure de notre secteur, passant d'un modèle de résolution réactive des problèmes à un modèle de conception proactive des systèmes. Le paradigme traditionnel consistait à réagir aux défis environnementaux a posteriori : traiter les eaux usées à leur arrivée, collecter les déchets selon des horaires fixes et réparer les équipements après une défaillance. Le nouveau modèle basé sur l'IA que nous sommes en train de mettre en place est intrinsèquement proactif et systémique. Il consiste à prévoir les charges des stations d'épuration afin d'ajuster de manière préventive les processus de traitement, à optimiser en temps réel les itinéraires de collecte des déchets à partir des données des capteurs afin de réduire la consommation de carburant, et à effectuer une maintenance préventive pour éviter les pannes avant qu'elles ne se produisent. Cette transformation renforce considérablement notre proposition de valeur, faisant évoluer notre rôle de fournisseur de services publics vers celui de partenaire stratégique, capable d'offrir à nos clients municipaux et industriels un niveau plus élevé de durabilité, de résilience et d'intelligence opérationnelle.

La feuille de route stratégique : l'IA comme catalyseur de *GreenUp*

Au cœur de notre transformation axée sur l'IA se trouve notre programme stratégique phare pour 2024-2027, *GreenUp*^{6,7,8}. Cette initiative constitue notre réponse structurée à un contexte mondial marqué par de multiples crises, en formulant une vision d'une écologie à la fois transformatrice et protectrice. Elle s'appuie sur une feuille de route globale qui intègre l'IA comme un levier central pour atteindre nos objectifs environnementaux et financiers.

Le programme *GreenUp* s'articule autour de trois piliers centraux qui définissent sa mission : décarboner, dépolluer et régénérer. Ces piliers reposent sur des objectifs concrets et quantifiables, à la mesure de notre ambition. Nous avons engagé un investissement substantiel de 4 milliards d'euros dans ce programme, dont une part importante est consacrée à trois moteurs de croissance : le traitement des déchets dangereux, les technologies de l'eau et la bioénergie, des domaines dans lesquels les applications de l'IA sont largement déployées^{6,7,8}. Les objectifs du programme d'ici 2027 comprennent le traitement de 9 millions de tonnes de déchets dangereux et de polluants, l'économie de 1,5 milliard de mètres cubes d'eau douce, et permettent d'éviter 18 millions de tonnes d'équivalent CO₂ (Scope 4) par rapport aux niveaux de 2023^{6,7,8,9}. Ces engagements s'inscrivent dans notre trajectoire globale visant à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050.

Notre programme *GreenUp* a été conçu autour d'un double objectif qui lie étroitement les progrès environnementaux aux performances financières. Le programme a généré des résultats significatifs, avec des synergies atteignant 435 millions d'euros et

des gains d'efficacité de 398 millions d'euros en 2024, dépassant dans les deux cas les objectifs fixés. L'IA et la transformation numérique sont explicitement identifiées comme les principaux moteurs de ces gains d'efficacité^{6,7,8}. Ce lien assumé entre performance environnementale et performance économique montre que les initiatives de durabilité ne peuvent être pérennes que si elles reposent sur des bases économiques solides. Nos déclarations publiques renforcent cette idée, en identifiant l'IA comme l'un des principaux catalyseurs et un élément essentiel à la réalisation de la vision *GreenUp*.

Cette double mission – concilier performance économique et préservation de la planète – est au cœur de la résilience et de la capacité de déploiement à grande échelle de notre stratégie. En démontrant que les solutions environnementales basées sur l'IA peuvent générer des gains opérationnels significatifs et des rendements financiers mesurables, nous créons une boucle puissante et vertueuse. Les économies de coûts et les nouvelles sources de revenus générées par les applications d'IA peuvent financer de nouveaux investissements dans les technologies vertes et l'innovation. Cette approche redéfinit la durabilité, non plus comme une contrainte réglementaire ou un centre de coûts, mais comme un moteur central de compétitivité et de rentabilité. Notre stratégie gagne ainsi en solidité et en attractivité pour les actionnaires, tout en étant prémunie contre les fluctuations des cycles politiques et économiques. Elle établit un modèle commercial dans lequel responsabilité écologique et performance financière ne s'opposent pas, mais se renforcent mutuellement.

Concevoir une entreprise intelligente : nos plateformes fondamentales d'IA

Pour mettre en œuvre notre ambitieuse stratégie *GreenUp*, nous construisons une architecture d'IA d'entreprise sophistiquée reposant sur deux plateformes fondamentales et complémentaires. Cette approche à double plateforme combine la puissance d'un moteur d'IA centralisé à l'échelle industrielle avec l'agilité d'un outil démocratisé et centré sur l'humain, créant ainsi un écosystème complet dédié à l'innovation et à l'excellence opérationnelle.

Le cerveau industriel : *Talk to my plant* (TTMP) et l'alliance Mistral AI

Le premier pilier de cette architecture est *Talk to my plant* (TTMP), notre plateforme d'IA industrielle conçue pour repenser fondamentalement la manière dont nous gérons et analysons les données à travers notre vaste présence mondiale. La vision de TTMP est de faire évoluer nos milliers d'installations, qui sont actuellement surveillées de manière passive, vers des écosystèmes intelligents et connectés. La plateforme facilite le passage d'une gestion réactive à ce que nous appelons le « copilotage conversationnel », avec pour objectif ultime de permettre aux installations d'effectuer des actions autonomes sous supervision humaine afin de maximiser à la fois l'efficacité opérationnelle et la performance environnementale.

Le cœur technologique de la capacité d'IA générative de TTMP repose sur notre alliance stratégique avec l'innovateur français en IA, Mistral AI, annoncée en février 2025^{10,11,12,13,14}. Ce partenariat associe la puissance des grands modèles de langage (LLM) de Mistral à notre vaste corpus de données opérationnelles et à notre expertise métier. Cette synergie rend possible une fonctionnalité inédite : la capacité de dialoguer avec une installation industrielle. Un opérateur, un ingénieur ou même un gestionnaire de contrat peut interroger un système industriel complexe en langage naturel et obtenir, en temps réel, des réponses précises et des recommandations fondées sur les données. Ce dispositif est d'ores et déjà en phase de test sur douze sites pilotes en France, au Royaume-Uni, à Taiwan et dans d'autres pays, avec l'objectif d'un déploiement rapide à plus grande échelle^{11,12,13,14}. Les fonctionnalités clés que ce partenariat vise à déployer s'articulent autour de trois axes principaux :

1. **Un accès simplifié aux connaissances**, permettant aux techniciens de consulter instantanément des données techniques critiques.
2. **Une plus grande transparence**, permettant aux parties prenantes d'interagir intuitivement avec les systèmes.
3. **L'amélioration de l'efficacité opérationnelle**, grâce à une supervision optimisée et à des recommandations précises et proactives.

Le choix de collaborer avec Mistral AI s'inscrit dans notre volonté de diversifier nos partenariats en IA et de tirer parti des meilleures technologies disponibles à l'échelle mondiale. L'accent mis par Mistral AI sur la performance, la transparence et la conformité aux cadres réglementaires européens en fait un partenaire précieux pour nos opérations. Cette collaboration vient compléter notre stratégie globale en matière d'IA, qui repose sur des partenariats avec plusieurs fournisseurs de technologies afin de garantir que nous pouvons fournir des solutions optimales dans le cadre de nos diverses opérations internationales. En travaillant avec différents acteurs de l'IA, nous conservons une flexibilité technologique essentielle, tout en assurant la conformité aux réglementations locales et en répondant aux besoins spécifiques de nos clients à travers le monde. Cette approche reflète notre engagement en faveur de l'innovation et notre capacité à nous adapter à l'évolution du paysage de l'IA.

Les économies de coûts et les nouvelles sources de revenus générées par les applications d'IA peuvent financer de nouveaux investissements dans les technologies vertes et l'innovation

propriétaire, garantissant la confidentialité des données sensibles de l'entreprise et de ses clients – un enjeu majeur dans l'usage de modèles d'IA générative publics.

Cette approche à double plateforme illustre une stratégie équilibrée de transformation numérique. TTMP fournit une solution *top-down* à l'échelle industrielle, tandis que SecureGPT favorise une approche d'innovation *bottom-up*, davantage centrée sur l'humain. L'objectif n'est pas de remplacer les employés, mais d'augmenter leurs capacités. En mettant à leur disposition un outil d'IA à la fois sécurisé et accessible, l'organisation permet à un large éventail d'utilisateurs d'identifier des leviers d'amélioration opérationnelle et d'explorer de nouveaux cas d'usage. À titre d'exemple, un opérateur de terrain peut utiliser l'outil pour diagnostiquer un problème local, tandis qu'un analyste au sein d'une entité régionale peut agréger des données et produire des rapports analytiques. Cette dynamique crée une boucle rétroactive, dans laquelle les enseignements issus du terrain contribuent à enrichir et à affiner des systèmes de plus grande ampleur tels que TTMP, favorisant ainsi des cycles d'itération

plus rapides et le développement d'une culture et d'une maîtrise de l'IA à l'échelle de l'organisation.

L'IA en action : un portefeuille de solutions environnementales à fort impact

Si la stratégie et l'architecture constituent la feuille de route, la véritable mesure de notre initiative en matière d'IA réside dans ses applications concrètes. Nous déployons un portefeuille diversifié et croissant de solutions basées sur l'IA qui traduisent nos ambitions de haut niveau en un impact opérationnel et environnemental tangible au sein de nos principales lignes d'activité. Ce portefeuille illustre une stratégie aboutie consistant à mobiliser l'outil d'IA le plus pertinent – des jumeaux numériques et de l'apprentissage profond à la vision par ordinateur et à la bioacoustique – pour répondre à des problématiques ciblées à forte valeur ajoutée^{15, 16}.

Le tableau ci-dessous synthétise plusieurs de nos solutions d'IA clés, développées sous la marque ombrelle Veolia Hubgrade, en reliant leurs technologies fondamentales aux bénéfices quantifiables qu'elles génèrent. Il offre ainsi une vision claire de l'ampleur et de la profondeur de nos déploiements.

Ligne d'activité	Fonctionnalité clé	Technologie IA de base	Avantages quantifiables en matière de durabilité/d'exploitation
Eau	Optimisation en temps réel des processus de traitement des eaux usées en envoyant des instructions aux automates programmables. Prédiction des charges et des volumes.	Jumeau numérique, analyse prédictive, contrôle avancé des processus (APC)	Réduction de l'empreinte carbone pouvant atteindre 60 %; économies pouvant atteindre 100 % sur les produits chimiques; garantie de conformité réglementaire; atténuation des effets des conditions météorologiques extrêmes.
Eau	Optimise la consommation et le contrôle de l'énergie dans les stations d'épuration de taille moyenne (jusqu'à 50 000 EH). Calcule les points de consigne pour les automates programmables.	Apprentissage profond, surveillance à distance	Économies de 5 % à 15 % sur la consommation électrique mondiale; contrôle opérationnel amélioré et détection des dérives du procédé.
Eau/Industrie	Surveillance 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 des installations de traitement d'eau afin d'optimiser les performances et de prévoir les pannes.	Gestion de la performance des actifs (APM), IA générique, détection des anomalies	Prévention des temps d'arrêt non planifiés; prolongation de la durée de vie des actifs; réduction des déchets et de la consommation de ressources grâce à une optimisation continue.



Ligne d'activité	Fonctionnalité clé	Technologie IA de base	Avantages quantifiables en matière de durabilité/d'exploitation
Déchets	Identifie les indésirables dans les déchets collectés par les camions et évalue les niveaux de déchets sur la voir publique à partir des balayeuses.	Vision par ordinateur, caméras alimentées par l'IA	Augmente le tri à la source; diminue la présence d'indésirables dans les centres de tri et les incinérateurs; permet une allocation dynamique des ressources pour le nettoyage de la ville.
Énergie	Gère en temps réel les opérations des systèmes de production et de distribution d'énergie (par exemple, les réseaux de chauffage).	Modélisation énergétique, optimisation basée sur l'IA	Optimise la consommation d'énergie; réduit l'empreinte carbone; améliore la conformité aux contrats de performance énergétique.
Biodiversité	Surveille et identifie de manière autonome plus de 100 espèces (chauves-souris, oiseaux, etc.) afin d'évaluer la santé des écosystèmes.	Détection bioacoustique, identification des espèces assistée par l'IA	Fournit des données validées sur l'impact en matière de biodiversité; soutient le suivi de la santé des écosystèmes pour Veolia et ses clients.

Gouvernance et vision : ouvrir la voie à une IA responsable dans l'industrie

Façonner l'avenir : notre rôle de leader au sein de la *Coalition for Sustainable AI*

Notre direction reconnaît que la seule excellence technologique ne suffit pas à garantir un déploiement réussi et durable de l'IA dans les infrastructures publiques critiques. Il est primordial de gagner et de conserver la confiance du public, des clients et des autorités réglementaires. C'est pourquoi nous nous sommes engagés de manière délibérée et visible à mettre en place un cadre de gouvernance éthique et responsable en matière d'IA, nous positionnant ainsi comme un acteur pionnier dans l'application industrielle d'une IA fiable.

Notre PDG, Estelle Brachlianoff, a publiquement approuvé l'engagement en faveur d'une IA fiable dans le monde du travail (*Pledge for a Trustworthy AI in the World of Work*) et a engagé Veolia au sein de la *Coalition for Sustainable AI*^{17,18,19,20}, une initiative mondiale multipartite lancée à Paris en février 2025 par la France, le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et plusieurs partenaires internationaux^{17,18}. La Coalition réunit des gouvernements, des leaders technologiques et des instituts de recherche afin d'aligner le développement de l'IA sur les Objectifs de développement durable des Nations unies (ODD), en mettant l'accent sur l'action climatique, la réduction de la pollution et la protection de la biodiversité^{18,20}. Elle s'attache également à relever le double défi posé par l'IA : exploiter son potentiel environnemental tout en maîtrisant sa propre empreinte, notamment en matière

de consommation d'énergie et d'eau. Cet engagement dépasse le cadre de la responsabilité sociale des entreprises : il constitue une manœuvre stratégique de gestion des risques et de positionnement. À mesure que les systèmes d'IA deviennent plus puissants et autonomes au sein des services essentiels, ils font l'objet d'une vigilance accrue sur les enjeux de transformation de l'emploi, de biais algorithmiques, de protection des données et de sécurité. En participant de manière proactive à des instances d'influence telles que la Coalition, nous anticipons les évolutions réglementaires et passons du rôle de simple destinataire des futures normes à celui d'acteur contribuant à la définition des règles de l'IA industrielle, tout en renforçant l'acceptabilité sociale de nos activités.

Alimenter les centres de données : nos solutions numériques intégrées pour des opérations durables

Alors que l'industrie des centres de données constitue un pilier fondamental du développement mondial des capacités en IA, Veolia intègre de manière stratégique des capacités numériques afin de répondre aux exigences critiques de cette industrie en matière de ressources et de fiabilité. L'offre globale de Veolia à destination des centres de données s'articule autour de quatre piliers : fiabilité, carbone négatif, eau positive, circularité des déchets. Pour soutenir ces objectifs, l'entreprise utilise sa plateforme Hubgrade afin de proposer des solutions numériques pour le suivi et l'optimisation énergétiques, qui améliorent l'efficacité énergétique et facilitent une gestion intégrée des programmes de durabilité. De plus, dans la perspective d'une empreinte hydrique positive, Veolia déploie des solutions avancées de traitement d'eau qui incluent des



analyses de performance en temps réel afin d'optimiser l'efficacité des systèmes de refroidissement et de réduire la consommation d'eau. Grâce à l'utilisation de ces outils fondés sur les données, Veolia permet à ses clients non seulement de garantir la continuité des opérations, mais également de piloter de manière proactive leur empreinte environnementale – incluant l'eau, les déchets et l'énergie – un facteur déterminant pour assurer l'acceptabilité territoriale et la pérennité des projets à long terme.

Cette attitude proactive nous aide à construire ce que l'on peut appeler une autorisation sociale d'exploitation. Elle envoie un signal clair aux autorités réglementaires, aux clients et au grand public quant à notre rôle de gestionnaire responsable de cette technologie profondément transformatrice. Elle contribue à instaurer un climat de confiance durable, actif immatériel mais essentiel, susceptible de constituer un avantage concurrentiel significatif face à des acteurs perçus comme avançant trop rapidement ou sans garde-fous éthiques suffisants. En faisant le choix de la transparence et de la collaboration, nous transformons un handicap potentiel – la perception de l'IA comme une « boîte noire » – en un levier de différenciation, de leadership intellectuel et de création d'un capital de marque pérenne.

Conclusion : construire un avenir fondé sur l'IA au service d'une industrie plus verte

Comme exposé précédemment, notre stratégie en matière d'IA constitue une démarche globale, multidimensionnelle et profondément intégrée à l'échelle de l'entreprise. Il ne s'agit pas d'une juxtaposition de projets pilotes cloisonnés, mais bien d'un écosystème cohérent, fondé sur la vision stratégique claire de *GreenUp*, porté par nos plateformes structurantes *Talk to my plant* et *VeoliaSecureGPT*, étayé par un portefeuille diversifié d'applications à fort impact, et encadré par un dispositif de gouvernance solide et responsable. Nous concevons ainsi une entreprise intelligente où les données et les algorithmes deviennent aussi fondamentaux pour nos opérations que les infrastructures physiques elles-mêmes, telles que les réseaux, les installations industrielles et les unités de traitement.

Je suis convaincu que notre parcours offre un modèle convaincant et complet pour l'avenir du secteur des services environnementaux et de l'industrie lourde en général. En conciliant avec succès ambition écologique et performance opérationnelle et financière portée par l'IA, nous ne nous contentons pas d'optimiser nos propres activités : nous démontrons l'existence d'un modèle viable et déployable à grande échelle, permettant aux leaders industriels de jouer un rôle moteur dans la transformation écologique mondiale. Nous faisons ainsi le pari de l'avenir sur une conviction forte : au XXI^e siècle, l'entreprise la plus durable sera également la plus intelligente – et, *in fine*, la plus performante.

À propos de l'auteur

Fort de plus de 20 ans d'expertise dans le domaine des technologies et des données, **Stuart Stock** est directeur de l'information, des données et du numérique du groupe Veolia. Depuis 2023, il est au cœur de la stratégie d'information de l'entreprise et de la promotion de l'innovation, en particulier de l'IA, jouant un rôle clé dans le succès et la transformation numérique de Veolia.

Sa carrière chez Veolia, qui a débuté au Royaume-Uni et en Irlande, reflète son engagement continu, puisqu'il est passé du secteur de la finance à des postes de direction stratégique dans le domaine informatique, d'abord pour la région Europe du Nord, puis pour l'ensemble du groupe.





Tirer parti de l'IA pour décarboner le secteur de l'énergie

Opportunités, défis et recommandations

Nilushi Kumarasinghe^{1,2}, Ursula Eicker¹, Shahin Masoumi-Verki¹, Kathryn Kaspar¹, Suchit Ahuja¹, et H. Damon Matthews^{1,2}

1 - Université Concordia, 2 - Future Earth Canada et Durabilité à l'ère numérique (Sustainability in the Digital Age)



Répondre à la croissance de la demande d'énergie tout en assurant sa décarbonation est l'un des principaux défis écologiques contemporains. Cet article examine les moyens par lesquels l'intelligence artificielle (IA) peut y contribuer, mais aussi les risques et les défis qu'elle est susceptible d'engendrer. Nous étudions pour ce faire des exemples d'applications basées sur des données probantes de l'IA dans les manières d'approvisionner, de produire et de consommer de l'énergie. Mais la mise en place de ces mesures fait face à de multiples contraintes: les inégalités sociales, les disparités financières et liées aux infrastructures, ainsi que les incertitudes entourant les effets rebond de l'IA. Si ces technologies sont prometteuses, elles ne pourront contribuer pleinement aux objectifs de décarbonation qu'à condition de remédier aux inégalités actuelles et aux dynamiques politiques, sociales et économiques non durables.

Introduction

Le secteur de l'énergie est au cœur de la lutte contre le changement climatique. Il demeure en effet le plus grand contributeur d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂) (les deux tiers des émissions mondiales)¹ et la deuxième source anthropique d'émissions mondiales de méthane (CH₄)², ce qui en fait le principal moteur du changement climatique. Bien que la part des énergies renouvelables ait connu une croissance rapide, et qu'elle ait commencé à réduire l'empreinte carbone du secteur énergétique, les émissions issues des énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz) ne cessent d'augmenter, même si leur rythme de croissance est en baisse. Mais le secteur de l'énergie est à son tour touché par le changement climatique, alors que dans le même temps, la demande en électricité augmente. Nous étudions les différents facteurs en jeu, comme la croissance démographique, le développement économique et l'électrification des secteurs du bâtiment et des transports¹.

Le secteur énergétique doit répondre à la croissance de la demande d'énergie, tout en réduisant considérablement ses émissions.

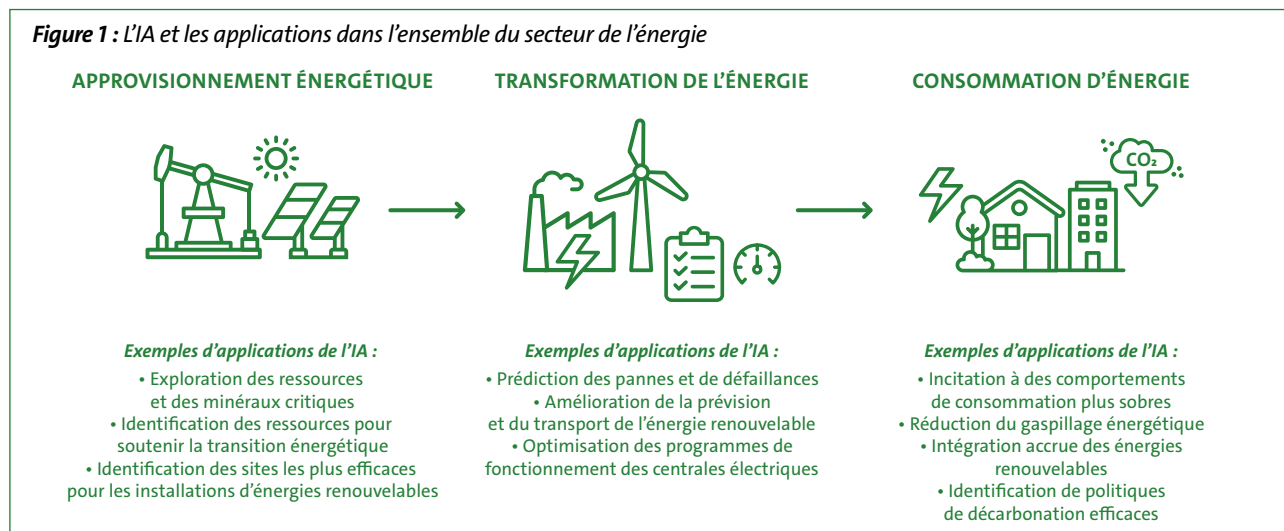
Cet article explore la manière dont l'IA peut jouer un rôle décisif pour aider à surmonter ces défis, voire même accélérer la transition de l'industrie énergétique. Nous identifions alors les situations dans lesquelles l'IA peut intervenir, tout en présentant des applications existantes et des exemples de réussite. Mais nous étudions aussi les risques et les défis que peuvent engendrer les innovations portées par l'IA, et nous proposons des pistes de réflexion importantes pour les décideurs politiques et les parties prenantes du secteur énergétique.

L'intelligence artificielle et le secteur de l'énergie

Le secteur de l'énergie peut être subdivisé en trois domaines clés (voir Figure 1). L'approvisionnement en énergie et ressources minières désigne l'extraction des sources d'énergie telles que le pétrole et le gaz naturel, mais aussi les minéraux nécessaires à la production d'énergie renouvelable. La production d'énergie représente les façons dont les sources d'énergie sont transformées en vue de leur utilisation, par exemple le raffinage du pétrole brut pour produire du carburant, mais aussi l'acheminement du produit final vers les utilisateurs. La consommation d'énergie

comprend, elle, les différentes façons dont l'énergie est utilisée par les consommateurs ou les industries, et désigne le chauffage des bâtiments, comme la conduite de véhicules et l'alimentation des industries³. Chacun de ces processus émet du CO₂, et l'IA peut être utilisée, et elle l'est déjà, de multiples façons pour aider à réduire ces émissions. La capacité de l'IA à apprendre rapidement à partir d'ensembles de données et à identifier des modèles peut améliorer l'efficacité de la prise de décisions et des systèmes complexes qui existent dans l'ensemble du secteur de l'énergie⁴.

Figure 1 : L'IA et les applications dans l'ensemble du secteur de l'énergie



IA et approvisionnement énergétique

Les applications de l'IA dans le domaine de l'approvisionnement énergétique soutiennent les efforts de décarbonation, tout en les rendant plus difficiles à atteindre. En effet, l'utilisation de l'IA dans la production d'énergie renouvelable et dans l'extraction de minéraux essentiels peut accélérer les efforts globaux de décarbonation du système énergétique. Mais l'application de l'IA dans les efforts de réduction des coûts d'extraction de combustibles fossiles va à l'encontre des efforts de décarbonation (voir Figure 2 pour une étude de cas). Le potentiel global de l'IA pour décarboner l'approvisionnement énergétique n'est donc pas acquis, et nécessite plutôt l'expression d'une volonté politique explicite d'atteindre les objectifs de lutte contre le changement climatique et d'appliquer délibérément les technologies d'IA en ce sens.

L'IA a déjà des conséquences importantes dans l'exploration et l'extraction minière. La demande en minéraux et métaux précieux, tels que le lithium, le cuivre et les terres rares, devrait tripler d'ici 2030 afin de répondre aux besoins croissants en énergies propres et renouvelables³. Les gisements découverts s'épuisent déjà et l'exploration de nouveaux sites s'intensifie. Cependant, les méthodes traditionnelles d'exploration minière sont lentes, et les vastes zones à examiner, ainsi que les processus géologiques à l'œuvre ajoutent à la complexité et à l'incertitude du processus. De plus, les taux de réussite dans l'identification de nouveaux sites sont en berne. L'IA a le potentiel de lever ces obstacles et d'aider à identifier de nouveaux sites d'exploration minière avec plus de succès en combinant des algorithmes d'apprentissage avec de vastes ensembles de données scientifiques sur les processus de minéralisation critiques. Par exemple, la plateforme d'IA de DeepIQ a surclassé les outils industriels les plus avancés (un taux

de vrais positifs de 97,6 % et un taux de faux positifs de 20 %, contre un taux de vrais positifs de 90 % et un taux de faux positifs de 25 %) lors de l'identification de nouveaux sites pour l'extraction de minéraux critiques dans des contextes à forte incertitude³.

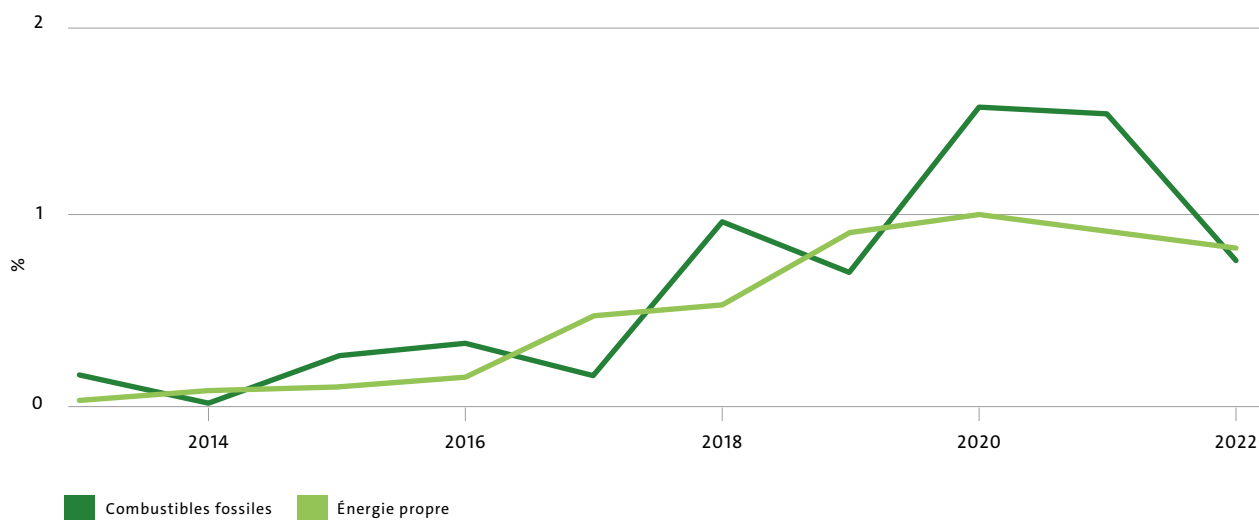
Mais l'IA est déjà utilisée massivement par les industries pétrolière et gazière. Les grands producteurs de pétrole et de gaz exploitent l'IA pour améliorer les opérations de forage, mais aussi pour estimer les réserves et accroître la précision de l'exploration, ce qui permet de réduire les coûts de développement. La puissance de l'IA est également mise à profit pour faire progresser l'exploration de ressources non conventionnelles, rarement exploitées par le passé, telles que les réserves de pétrole et de gaz dans des réservoirs perméables comme le schiste. Ces applications de l'IA constituent un risque pour les progrès réalisés dans le domaine des énergies propres et renouvelables (voir la deuxième partie sur les défis pour plus d'informations)⁵.

Malgré ces préoccupations concernant l'utilisation de l'IA pour améliorer l'extraction et la consommation de pétrole et de gaz, il existe également des moyens de tirer parti de l'IA pour réduire l'empreinte climatique actuelle de l'approvisionnement en pétrole et en gaz. Un exemple notable est son utilisation pour diminuer ou

prévenir les fuites de méthane dans les opérations pétrolières et gazières. En analysant en continu les données provenant de capteurs déportés et d'images satellites, l'IA peut prédire ou identifier rapidement les fuites de gaz. Ces émissions fugitives représentent jusqu'à 20 % de l'ensemble des émissions de méthane dans les opérations pétrolières et gazières, ce qui en fait une application à fort potentiel³. Des applications et des services de ce type sont également proposés sur le marché, par exemple par des organisations telles que GHGSTAT.

Le potentiel global de l'IA pour décarboniser l'approvisionnement énergétique n'est pas une évidence mais nécessite une intention sociétale explicite de diminution du changement climatique et la volonté d'appliquer les technologies d'IA pour atteindre cet objectif

Figure 2 : Pourcentages de brevets faisant référence à l'IA par secteur d'énergie



La figure met en évidence le pourcentage de brevets dans les secteurs de l'énergie propre et des combustibles fossiles qui font référence à l'IA. Elle montre que l'innovation en matière d'IA dans l'industrie des combustibles fossiles était globalement plus élevée (en particulier pendant la période 2020-2022) que dans les secteurs de l'énergie propre.

Source : IEA (2025)⁵.

IA et transformation énergétique

Les applications de l'IA dans la transformation (ou la production) énergétique sont les plus étudiées dans le secteur de l'énergie⁶.

Les applications de l'IA dans le secteur des énergies renouvelables en sont un exemple majeur. Si la production et l'utilisation des énergies renouvelables sont en hausse, des défis persistent. En particulier, les fluctuations des conditions météorologiques et l'intermittence de la production nuisent à la fiabilité des énergies renouvelables. L'IA peut jouer un rôle important dans la prévision de l'intermittence de ces ressources, permettant une utilisation plus efficace des énergies propres et une meilleure intégration au réseau électrique³⁴. À mesure que les bâtiments et les quartiers déploient également de plus en plus d'énergies renouvelables locales et participent à des projets solaires communautaires ou à des microréseaux, la prévision de la production renouvelable locale constitue un enjeu crucial.

Les méthodes conventionnelles de prévision de la production solaire et éolienne reposent principalement sur des modèles météorologiques, qui combinent les conditions météorologiques observées avec la connaissance scientifique du processus de circulation atmosphérique. Les approches basées sur l'IA peuvent intégrer un éventail plus large de sources de données et mettre en évidence des tendances subtiles que les modèles traditionnels basés sur la physique négligent souvent⁷. Les modèles d'apprentissage IA combinant les outils de prévision et les données météorologiques peuvent améliorer considérablement les prévisions de radiation solaire, en analysant, par exemple, des images du ciel et des données satellitaires en temps réel, avec plusieurs minutes, voire plusieurs heures d'avance sur une résolution spatiale beaucoup plus élevée. Cela permet à un microréseau solaire de quartier d'anticiper les moments où la couverture nuageuse réduira la production, afin de précharger les batteries ou d'ajuster les charges en conséquence. Une avancée importante dans la prévision des énergies renouvelables consiste à adopter des approches probabilistes plutôt que de se fier à des approches déterministes. Les architectures d'apprentissage profond (*deep learning*) offrent un cadre flexible pour produire de telles prévisions probabilistes en repérant la distribution des données de sortie du système en fonction des données des capteurs. Le résultat est une capacité de prévision plus robuste, où le système anticipe non seulement le scénario le plus probable, mais se prépare également à des scénarios moins probables⁷.

Parmi les autres tendances émergentes dans les méthodes de prévision des énergies renouvelables, on peut citer les méthodes fondées sur une connaissance de la physique et sur des modèles de prévision. L'IA basée sur la physique intègre des connaissances physiques dans les modèles d'apprentissage automatique afin d'améliorer le traitement des données, et d'en réduire les besoins pour l'entraînement. Les modèles de prévision transférables désignent les situations où un modèle global est entraîné à partir des données de centaines de systèmes photovoltaïques (PV) à travers le monde, qui sert de base commune de données, avant d'être affiné pour s'adapter à une situation spécifique (à l'instar de l'apprentissage par transfert)^{8,9}. La prévision des énergies renouvelables basée sur l'IA rend l'énergie propre produite sur site plus prévisible et plus facile à intégrer dans les réseaux. En anticipant les fluctuations de l'énergie solaire et éolienne, les gestionnaires de bâtiments et les systèmes automatisés peuvent prendre des mesures en temps voulu pour maintenir l'équilibre, qu'il s'agisse de planifier des charges flexibles ou de charger/décharger les batteries. Cette meilleure anticipation permet de minimiser le gaspillage d'énergie (renouvelable disponible) et de réduire la dépendance aux systèmes de secours alimentés par des combustibles fossiles, contribuant ainsi directement à la décarbonation.

L'IA a également le potentiel d'accroître l'efficacité de systèmes énergétiques hautement complexes, et d'en limiter les émissions grâce à une planification optimale des processus. L'identification de stratégies de réduction des émissions pour les centrales à charbon grâce à l'IA a démontré des gains d'efficacité opérationnelle pouvant conduire à des réductions des émissions de CO₂ sur des centrales à charbon¹⁰. Par exemple, dans un modèle de centrale à charbon équipée d'un système de capture de carbone postcombustion, l'utilisation de l'IA pour optimiser la planification a permis d'augmenter le taux de capture et de réduire de 51 % le gaspillage d'énergie renouvelable⁵. La capture et le stockage de carbone dans les centrales à combustibles fossiles constituent une autre application énergétique de l'IA pour explorer des options viables en vue de réduire les émissions de la production d'électricité³. L'IA peut également être mise au profit de la maintenance prédictive dans les centrales électriques, où les défaillances des infrastructures énergétiques sont anticipées et la maintenance planifiée en amont d'une panne potentielle⁴.

IA et consommation d'énergie

Les applications de l'IA pour lutter contre la consommation d'énergie, et en particulier celle d'électricité, ont un grand potentiel. En 2024, l'AIE a signalé que la consommation d'électricité avait augmenté deux fois plus vite que durant la dernière décennie¹¹. Les effets du changement climatique, comme les phénomènes météorologiques extrêmes (vagues de chaleur, tempêtes), stimulent la demande en raison du besoin croissant de chauffage ou de climatisation dans les bâtiments¹. Mais la croissance industrielle, l'électrification du secteur des transports et la numérisation comptent aussi parmi les facteurs à l'origine de la croissance de la demande en électricité³. La consommation des bâtiments représentait 60 % de la croissance de la consommation en 2024¹¹.

L'IA peut améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en optimisant les méthodes de regroupement des données et de prévision de la consommation. Les bâtiments modernes produisent des flux de données grâce à des compteurs intelligents, des capteurs IoT (*Internet of Things*) et d'autres infrastructures numériques, offrant ainsi une vue précise sur la manière et le moment où l'énergie est consommée. Ces données permettent d'obtenir des informations précieuses, notamment grâce au regroupement des modèles basés sur l'IA, qui vise à mettre en évidence la structure de la consommation énergétique sans s'appuyer sur des catégories prédéfinies. En appliquant des techniques d'apprentissage à des ensembles de données à grande échelle, les chercheurs peuvent étudier simultanément les jours, les bâtiments ou les utilisateurs en fonction de comportements de consommation similaires, révélant ainsi des profils de charge communs, des tendances saisonnières et des anomalies qui, autrement, resteraient cachés.

Par exemple, les chercheurs ont pu mettre en évidence des profils de consommateurs clairs parmi les utilisateurs d'énergie résidentiels, en fonction de leur comportement de consommation, en appliquant des techniques d'exploration de données à des ensembles de données à l'échelle de la ville. En apprenant les facteurs spécifiques à l'origine de chaque profil, qu'ils soient liés au comportement humain, aux conditions environnementales ou au fonctionnement des systèmes, les modèles d'IA peuvent prédire la demande future avec une plus grande précision¹². Parallèlement, les chercheurs enrichissent les méthodes de *clustering* en intégrant des informations contextuelles, telles que la taille des bâtiments, leur année de construction, leurs systèmes de chauffage ou leurs modes d'occupation, aux données de consommation. Cette approche multidimensionnelle vise à clarifier les facteurs physiques ou comportementaux qui influencent la consommation d'énergie, permettant à l'IA de relier les modèles aux caractéristiques spécifiques des bâtiments. Ces progrès contribuent à une compréhension plus détaillée et plus exploitable de la façon dont les bâtiments consomment l'énergie, jetant ainsi les bases de stratégies de décarbonation ciblées.

S'appuyant sur ces principes de regroupement, l'IA joue désormais un rôle de plus en plus central dans la prévision de la demande énergétique. La prévision de la charge à court terme, allant de quelques minutes à quelques jours, est cruciale pour l'efficacité et la flexibilité des réseaux. Les modèles d'apprentissage automatique ont montré d'excellents résultats dans ce domaine, surpassant les techniques statistiques classiques en modélisant efficacement des influences non linéaires, telles que les conditions météorologiques et le comportement des personnes. Il a été démontré que l'IA améliore la précision des prévisions de consommation à court terme de plus de 30 % par rapport aux



modèles génériques¹³. Les méthodes avancées d'IA, notamment le *gradient boosting* et les réseaux de neurones profonds (*deep neural networks*), peuvent réduire les erreurs de prévision de 20 à 30 % dans les bâtiments commerciaux¹⁴. Au niveau des quartiers, l'IA permet une prévision hiérarchique, captant la demande à la fois à l'échelle individuelle et agrégée, avec des techniques telles que les réseaux neuronaux graphiques qui modélisent les relations entre les bâtiments. Cela est particulièrement bénéfique dans les zones à usage mixte, où les consommations résidentielles et commerciales suivent des tendances différentes. L'apprentissage par transfert améliore encore l'utilité de ces modèles en permettant d'adapter les connaissances issues d'un jeu de données à de nouveaux bâtiments, même avec des données historiques limitées¹⁵.

L'un des piliers de la décarbonation des systèmes énergétiques consiste à exploiter la flexibilité de la demande, c'est-à-dire la capacité à modifier le moment et la manière dont l'énergie est consommée. Une application efficace de la gestion de l'énergie du côté de la demande est le transfert de charge, qui consiste à déplacer la consommation d'énergie des périodes de pointe (lorsque l'électricité est chère ou à forte intensité carbone) vers les périodes creuses¹⁶. Les programmes de réponse à la demande visent à réduire la consommation d'électricité pendant les périodes critiques en incitant ou en contrôlant

directement les appareils, par exemple en abaissant à distance la température des thermostats ou en mettant temporairement en veille les chauffe-eau électriques¹⁵. Grâce aux progrès de l'IA, des approches plus optimisées peuvent être utilisées afin d'améliorer à la fois la participation et l'efficacité des programmes de réponse à la demande.

Les chercheurs ont utilisé l'apprentissage par renforcement (RL), qui désigne des algorithmes d'autoapprentissage optimisant les stratégies de contrôle grâce à une interaction continue et à l'apprentissage de l'environnement, pour le contrôle de la consommation des bâtiments. Dans un cadre RL, un agent (représentant par exemple un système de gestion énergétique d'un bâtiment) apprend à prendre les mesures optimales, telles que le réglage des thermostats, la réduction de l'éclairage ou la recharge des véhicules électriques, afin de minimiser une fonction de coût spécifique (par exemple, le coût de l'énergie, la demande électrique de pointe ou les émissions de carbone) sous certaines contraintes (par exemple, le maintien du confort)¹⁷. Des recherches récentes ont démontré que les contrôleurs RL sont

L'IA améliore les prévisions de charge à court terme de plus de 30 % par rapport aux modèles génériques. Les méthodes d'IA avancées, notamment le gradient boosting et les réseaux neuronaux profonds, peuvent réduire les erreurs de prévision de 20 à 30 % dans les bâtiments commerciaux

nettement plus performants que les stratégies basées sur des règles fixes pour la réponse à la demande. Par exemple, Madani *et al.*¹⁸ ont développé un cadre de contrôle basé sur le RL pour les petits bâtiments commerciaux qui optimise simultanément le coût de l'énergie, l'écrêtage des pics de charge et le confort des occupants. En appliquant l'apprentissage par renforcement profond (DRL) aux données réelles des bâtiments, le système a pu apprendre de manière indépendante comment réduire les pics de demande du matin et ajuster les opérations en fonction des tarifs horaires. Leur modèle a surpassé le contrôle heuristique conventionnel d'environ 15 à 25 % en termes de réduction de la demande de pointe et du coût énergétique total, tout en maintenant la température intérieure dans des plages de confort acceptables. Cela démontre la capacité de l'IA à apprendre des stratégies de contrôle complexes tout en s'adaptant à des conditions changeantes. Ces stratégies incluent le prérefroidissement d'un espace avant une période de prix élevé, et l'équilibrage intelligent de la variation de l'éclairage avec les réglages du système CVC pour minimiser l'inconfort. Des entreprises telles qu'Uplight déploient déjà des systèmes de réponse à la demande basés sur l'IA en regroupant des milliers de foyers et d'entreprises pour les services de réseau¹⁹. Les déploiements sur le terrain ont en outre montré comment ces réseaux gérés par l'IA peuvent répondre efficacement aux événements du réseau, en offrant une flexibilité et une stabilité à une vitesse et à une échelle que les méthodes manuelles ne peuvent égaler²⁰.

Si les applications de l'IA pour la décarbonation évoquées ci-dessus présentent un potentiel important, sans une mise à l'échelle et une adoption à grande échelle, les avantages escomptés au niveau régional ou mondial ne se concrétiseront pas. La deuxième partie examine les défis et les implications liés à cette intégration et à la mise à l'échelle potentielle de l'IA dans le secteur de l'énergie.

Défis et conditions favorables à la décarbonation assistée par l'IA dans le secteur de l'énergie

Bien qu'il existe des implémentations prometteuses de solutions d'IA dans le cadre de projets pilotes et de certaines applications spécifiques, leur déploiement à plus grande échelle dans le secteur de l'énergie reste limité, ce qui souligne la nécessité d'étendre les

démonstrations sur le terrain afin de valider les performances, de renforcer la confiance dans la technologie et de créer des cadres standardisés pour une mise en œuvre à grande échelle.

La rareté des données de haute qualité nécessaires pour entraîner des modèles d'IA robustes dans divers contextes opérationnels complique l'adoption à grande échelle et la fiabilité de ces modèles. Un autre obstacle majeur subsiste : la difficulté à généraliser les approches actuelles à des zones climatiques différentes, des types de bâtiments, des profils de charge et des objectifs de réseau variables, les modèles étant souvent entraînés ou testés uniquement dans leurs environnements spécifiques. Renforcer la confiance dans les technologies numériques telles que l'IA constitue un autre défi. Les solutions d'IA doivent être explicables et transparentes afin que les producteurs et les consommateurs d'énergie puissent leur faire confiance et les adopter.

Si l'IA peut accélérer des innovations importantes en faveur de la décarbonation, elle peut également, si elle n'est pas utilisée avec prudence, remettre en cause nos efforts en matière de décarbonation et créer de nouveaux obstacles

Il existe une fracture numérique profonde et persistante entre les régions du monde en termes d'inégalité d'accès, de connaissances, de compétences et de données pour les technologies numériques²¹. Malheureusement, la fracture numérique a un impact négatif sur les personnes les plus vulnérables et marginalisées, tant dans les pays du Nord que dans ceux du Sud, et de nouvelles formes de fracture numérique apparaissent (par exemple, l'inégalité des données, la sensibilisation aux algorithmes et la qualité de l'accès au numérique) en raison de l'évolution rapide des technologies.^{22,23} Ensuite, il existe des défis liés à l'acquisition responsable, à l'accessibilité, à la conception et à l'utilisation de données et d'algorithmes appropriés pour l'entraînement de l'IA²⁴. De plus, un déficit de confiance envers l'IA et d'autres technologies dotées de capacités prédictives et analytiques s'est déjà installé au sein de la société et des institutions publiques, certains appelant même à l'interdiction pure et simple de technologies telles que l'IA générative et l'analyse prédictive dans le secteur public, et plus particulièrement dans le secteur énergétique. Par exemple, pour les communautés isolées du Canada et les populations des Premières Nations et autochtones, l'usage de l'IA dans leurs systèmes énergétiques locaux entraîne des risques supplémentaires. Ces derniers concernent la souveraineté des données, la protection de la vie privée et le manque de formation appropriée aux compétences en IA, et ils sont liés au contexte local et aux particularités culturelles de chaque communauté.²⁵ Par conséquent, une approche désinvolte de l'introduction de l'IA dans les systèmes énergétiques des communautés marginalisées peut entraîner d'importants problèmes sociaux et économiques, exacerbant encore davantage les relations déjà tendues entre ces communautés et les gouvernements fédéraux, provinciaux et locaux.

Si l'IA peut contribuer à introduire et à accélérer des innovations importantes en faveur de la décarbonation, elle peut également, si elle est utilisée sans précaution, remettre en cause nos efforts et créer de nouveaux obstacles. En plus de la consommation énergétique croissante de l'IA elle-même, son utilisation pour optimiser les opérations dans des industries très polluantes, comme celles des combustibles fossiles, peut retarder la suppression progressive de ces derniers – pourtant essentielle pour atteindre nos objectifs climatiques²⁶. Un autre effet rebond potentiel concerne le secteur du bâtiment, où une importance excessive accordée à l'amélioration de l'efficacité énergétique pourrait pérenniser les systèmes énergétiques alimentés au pétrole et au gaz dans les bâtiments, et retarder la transition vers les systèmes renouvelables qui sont finalement nécessaires pour soutenir les efforts de décarbonation. Compte tenu de l'expansion rapide de l'IA et d'autres technologies numériques, ces effets rebond, parmi d'autres, n'ont pas encore été entièrement mesurés ni répertoriés²⁷.

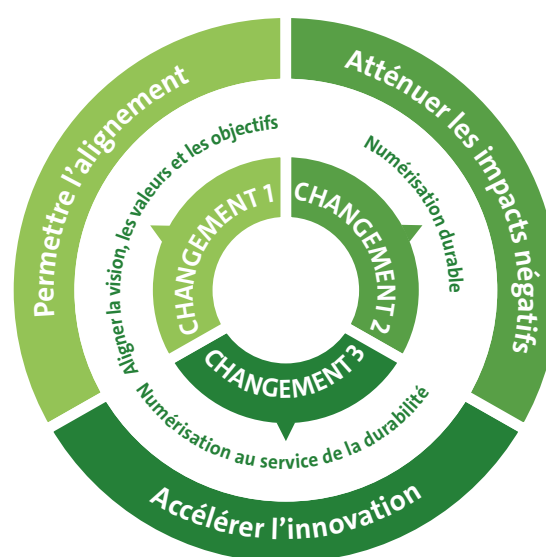


Les problèmes complexes liés au déploiement de l'IA dans le secteur de l'énergie nécessitent donc des solutions innovantes et une réflexion créative. Heureusement, il existe déjà des plateformes et des outils offrant une IA responsable, ouverte et démocratisée pour le secteur de l'énergie et au-delà. En Afrique du Sud, des entreprises ont déployé des modèles de centrales électriques virtuelles (VPP) alimentées par l'IA. Les VPP créent un système intégré et interconnecté qui permet de partager des ressources (panneaux solaires, éoliennes, systèmes de stockage, etc.) sur de vastes zones géographiques, grâce à des algorithmes d'IA qui aident à optimiser et à prévoir en temps réel la dynamique de l'offre et de la demande²⁸. De même, en Inde, les microréseaux alimentés par l'IA dans des villages transforment la relation entre le gouvernement et les consommateurs en matière d'énergie, et établissent un écosystème autonome où les communautés partagent les ressources et s'engagent à utiliser l'électricité de manière responsable²⁹. Les innovations communautaires visant à atteindre les objectifs de développement durable des Nations Unies ont pris un essor considérable depuis la pandémie mondiale et de nombreuses communautés à travers le monde, en particulier celles qui sont isolées, rurales, marginalisées ou mal desservies, cherchent à développer de nouveaux mécanismes locaux, afin de co-crée de la valeur au sein de leurs propres écosystèmes^{30,31}.

Cependant, l'utilisation aveugle de l'IA peut être dangereuse et nuire aux communautés mêmes qu'elle est censée aider. Par exemple, le First Nations Technology Council du Canada a exprimé de vives inquiétudes concernant l'adoption de systèmes d'IA basés sur des références occidentales qui ne reflètent pas nécessairement les besoins des communautés autochtones, et qui excluent les connaissances, les valeurs et les modèles de gouvernance autochtones³². Il est donc essentiel d'adopter une approche responsable dans l'usage de l'IA au service des communautés vulnérables. Cette approche responsable commence par l'inclusion des communautés dans les processus décisionnels liés à l'IA, ainsi que par leur participation aux actions de plaidoyer, d'éducation et de sensibilisation concernant les bénéfices et les risques potentiels de ces technologies^{33,34}. Il est également important de garantir la protection des données d'entraînement et de répondre aux préoccupations en matière de sécurité et de confidentialité. Enfin, les algorithmes doivent être développés selon une approche « ne pas nuire » (*do no harm*), qui atténue les biais et les préjugés et garantit une participation équitable des communautés, afin qu'elles se sentent autonomisées plutôt qu'exploitées^{34,35}.

Malgré les progrès de l'IA, l'intervention et l'expertise humaines resteront nécessaires pour faire face à des circonstances imprévues et répondre aux préoccupations éthiques et sociales liées à la numérisation³. Aligner l'IA et les technologies numériques sur les principes du développement durable, atténuer les impacts négatifs de l'IA et tirer parti de l'IA pour accélérer les projets durables nous aidera à adopter l'IA de manière plus réfléchie³⁶ (voir Figure 3).

Figure 3 : Trois changements vers la durabilité numérique



1. Aligner la vision, les valeurs et les objectifs de l'ère numérique sur la durabilité. 2. Atténuer les impacts sociaux et environnementaux négatifs de la numérisation. 3. Accélérer l'innovation en orientant les efforts d'innovation numérique vers des solutions durables.

Source : CODES (2022)³⁶.

Conclusion

L'IA permet le déploiement d'une multitude de solutions intégrées susceptibles d'accélérer la décarbonation du secteur de l'énergie, mais des défis persistent. Outre les enjeux sociaux, financiers, des infrastructures et des technologies évoqués précédemment, il convient également de prêter attention aux règles existantes, aux structures de pouvoir et aux modes de pensée qui régissent notre société et nous maintiennent sur une trajectoire fortement carbonée^{11,37}. Si ces règles, structures de pouvoir et modes de pensée ne sont pas transformés, les changements systémiques recherchés ne pourront être atteints, en dépit des avancées réalisées en matière d'IA et d'autres technologies³⁷. Des décisions éclairées, fondées sur une théorie du changement clairement définie, sont nécessaires de la part de l'ensemble des acteurs clés – États membres, secteur privé et société civile – afin d'opérer une transition vers une trajectoire zéro carbone bénéfique à l'ensemble des populations et à notre planète.

À propos des auteurs

Damon Matthews est directeur par intérim de *Future Earth Canada* et professeur au département de géographie, d'urbanisme et d'environnement de l'Université Concordia. **Nilushi Kumarasinghe** est consultante chez *Future Earth Canada* et a travaillé comme associée de recherche à l'Université Concordia (2022-2025). **Ursula Eicker** est titulaire de la Canada Excellence Research Chair in Smart, Sustainable and Resilient Cities and Communities (CERC) à l'Université Concordia et professeure au département de génie civil, du bâtiment et de l'environnement de l'Université Concordia. **Kathryn Kaspar** est doctorante au département de génie civil, du bâtiment et de l'environnement de l'Université Concordia. **Shahin Masoumi-Verki** a travaillé comme assistant de recherche à l'Université Concordia. **Suchit Ahuja** est professeur agrégé à la John Molson School of Business et directeur du programme de maîtrise (MSc) en Business Analytics & Technology Management à l'Université Concordia.

Cet article a été dirigé par *Future Earth Canada*, une organisation qui œuvre pour mobiliser la recherche afin d'agir à l'intersection de la durabilité et de la numérisation. *Future Earth Canada* est hébergée par l'initiative « Durabilité à l'ère numérique » (DEN) de l'Université Concordia.

L'IA au service de la gestion énergétique des bâtiments

Défis et opportunités

Nofri Yenita Dahlan
Universiti Teknologi MARA

Nurul Aqilah Mahmud
Universiti Teknologi MARA

Alors que la réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'efficacité énergétique deviennent des priorités, les bâtiments représentent des cibles clés en raison de leur forte consommation d'énergie et de leurs émissions de carbone. Cet article explore la manière dont l'intelligence artificielle (IA) transforme la gestion énergétique des bâtiments en remédiant aux problèmes d'isolation, en améliorant l'automatisation et en soutenant les objectifs de durabilité. Combinée à l'IoT (Internet des objets), aux jumeaux numériques, au photovoltaïque solaire et aux systèmes de stockage par batteries (BESS), l'IA permet d'optimiser les systèmes CVC (chauffage, ventilation et climatisation), l'éclairage, la répartition de la charge et le confort des occupants tout en réduisant les coûts et le gaspillage énergétique.

L'article aborde également le rôle des politiques publiques, des nouveaux modèles économiques et de la collaboration entre parties prenantes pour accélérer l'adoption de ces technologies.

Malgré le vieillissement des infrastructures, la fragmentation des données et les nouvelles préoccupations de cybersécurité, les possibilités d'amélioration restent considérables. L'IA constitue un levier clé dans la transition vers des bâtiments résilients, adaptatifs et à faible empreinte carbone, capables de répondre à la fois aux exigences actuelles et aux objectifs climatiques à long terme.



Introduction

Les bâtiments, qu'ils soient résidentiels, commerciaux ou industriels, représentent près de 30 % de la consommation d'énergie mondiale et environ 40 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie¹. Avec l'urbanisation rapide, la croissance économique et les effets du changement climatique, la demande énergétique des bâtiments devrait augmenter de manière significative, ce qui place ce secteur au cœur de la réalisation des objectifs mondiaux en matière de climat et de durabilité². Il faut donc maîtriser cette dynamique, afin de réduire les émissions, de renforcer la sécurité énergétique et de garantir un développement urbain durable. Une gestion efficace de l'énergie des bâtiments implique une planification stratégique à grande échelle : un suivi et une optimisation de la consommation d'énergie, sans sacrifier le confort des usagers, tout en minimisant l'impact environnemental³. En permettant l'analyse en temps réel, la prévision de la demande, le contrôle prédictif et la prise de décision intelligente, l'IA contribue à maximiser l'efficacité des systèmes et à soutenir l'exploitation de bâtiments à faibles émissions de carbone⁴.

Cet article met en évidence les défis et les opportunités liés à l'utilisation de l'IA dans la gestion énergétique des bâtiments, présente des applications concrètes de l'IA dans ce domaine et se conclut par des perspectives d'avenir et des recommandations stratégiques.

État d'avancement du déploiement de l'IA dans la gestion énergétique des bâtiments

Entre 2010 et 2022, la consommation énergétique des bâtiments a augmenté de près de 1,1 % par an, pour atteindre environ 133 exajoules (EJ)¹. Bien que les technologies numériques aient rapidement progressé, la plupart des bâtiments sont encore conçus et exploités sans recourir à ces outils : ils gaspillent alors de grandes quantités d'énergie, tout en réduisant le confort des habitants. En Europe, 85 % des bâtiments ont été construits avant l'adoption des normes modernes, ce qui explique pourquoi près de 75 % d'entre eux affichent de mauvaises performances énergétiques⁵. Cela dit, les performances énergétiques des bâtiments s'améliorent progressivement, grâce à l'adoption croissante des

technologies numériques¹. Selon le rapport d'évaluation de l'AIE⁴ présenté dans la figure 1, l'IA permet d'optimiser la consommation d'énergie. Grâce à un contrôle intelligent du chauffage, de la ventilation et de la climatisation, à la maintenance prédictive et à la gestion de l'énergie en temps réel, l'IA est un véritable atout dans la modernisation des bâtiments. Cependant, son utilisation dans la gestion des ressources, la conception des systèmes et l'automatisation reste limitée, voire inexistante. Cette situation montre bien que les usages de l'IA se concentrent davantage sur l'amélioration des opérations quotidiennes que sur la conception globale ou la stratégie énergétique des bâtiments.

Figure 1 : Applications de l'IA pour l'optimisation énergétique par secteur

	Pétrole et gaz	Minéraux critiques	Électricité	Réseaux	Industrie	Transports	Bâtiments
1. Gestion des ressources	ÉLEVÉ	MOYEN	MOYEN	N.D.	MOYEN	N.D.	N.D.
2. Conception et développement	MOYEN	FAIBLE	ÉLEVÉ	MOYEN	MOYEN	FAIBLE	N.D.
3. Optimisation opérationnelle	MOYEN	FAIBLE	ÉLEVÉ	ÉLEVÉ	ÉLEVÉ	ÉLEVÉ	ÉLEVÉ
4. Automatisation et autonomie	MOYEN	MOYEN	MOYEN	FAIBLE	ÉLEVÉ	MOYEN	N.D.
							

Source : IEA (2025)⁶.

Défis et opportunités dans la gestion énergétique des bâtiments

La gestion énergétique des bâtiments est en pleine transformation grâce aux technologies numériques. Elles ouvrent de nouvelles perspectives d'amélioration de l'efficacité, de réduction des émissions et de renforcement de la réactivité des systèmes. Cependant, des défis majeurs subsistent. Cette section explore ces enjeux ainsi que les nouvelles opportunités de développement de bâtiments plus intelligents et plus durables.

Défis

Consommateurs d'énergie passifs

La plupart des bâtiments fonctionnent comme des utilisateurs d'énergie passifs⁴, ce qui complique la gestion efficace de l'énergie. Ils ne peuvent souvent pas ajuster leur consommation d'énergie en fonction des prix de l'électricité, des besoins du réseau ou des énergies renouvelables disponibles, comme l'énergie solaire. Cette situation entraîne une forte demande en énergie le soir, lorsque la production solaire est faible, ce qui augmente à la fois les coûts et la dépendance aux combustibles fossiles. Sans systèmes intelligents, les bâtiments ont tendance à fonctionner de manière inefficace, gaspillant de l'énergie et manquant des occasions d'utiliser des panneaux solaires ou des batteries. De plus, de nombreux occupants et exploitants de bâtiments sont peu sensibilisés à leur rôle dans la gestion de l'énergie⁶. Ils ne comprennent pas comment leur comportement influence la consommation d'énergie ou comment les outils numériques peuvent les aider. Sans un engagement fort des pouvoirs publics, une formation appuyée et des incitations appropriées, même les meilleures technologies risquent de ne pas être exploitées pleinement. Cette combinaison de systèmes et d'utilisateurs passifs complexifie l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments.

Fragmentation des données et manque d'intégration

De nombreux bâtiments fonctionnent avec des systèmes distincts pour l'éclairage, le CVC, la sécurité et le suivi énergétique, souvent

fournis par différents fabricants utilisant des logiciels ou des formats de données incompatibles entre eux. Ces systèmes communiquent rarement, ce qui limite l'optimisation globale du bâtiment. Les équipements existants reposent souvent sur des protocoles propriétaires, rendant l'intégration avec les systèmes de gestion énergétique des bâtiments (BEMS) complexe et coûteuse. Sans standardisation des formats de données et des protocoles de communication, il devient difficile d'agréger les données dans une plateforme unifiée, permettant une analyse complète. Dans certains cas, des données restent enfermées dans un ou plusieurs systèmes, ou sont totalement absentes en raison d'une couverture limitée des capteurs, ou de l'usage de registres manuels. Par ailleurs, des barrières organisationnelles et liées à la confidentialité restreignent souvent l'accès aux données, les gestionnaires d'installations, les propriétaires de bâtiments et les fournisseurs de services énergétiques n'ayant chacun qu'une visibilité partielle sur les données⁶.

Surveillance, contrôle et connectivité en temps réel

La surveillance énergétique des bâtiments repose traditionnellement sur des compteurs qui ne décomptent que la consommation totale d'énergie, offrant peu d'informations sur la façon dont elle est utilisée dans des systèmes ou des espaces spécifiques. Cet écueil est particulièrement fréquent dans les bâtiments anciens, qui ne disposent souvent pas de sous-compteurs, de capteurs intelligents ou d'appareils connectés nécessaires à la surveillance en temps réel. En conséquence, les exploitants de bâtiments ne sont pas en mesure de détecter les inefficacités, de réagir rapidement aux problèmes ou d'optimiser efficacement la consommation d'énergie. Pour remédier à ces limites, le BEMS a fait son apparition dans les années 1990, intégrant des capteurs, des microprocesseurs et des réseaux de communication afin de surveiller et de contrôler les principales sources de consommation d'énergie des bâtiments, comme le chauffage, la ventilation et la climatisation (CVC) et l'éclairage⁷. Cependant, l'adoption généralisée du BEMS a été lente en raison des coûts d'installation élevés et de la complexité technique⁶. Et ces défis sont aggravés par une connectivité numérique limitée⁴.

Préoccupations en matière de cybersécurité et de confidentialité

La mise en œuvre de systèmes de gestion énergétique intelligente dans les bâtiments pose des défis importants en matière de cybersécurité et de confidentialité des données. Les systèmes de gestion énergétique dans les bâtiments s'appuient en effet de plus en plus sur des appareils connectés et sur la collecte de données en temps réel. Ces méthodes augmentent le risque de cyberattaques, de violations et d'accès non autorisés aux données.

De tels incidents peuvent entraîner des pertes de données, voire des pertes financières, des perturbations opérationnelles, et salir la réputation des acteurs impliqués. Ces systèmes intelligents de gestion de l'énergie collectent souvent des informations sensibles, notamment des mesures de performance des bâtiments et des données sur le comportement des occupants, ce qui soulève des préoccupations supplémentaires en matière de confidentialité⁸. Ces risques peuvent alors susciter une résistance chez les propriétaires et les exploitants de bâtiments à adopter des systèmes numériques, en particulier dans les secteurs soumis à des exigences strictes en matière de réglementation ou de confidentialité.

Équilibrer la consommation électrique de l'IA avec ses bénéfices en matière d'économie d'énergie

L'un des principaux défis de l'IA réside dans l'équilibre entre l'énergie qu'elle consomme et les économies d'énergie qu'elle permet de réaliser. Si l'AIE estime que les solutions d'IA pourraient réduire jusqu'à 5 % des émissions liées à l'énergie d'ici 2035, les modèles d'IA, en particulier de grande taille ou basés sur le cloud, restent énergivores⁴. Des études montrent que l'entraînement de grands modèles d'IA peut consommer autant d'énergie que plusieurs voitures sur l'ensemble de leur cycle de vie⁸. Cette problématique est accentuée dans les applications nécessitant un traitement continu des données, comme le contrôle en temps réel et les jumeaux numériques. Pour résoudre ce problème, les chercheurs explorent des approches d'IA plus efficaces, telles que des modèles plus petits, le calcul en périphérie ou *edge computing* (traitement des données localement) et des algorithmes plus intelligents qui consomment moins d'énergie⁹. Le principal défi consiste à faire en sorte que l'IA aide les bâtiments à économiser plus d'énergie qu'elle n'en consomme, afin que son utilisation soutienne les objectifs de durabilité.

L'IA ouvre la voie dans le domaine des solutions énergétiques modernes pour les bâtiments

Opportunités

Intelligence artificielle (IA) avancée et apprentissage automatique (ML)

L'évolution de l'IA marque le passage des premiers systèmes de raisonnement construits sur des règles à des modèles avancés fondés sur des données, dépassant ainsi les limites en matière d'évolutivité et d'adaptabilité¹⁰. Les récentes avancées liées à la puissance de calcul, à la disponibilité des données et aux algorithmes d'apprentissage automatique, en particulier les réseaux neuronaux profonds, ont favorisé l'essor rapide de l'IA avancée, y compris les modèles génératifs⁴. Depuis 2008, la quantité de données d'entraînement a été multipliée par près de 30 000, et la puissance de calcul utilisée pour entraîner des modèles de pointe a été multipliée approximativement par 350 000 depuis 2014, tandis que les coûts matériels ont fortement diminué¹. Ces progrès ont donné naissance à des systèmes d'IA puissants et flexibles qui jouent désormais un rôle central dans des secteurs à forte valeur ajoutée – y compris la gestion énergétique des bâtiments. Advanced Building Energy Management (BEMS).

Systèmes avancés de gestion énergétique des bâtiments (BEMS)

Les systèmes BEMS avancés offrent d'importantes opportunités d'amélioration de l'efficacité énergétique, de réduction des coûts opérationnels et de soutien des objectifs de développement durable. Grâce à des technologies telles que l'IoT, le *cloud computing*, l'IA et le *machine learning* (ML), les systèmes BEMS modernes peuvent surveiller, prévoir et contrôler en temps réel les systèmes CVC, l'éclairage et d'autres installations du bâtiment, en optimisant les performances en fonction des profils d'occupation, des conditions météorologiques et des tendances d'utilisation¹¹.

Technologies d'IA émergentes dans le bâtiment

Les technologies émergentes dans le domaine du bâtiment offrent de vastes possibilités d'intégration de l'IA dans l'optimisation de la gestion de l'énergie. Par exemple, l'IA peut améliorer les performances des systèmes d'énergie renouvelable (ER) grâce à l'alignement des données météorologiques avec la demande énergétique du bâtiment¹². Lorsqu'elle est couplée à un système de stockage par batteries, l'IA peut gérer de manière intelligente les cycles de charge et de décharge afin de maximiser l'autoconsommation, de réduire les pics de demande et de s'adapter aux tarifs d'électricité dynamiques¹³. Dans les systèmes CVC intelligents, l'IA peut ajuster en permanence les paramètres en fonction de l'occupation, des prévisions météorologiques et de la qualité de l'environnement intérieur, garantissant ainsi le confort tout en minimisant la consommation d'énergie¹⁴. L'éclairage intelligent intégré à des capteurs de présence et de lumière naturelle peut encore être amélioré grâce à l'IA pour adapter dynamiquement les horaires et l'intensité de l'éclairage¹⁵. De plus, l'IA peut être appliquée aux compteurs intelligents, aux appareils connectés et aux infrastructures de recharge des véhicules électriques (VE) intégrées aux bâtiments, optimisant ainsi les flux d'énergie dans l'ensemble de l'écosystème du bâtiment.

Modèles *Energy as a Service*

Les modèles *Energy as a Service* (EaaS) offrent un moyen pratique d'intégrer l'IA dans la gestion énergétique des bâtiments. L'EaaS permet aux propriétaires de bâtiments d'accéder à des solutions d'efficacité énergétique, des technologies intelligentes et des énergies renouvelables avec des modèles basés sur la performance ou l'abonnement, où les paiements sont effectués en fonction des économies d'énergie réelles ou des résultats des services. Grâce à des approches telles que le contrat de performance énergétique (EPC), les propriétaires de bâtiments peuvent s'associer à des prestataires qui installent et gèrent des systèmes améliorés par l'IA, tout en étant rémunérés par le biais des économies d'énergie partagées.

Politiques et mesures incitatives de soutien

Certaines politiques accélèrent l'adoption de l'IA dans la gestion énergétique des bâtiments. La refonte de la directive relative à l'efficacité énergétique (2023/1791) de l'UE impose des améliorations de performance des grands bâtiments et encourage les technologies intelligentes¹⁶, tandis que le programme pour une Europe numérique (Digital Europe) alloue 7,5 milliards d'euros à la transformation numérique, y compris l'IA et l'IoT pour l'efficacité énergétique¹⁷. Le programme *Green Mark Incentive Scheme* de Singapour cofinance les systèmes BEMS dans le cadre de sa stratégie *Smart Nation*¹⁸. En Corée du Sud, le *Korean New Deal* et la stratégie nationale en matière d'IA soutiennent des projets pilotes de bâtiments intelligents par des subventions pour l'intégration de l'IA¹⁹. Aux États-Unis, la loi sur la réduction de l'inflation (2022) prévoit des crédits d'impôt pour les mises à niveau énergétiques intelligentes²⁰. La cybersécurité est également une priorité, avec le *BSI IT-Grundschutz* en Allemagne²¹ et la *Cyber Security Strategy* 2023 2030 en Australie, qui traitent des risques liés aux systèmes énergétiques intelligents²². Des cadres politiques plus larges, tels



que la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments et le programme américain *ENERGY STAR*, soutiennent également le déploiement des BEMS et des technologies énergétiques intelligentes²³.

Solutions et technologies basées sur l'IA dans la gestion énergétique des bâtiments

Alors que la consommation d'énergie dans les bâtiments continue d'augmenter, la gestion énergétique traditionnelle s'oriente vers des systèmes d'IA. Elle permet une exploitation plus intelligente, adaptative et durable des bâtiments grâce à l'apprentissage automatique, à l'analyse prédictive et aux données en temps réel. Mais l'IA aide aussi à prévoir la demande, à optimiser la consommation d'énergie et à automatiser les décisions. Cette section explore les applications actuelles de l'IA dans la gestion énergétique des bâtiments, en mettant en avant une étude de cas réelle pour illustrer ses avantages et son intégration.

Aperçu des applications de l'IA dans la gestion énergétique des bâtiments

Les solutions modernes basées sur l'IA offrent un large éventail de fonctionnalités, allant de l'automatisation de base à la prise de décision avancée. Ces systèmes traitent de grands volumes de données provenant de capteurs, de commandes et de saisies utilisateur afin de fournir des informations exploitables. L'intégration de l'IA à l'IoT et aux jumeaux numériques permet une surveillance et un contrôle efficaces des systèmes des bâtiments tels que le CVC et l'éclairage.

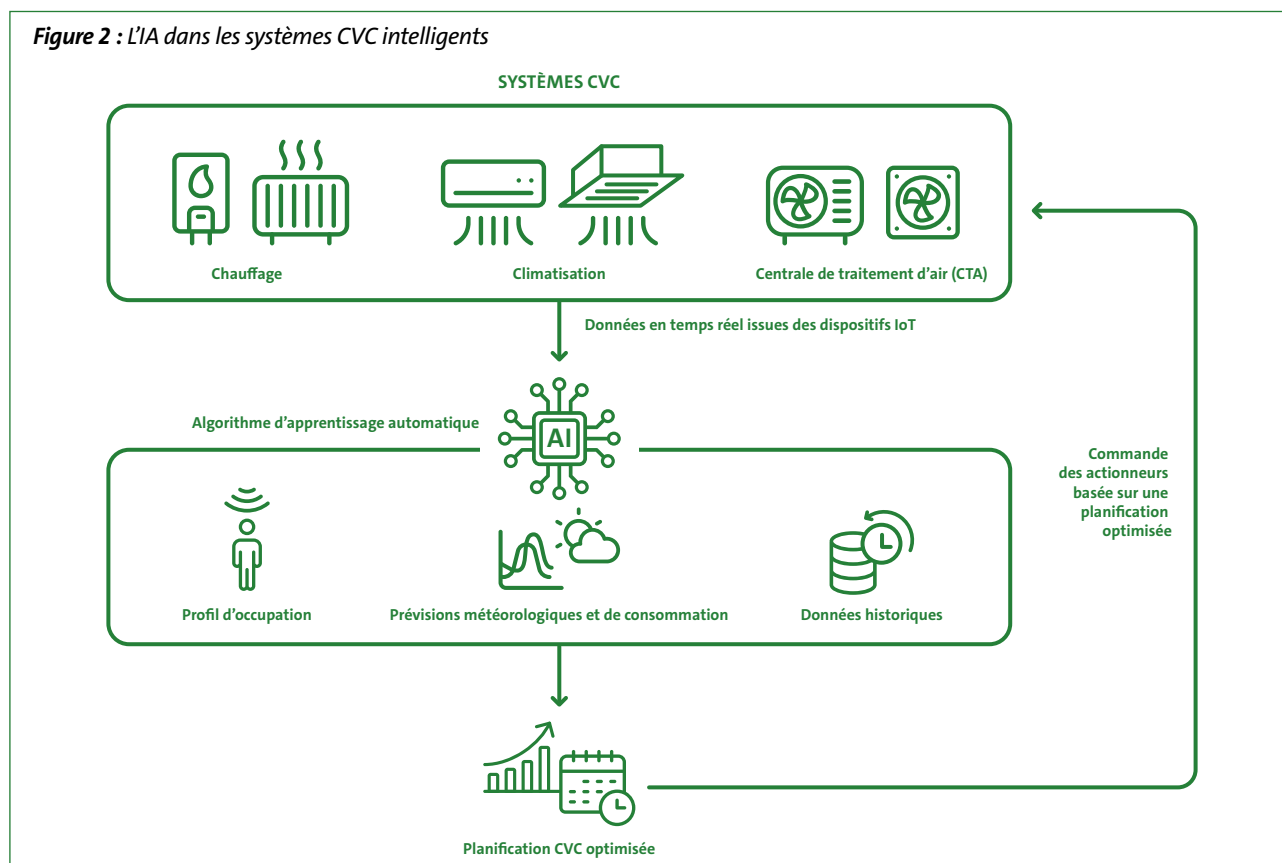
Les principales fonctionnalités de l'IA dans la gestion de l'énergie sont :

- **L'IA dans les systèmes CVC intelligents** : optimisation des programmes de chauffage et de refroidissement en fonction des profils d'occupation, des prévisions météorologiques et des modèles de confort thermique afin de réduire le gaspillage d'énergie tout en maintenant le confort.
- **Réponse à la demande** : prédiction des conditions de charge maximale et lancement des actions automatisées de délestage ou de transfert de charge en réponse aux signaux de prix de l'électricité ou aux conditions du réseau électrique.
- **Maintenance prédictive** : détection des anomalies et des premiers signes de défaillance des équipements à l'aide de l'apprentissage automatique et des données des capteurs, ce qui permet d'effectuer une maintenance proactive et de réduire au minimum les temps d'arrêt et les coûts.
- **Exploitation intelligente des bâtiments grâce à l'IoT et aux jumeaux numériques** : utilisation de répliques virtuelles des bâtiments et de données en temps réel pour simuler, analyser et optimiser des opérations telles que l'éclairage, le chauffage, la ventilation et la climatisation, ainsi que l'utilisation de l'espace avant leur mise en œuvre.
- **Intégration des panneaux solaires photovoltaïques et des batteries** : gestion de la production d'énergie renouvelable et des systèmes de batteries en prévoyant la production solaire, en planifiant l'utilisation du stockage et en maximisant l'autoconsommation ou l'exportation vers le réseau en fonction des signaux tarifaires.

L'IA dans les systèmes CVC intelligents

Les systèmes CVC représentent généralement la plus grande part de la consommation d'énergie dans les bâtiments. La figure 2 illustre la manière dont ces systèmes fondés sur l'IA exploitent l'apprentissage automatique pour analyser les profils d'occupation, les prévisions météorologiques et les données historiques d'utilisation afin d'optimiser les programmes de chauffage et de refroidissement. Ces systèmes s'adaptent en temps réel, et réduisent le gaspillage d'énergie tout en maintenant le confort des occupants.

Figure 2 : L'IA dans les systèmes CVC intelligents



Un cas notable est celui de l'*Edge Building* à Amsterdam, qui utilise des systèmes CVC alimentés par l'IA, connectés à 28 000 capteurs, qui surveillent l'occupation, l'éclairage, la température et l'humidité²⁴. Ce contrôle intelligent a permis de réduire la consommation d'électricité de 70 % et d'obtenir une note de durabilité BREEAM de 98,36 %²⁵.

Un autre exemple est celui du Siam Cement Group (SCG) à Bangkok, en Thaïlande, où un système d'optimisation CVC basé sur l'IA a été mis en place en partenariat avec Resync. Il utilise des données en temps réel sur l'occupation et l'environnement pour ajuster le refroidissement, ce qui permet de réduire de 15 % la consommation d'énergie du système CVC et d'améliorer l'efficacité opérationnelle²⁶.

Ces exemples illustrent la façon dont l'IA améliore l'efficacité énergétique, réduit les coûts opérationnels et contribue aux objectifs de décarbonation tout en optimisant le confort des occupants.

Réponse à la demande alimentée par l'IA

Les programmes de réponse à la demande (DR) permettent aux bâtiments de réduire leur consommation d'électricité pendant les heures de pointe ou de la décaler aux périodes creuses. L'IA améliore la DR en prédisant les pics de demande à partir des données préexistantes, des conditions météorologiques, du taux d'occupation et des signaux tarifaires. Elle ajuste ensuite de manière autonome la consommation d'énergie en temps réel et optimise la réduction de la charge tout en maintenant l'efficacité opérationnelle.

Dans le cadre d'un projet pilote mené dans plusieurs centres de données Google, un système de réponse à la demande basé sur l'IA a remis à plus tard les tâches informatiques non urgentes, en fonction des signaux de surcharge du réseau. En anticipant ainsi, il a reprogrammé les charges de travail dans le temps et l'espace, réduisant la consommation d'énergie sans perturber les services, ce qui illustre le potentiel de l'IA pour renforcer la fiabilité du réseau et limiter les pics de consommation énergétique²⁷.

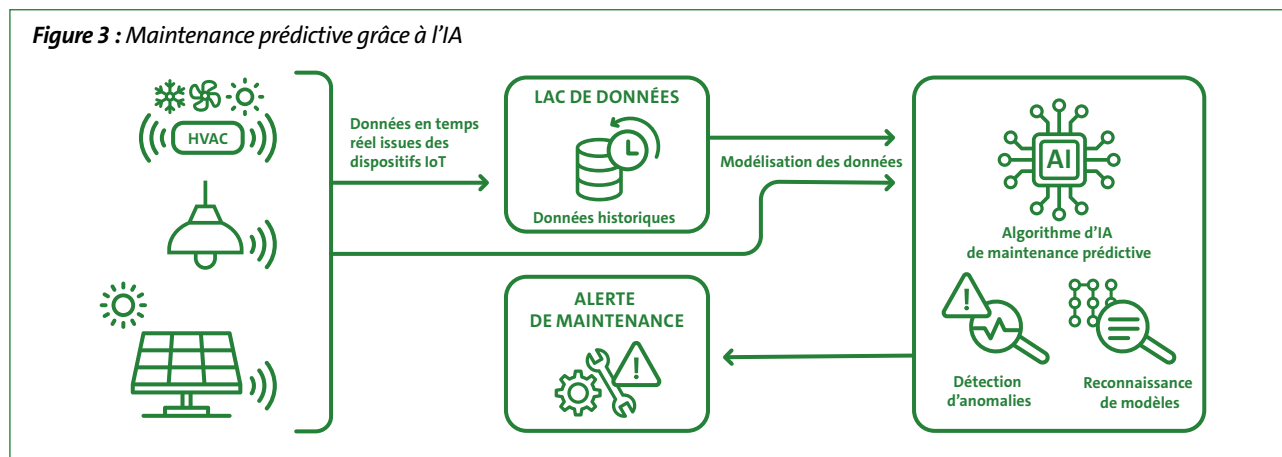
Maintenance prédictive grâce à l'IA

Les pannes imprévues des équipements entraînent une inefficacité énergétique et une augmentation des coûts. La figure 3 montre comment la maintenance

prédictive pilotée par l'IA utilise la détection d'anomalies et la reconnaissance de modèles pour identifier les signes d'usure ou de défaillance avant qu'une panne ne survienne. L'IA surveille les vibrations, le débit d'air et la consommation d'énergie des équipements électriques et de climatisation. Cela permet une détection précoce des défauts, une maintenance appropriée, une réduction des temps d'arrêt et une amélioration de l'efficacité du système.

Par exemple, l'Empire State Building à New York utilise l'IA pour la maintenance prédictive de ses systèmes de climatisation et d'éclairage. Ces systèmes analysent en temps réel les données des capteurs, comme la température, le taux d'occupation et les niveaux de CO₂, afin de détecter les anomalies, de prévoir d'éventuels problèmes d'équipement et de déclencher des alertes de maintenance à temps, ce qui permet de réaliser 38 % d'économies d'énergie²⁸.

Figure 3 : Maintenance prédictive grâce à l'IA



De même, le campus de Microsoft à Redmond a récemment utilisé l'IA pour analyser 125 bâtiments, identifiant ainsi plus de 2 000 anomalies cachées. Cette approche a permis de réduire le gaspillage d'énergie, d'améliorer l'efficacité et de réaliser jusqu'à 20 % d'économies d'énergie²⁹.

La maintenance prédictive améliore l'efficacité énergétique, prolonge la durée de vie des équipements et réduit les coûts de maintenance, contribuant ainsi à la réalisation des objectifs ESG (Environnement, Social, Gouvernance).



Exploitation intelligente des bâtiments : intégration de l'IA à l'IoT et aux jumeaux numériques

L'IoT et les jumeaux numériques améliorent considérablement les capacités de l'IA dans la gestion énergétique des bâtiments. Les appareils IoT (compteurs intelligents, capteurs de présence, sondes de température) fournissent des données en temps réel dont l'IA a besoin pour prendre des décisions précises.

Les jumeaux numériques simulent l'exploitation des bâtiments, ce qui permet à l'IA de tester virtuellement des stratégies d'économie d'énergie avant leur mise en œuvre dans le monde réel.

Un excellent exemple emblématique est le siège social de Siemens à Munich, qui utilise un jumeau numérique alimenté par des milliers de capteurs pour surveiller et optimiser les performances du bâtiment. Intégré à la plateforme Desigo CC de Siemens, il permet de simuler en temps réel la ventilation, l'éclairage et les programmes de maintenance, réduisant la consommation d'énergie de plus de 30 % tout en diminuant les coûts de maintenance³⁰.

Gestion intelligente de l'énergie grâce à l'IA : intégration de l'énergie solaire photovoltaïque et des batteries

L'IA joue un rôle essentiel dans l'intégration des technologies d'énergie propre, telles que les systèmes photovoltaïques solaires et les systèmes de stockage d'énergie par batteries (BESS), dans l'exploitation des bâtiments. En prévoyant la production d'énergie renouvelable, en anticipant la demande de charge et en optimisant l'utilisation des batteries, l'IA permet aux bâtiments de maximiser l'autoconsommation, de réduire leur dépendance au réseau et de diminuer les coûts d'exploitation.

Par exemple, le 303 Battery de Seattle est un immeuble d'appartements de 15 étages à consommation énergétique nette zéro, intégrant des panneaux solaires sur son toit, ses façades et ses balcons, associés à un stockage par batteries au lithium pour alimenter le bâtiment. Des technologies intelligentes, notamment des capteurs et des systèmes de contrôle pilotés par l'IA, optimisent la consommation d'énergie en ajustant les thermostats et l'éclairage, maximisant l'autoconsommation solaire et l'efficacité énergétique. Cette approche renforce les bénéfices de l'énergie solaire, réduit les coûts énergétiques et favorise un mode de vie durable grâce à une gestion efficace de la charge et à l'utilisation du stockage par batteries³¹.

Ces exemples montrent la façon dont l'IA facilite non seulement l'adoption des énergies propres, mais garantit également l'efficacité de leur utilisation, rendant plus accessibles les bâtiments à consommation énergétique nulle.

Perspectives d'avenir et recommandations stratégiques

Les bâtiments jouent un rôle essentiel dans la transition énergétique mondiale. L'intégration de l'IA dans la gestion énergétique des bâtiments est donc en passe de devenir un levier majeur d'efficacité, de durabilité et de résilience de ce secteur. Cependant, son adoption à grande échelle se heurte à certains obstacles. Pour libérer le plein potentiel de l'IA, il faut adopter une approche coordonnée impliquant l'ensemble des parties prenantes clés.

Les recommandations stratégiques suivantes dressent une feuille de route à l'intention des décideurs publics, des propriétaires de bâtiments, des fournisseurs de technologies et des chercheurs. Chaque groupe joue un rôle distinct : les décideurs publics peuvent œuvrer à la mise en place de cadres de soutien, les propriétaires de bâtiments peuvent investir dans la préparation numérique, les fournisseurs de technologies dans le développement de solutions efficaces et interopérables, et les chercheurs dans l'avancement de la validation et des applications en conditions réelles.

Parties prenantes	Principales recommandations stratégiques
Décideurs publics et régulateurs	- Élaborer des feuilles de route nationales pour l'IA dans le domaine de l'énergie et définir des normes d'interopérabilité - Augmenter le financement et les incitations en faveur des systèmes BEMS basés sur l'IA - Appliquer les réglementations en matière de cybersécurité et de protection des données spécifiques aux systèmes énergétiques intelligents - Soutenir l'EaaS en établissant des règles claires, des contrats types et des mécanismes de partage des risques financiers
Propriétaires et exploitants de bâtiments	- Investir dans les infrastructures numériques (capteurs IoT, connectivité) - Adopter des systèmes d'IA modulaires et évolutifs alignés sur les objectifs énergétiques - Impliquer les occupants grâce à des interfaces intuitives et des outils comportementaux
Développeurs technologiques et prestataires de services	- Concevoir des systèmes d'IA explicables et fiables (XAI: <i>Explainable Artificial Intelligence</i>) - Donner la priorité aux modèles d'IA économes en énergie, notamment pour les dispositifs en périphérie - Garantir l'interopérabilité avec les systèmes BEMS existants et les plateformes tierces - Promouvoir les modèles EaaS auprès des propriétaires des bâtiments
Chercheurs et monde académique	- Faire progresser les modèles d'IA hybrides et les systèmes énergétiques intelligents - Créer des jeux de données ouverts et des bancs d'essai (living labs) en conditions réelles pour la validation des systèmes d'IA - Étudier les obstacles comportementaux, sociaux et institutionnels à l'adoption de l'IA

Ces recommandations répondent directement aux obstacles identifiés précédemment. En harmonisant les politiques publiques, les technologies et les efforts de recherche, les parties prenantes peuvent créer un cadre plus cohérent pour l'usage de l'IA dans le secteur du bâtiment. Cette approche coordonnée accélérera la transformation numérique et améliorera l'efficacité, la résilience et la durabilité à long terme des bâtiments.

Conclusion

Cet article souligne le rôle stratégique de l'IA dans la transformation de la gestion énergétique des bâtiments. Malgré des défis tels que la passivité des occupants, la fragmentation des données, le manque d'intégration et les enjeux de cybersécurité, l'IA offre des opportunités majeures pour rendre les bâtiments plus intelligents, efficaces et durables.

Son intégration avec l'IoT et les jumeaux numériques favorise un contrôle plus intelligent des systèmes CVC, la maintenance prédictive et l'optimisation énergétique. L'IA améliore également la gestion des panneaux solaires photovoltaïques, du stockage par batteries et des programmes de réponse à la demande. La capacité de l'IA à aligner l'exploitation des bâtiments sur les profils d'occupation, les données météorologiques et les signaux du réseau en fait un acteur essentiel dans le développement d'infrastructures bas carbone et résilientes.

À l'avenir, les décideurs publics devront établir des feuilles de route nationales pour l'IA dans le domaine de l'énergie, définir des normes d'interopérabilité et mettre en place des mécanismes de financement favorisant l'innovation. Les propriétaires de bâtiments devront investir dans des infrastructures numériques, telles que les dispositifs IoT et les plateformes d'IA évolutives. Les fournisseurs de technologies devront quant à eux se concentrer sur le développement de solutions d'IA explicables, économes en énergie et compatibles avec les BEMS existants. Parallèlement, les chercheurs joueront un rôle clé dans l'avancement des modèles d'IA hybrides, la création de jeux de données ouverts et la prise en compte des obstacles comportementaux et institutionnels à l'adoption de l'IA.

Ces actions coordonnées permettront à l'IA d'améliorer la performance énergétique, d'optimiser les opérations et de soutenir la transition vers des bâtiments intelligents et autosuffisants.

À propos des auteures

Nofri Yenita Dahlan, professeure à la faculté d'ingénierie électrique et directrice de l'Institut de recherche solaire UiTM, Universiti Teknologi MARA (UiTM), 40450 Shah Alam, Selangor, Malaisie.

Nurul Aqilah Mahmud, doctorante à la Faculté d'ingénierie électrique, Universiti Teknologi MARA (UiTM), 40450 Shah Alam, Selangor, Malaisie.





Les matériaux: un fondement essentiel de la transition vers la durabilité

Accélérer la découverte de matériaux durables

Bichlien H Nguyen
PhD, Microsoft Research

L'intelligence artificielle (IA) transforme rapidement le domaine de la science des matériaux en accélérant la découverte et la conception de matériaux durables. Cet article explore la façon dont les innovations infrastructurelles permises par l'IA, de l'usage des polymères recyclables aux liquides de refroidissement, en passant par le ciment à faible teneur en carbone et les matériaux cristallins pour applications énergétiques, permettent d'atteindre les objectifs de circularité des matériaux, de transition énergétique et de résilience climatique. Mais il examine aussi les obstacles auxquels fait face l'IA dans la conception des matériaux, notamment les limites informatiques et les lacunes en matière de données. Enfin, cette recherche souligne l'importance d'un investissement soutenu et d'un déploiement réfléchi de l'IA, liant les avancées théoriques aux contraintes pratiques, pour un avenir plus durable.

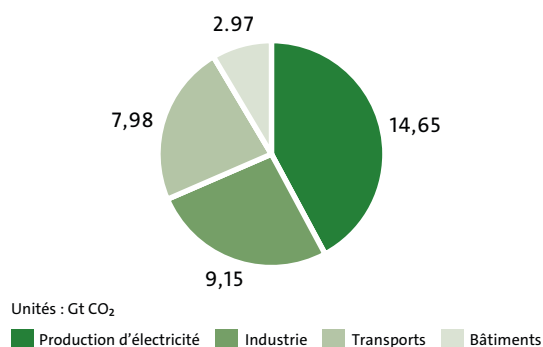
Introduction

L'histoire humaine est jalonnée de périodes d'innovations rapides qui se traduisent par des gains importants de productivité et d'efficacité dans tous les secteurs économiques. Depuis les années 1800, les progrès réalisés dans les domaines de la chimie, de la biologie, des sciences industrielles et de l'ingénierie ont été intégrés dans les commodités modernes. Prenons l'exemple d'une tâche aussi simple que faire ses courses. Les produits alimentaires que nous achetons dépendent d'un écosystème mondial de production alimentaire. Ce dernier est largement permis par l'usage d'engrais à base d'ammoniac produits par le procédé Haber-Bosch, un procédé chimique qui convertit l'azote et l'hydrogène gazeux en de l'ammoniac à l'aide d'un catalyseur¹. Après sa production vient la nécessité du transport. Et sans l'invention des plastiques alimentaires, il serait pratiquement impossible d'emballer et de transporter ces produits alimentaires sans qu'ils ne s'abîment, et ce à un prix abordable. Le magasin d'alimentation moderne est lui-même composé de matériaux de construction tels que l'acier et le béton. En coulisses, des chaînes d'approvisionnement complexes sont mises en place pour distribuer efficacement les fruits et légumes à travers le monde aux différents supermarchés locaux au moment où ils atteignent leur maturité optimale. Tout cela serait impossible sans les ordinateurs et les innombrables innovations techniques qui permettent d'orchestrer leur distribution et leur transport.

Cependant, les commodités modernes s'accompagnent de défis tout aussi modernes. Le procédé Haber-Bosch, l'une des réactions chimiques les plus énergivores, consommerait à lui seul 1 % de la demande énergétique mondiale annuelle nécessaire à l'agriculture moderne³. La production de plastique serait responsable de plus de 5 % des émissions de gaz à effet de serre (GES)⁴ et les déchets plastiques actuels seraient estimés à plus de 350 Mt, dont moins de 10 % sont recyclés⁵. La production d'acier et de ciment, composants essentiels du béton, contribuerait à environ 14 % des émissions totales de GES⁶. En outre, les impacts humains et environnementaux des déchets électroniques⁷, ainsi que la forte intensité énergétique de la production de semi-conducteurs⁸ suscitent de plus en plus d'inquiétudes. Les matériaux et leur production, bien qu'essentiels au développement mondial, contribuent fortement au changement climatique.

Le monde doit alors concevoir et produire de nouveaux matériaux et procédés de fabrication capables de réduire les émissions de GES en respectant les objectifs de durabilité. Les innovations de la science des matériaux réduisent l'impact environnemental de la construction de deux manières principales: premièrement, en développant des alternatives plus durables aux matériaux existants (acier ou ciment vert); et deuxièmement, en développant des matériaux dotés de nouvelles capacités, comme des batteries pouvant stocker l'énergie à longue durée ou des matériaux adsorbants pour capturer le CO₂ dans l'air⁹. L'IA bouleverse des domaines de recherche entiers. De l'informatique à la biologie computationnelle¹⁰, elle offre une opportunité de transformation et d'accélération de la découverte et de l'optimisation des matériaux inédite. Si l'IA entraîne des coûts importants en termes de ressources et d'énergie, elle reste un outil précieux pour contribuer à la réalisation de nos objectifs climatiques¹¹. Nous aborderons ici les utilisations les plus prometteuses de l'IA en science des matériaux, de leur découverte à la formation des futures industries de la durabilité, tout en abordant les limites et les écueils actuels de l'IA dans ce domaine.

Figure 1 : Émissions mondiales de CO₂ par secteur, 2022



Source: Adapté à partir de l'AIE (2023).²





Recherche, conception et test de nouveaux matériaux avec l'IA

Les scientifiques spécialisés dans les matériaux souhaitent depuis longtemps concevoir et synthétiser de nouveaux matériaux dont les propriétés seraient adaptées à des applications particulières. Appelé « conception inverse des matériaux », ce concept repose sur l'utilisation de méthodes permettant de prédire les propriétés d'un matériau avant de réaliser des expériences, réduisant ainsi le temps et les coûts nécessaires à la création du matériau souhaité. Traditionnellement, la conception des matériaux s'appuyait sur des prédictors de propriétés entraînés à partir de petits ensembles de données. Avec l'adoption généralisée de méthodes de calcul basées sur la physique, telles que la théorie fonctionnelle de la densité (DFT) ou la dynamique moléculaire (MD), il est devenu possible de prédire les propriétés d'un matériau à partir de calculs précis. Ces calculs physiques peuvent être lents et coûteux à exécuter pour chaque combinaison possible d'atomes. C'est pourquoi des modèles d'apprentissage automatique (ML) entraînés à partir d'ensembles de données couvrant l'ensemble du tableau périodique sont en cours de développement. À titre d'exemple, cette approche, associée au *cloud computing*, a permis le criblage rapide de millions de matériaux potentiels pour les batteries sur Azure Quantum Elements et a conduit à la découverte d'un nouvel électrolyte lithium-ion à l'état solide¹².

La conception permise par l'IA introduit un changement de paradigme dans la conception des matériaux, en remplaçant les processus de sélection basés sur des matériaux par des algorithmes de *machine learning* capables d'examiner des combinaisons chimiques complexes, de l'échelle atomique à l'échelle microscopique. Ce nouveau paradigme en science des matériaux pourrait permettre d'explorer tous les matériaux possibles – ce qui est impossible avec les méthodes conventionnelles – et de découvrir des matériaux essentiels pour atteindre les objectifs de durabilité fixés à l'horizon 2050. Voici trois exemples montrant la manière dont l'IA a déjà un impact sur la création de matériaux.

Étude de cas : découverte d'un béton à faible teneur en carbone

Le béton, mélange de ciment et de granulats, est un matériau de construction dont les propriétés ont été optimisées au fil des siècles. Réduire ou remplacer le ciment, très émetteur en carbone,

par un matériau conservant ses propriétés structurales pourrait réduire considérablement les émissions mondiales de GES liées à la construction. Face à ce défi, l'IA contribue à accélérer la découverte de nouveaux mélanges de béton. À l'aide d'un auto-encodeur variationnel conditionnel (CVAE) qui étudie la résistance à la compression et les impacts environnementaux, Meta a optimisé une nouvelle formule chimique de béton qui pourrait potentiellement réduire le carbone incorporé dans le béton jusqu'à 40 % tout en conservant ses propriétés structurales¹³. Récemment, Microsoft Research, en collaboration avec l'université de Washington, a démontré que l'IA peut être utilisée pour guider le développement d'un nouveau type de béton biosourcé qui remplace le ciment par des microalgues, ce qui pourrait permettre de réduire de 20 % le carbone incorporé par rapport au béton conventionnel¹⁴.

Étude de cas : conception de nouveaux plastiques recyclables

Les plastiques sont une famille de matériaux amorphes formés à partir de carbone, dérivés principalement de produits pétrochimiques^{15,16,17}. Ils sont composés d'unités monomères répétitives reliées entre elles pour former des chaînes polymères, pouvant généralement être transformées en plastiques linéaires ou réticulés, selon la formule du polymère. Les plastiques réticulés possèdent des propriétés uniques qui favorisent leur utilisation dans des composites avancés (circuits imprimés) et des composants structurels (éoliennes). Contrairement à leurs homologues linéaires, les plastiques réticulés sont non recyclables. Récemment, une nouvelle classe de polymères appelés vitrimères a été présentée. Elle conserve les performances techniques des polymères réticulés et reste recyclable. Microsoft Research et l'université de Washington ont démontré que les vitrimères pouvaient être utilisés pour fabriquer des composites recyclables dans l'industrie électronique¹⁸, permettant ainsi la récupération et la réutilisation des circuits intégrés et du cuivre des circuits imprimés. Les chercheurs ont en outre démontré que ces polymères pouvaient optimiser leur stabilité thermique sans compromettre d'autres propriétés grâce à l'IA générative¹⁹.

Étude de cas : génération de nouveaux matériaux cristallins

Les matériaux cristallins inorganiques sont utilisés dans une grande variété d'applications, comme les semi-conducteurs, les batteries, le photovoltaïque et les turbines. Parmi les exemples notables, on peut citer le silicium, l'oxyde d'indium-étain, le tellurure de cadmium et les aimants au néodyme. La structure ou la disposition des atomes dans un réseau cristallin, ainsi que les éléments qui composent le cristal, déterminent bon nombre de ses propriétés. La prédiction de la composition et de la structure des cristaux pourrait permettre le développement de matériaux moins coûteux et plus efficaces. Par exemple, le modèle GNoME de Google DeepMind a utilisé des réseaux neuronaux graphiques (GNN) pour passer au crible une vaste bibliothèque de structures cristallines dans une boucle d'apprentissage active afin de créer théoriquement plus de 300 000 matériaux stables sur le plan informatique²⁰. Dans une autre approche, Microsoft Research AI for Science a formé un modèle génératif de cristaux inorganiques, MatterGen²¹, qui peut être utilisé pour la création des matériaux stables et novateurs. En l'associant à MatterSim, un modèle de substitution entraîné par apprentissage automatique pour la prédiction de l'énergie et des forces des atomes, l'équipe a créé de nouveaux matériaux cristallins à haute densité magnétique ne contenant aucun élément de terre rare, ouvrant la voie à une nouvelle famille d'aimants.

Microsoft Research, en collaboration avec l'université de Washington, a démontré comment l'IA peut contribuer au développement d'une nouvelle formule de béton biosourcé qui remplace le ciment par des microalgues, réduisant ainsi de 20 % le carbone incorporé par rapport au béton conventionnel

L'IA et la conception de matériaux durables

Attention à l'écart computationnel

Les prédictions computationnelles, qu'elles concernent des molécules organiques, des polymères ou des cristaux inorganiques, ne constituent que la première étape dans la découverte de nouveaux matériaux. Une structure doit être synthétisée pour devenir un matériau réel, et ses propriétés doivent être vérifiées expérimentalement pour être considérées comme fonctionnelles. La création réussie d'un nouveau matériau dépend de deux facteurs principaux : sa stabilité, déterminée par la thermodynamique, et sa facilité de formation, déterminée par la cinétique. Cependant, comme la modélisation cinétique est difficile et coûteuse sur le plan informatique, les prédictors de propriétés basés sur l'IA sont généralement entraînés à ne prédire que les propriétés thermodynamiques, car ces ensembles de données synthétiques peuvent être générés plus facilement à partir de flux de calcul tels que la DFT ou la MD. Cela limite leur capacité à prédire des résultats viables sur le plan expérimental, et entrave la modélisation de processus dépendant de la vitesse, comme la catalyse.

De plus, les performances des modèles d'IA utilisés pour prédire les propriétés des matériaux reposent largement sur la précision des flux de calcul utilisés pour générer leurs données d'entraînement. Par exemple, les méthodes DFT estiment les interactions électron-électron dans un matériau, tandis que les MD simulent le mouvement et l'interaction des atomes. Ces deux méthodes impliquent des approximations qui peuvent introduire et aggraver des erreurs dans les modèles d'IA. Cependant, les progrès récents en matière d'algorithmes d'apprentissage profond offrent des solutions prometteuses. En apprenant une représentation mathématique plus précise des interactions électroniques dans les DFT^{22,23} et en améliorant la précision des modèles d'interaction atomique dans les MD^{24,25}, les erreurs dans les ensembles de données synthétiques peuvent être réduites et favoriser des prédictors de propriétés IA plus précis.

Le besoin de données et de diversité

Les gains d'efficacité réalisés dans le domaine du calcul de haute performance ont permis de réduire les coûts et d'augmenter la vitesse de génération de grands ensembles de données utilisées dans l'entraînement de modèles d'IA. Ces gains ont stimulé la création d'initiatives comme le Materials Project²⁶ et

l'Open Catalyst Project de Meta²⁷, qui mettent à disposition du grand public les flux de travail computationnels, les modèles d'apprentissage automatique et les ensembles de données selon les principes FAIR (faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables). À l'ère des grands modèles, les données sont reconnues comme ayant une valeur indépendante, ce qui décourage souvent l'ouverture des ensembles de données coûteux à générer. Cependant, l'ouverture des flux de calcul et des ensembles de données reste essentielle pour la reproductibilité et l'interopérabilité scientifiques²⁸, et la communauté doit veiller à trouver un bon équilibre afin de garantir la poursuite de l'innovation dans ce domaine.

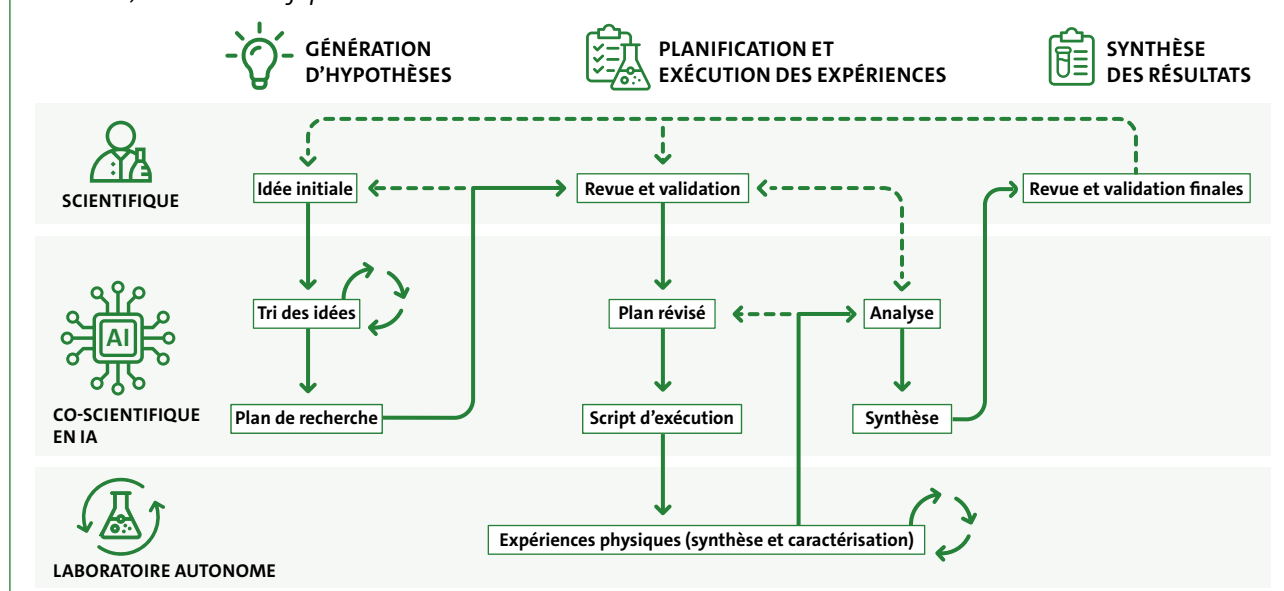
Outre la rareté des flux et la disponibilité des données, la plupart des grands ensembles de données d'entraînement de l'IA en science des matériaux se concentrent sur les propriétés atomiques des structures et la composition du matériau. Si certaines propriétés, telles que les bandes interdites électroniques, les potentiels d'ionisation et le module d'élasticité, peuvent être calculées à l'aide de la chimie quantique, de nombreuses propriétés en conditions réelles dépendent d'échelles de longueur différentes. Pour les matériaux structurels, la microstructure détermine des propriétés importantes telles que la ductilité, la résistance mécanique et la résistance à la corrosion. Les flux de calcul ainsi que les données synthétiques et expérimentales à ces échelles sont rares, mais nécessaires pour prédire les propriétés des matériaux et les processus réels²⁹.

Les matériaux n'existent pas de manière isolée

La durabilité est un domaine interdisciplinaire, qui s'étend des sciences fondamentales à la politique, et qui nécessite de réfléchir à des systèmes interactifs à grande échelle. Aucun algorithme ou matériau ne constituera à lui seul la solution miracle qui ouvrira la voie à un avenir plus durable. La découverte, la sélection et l'ingénierie des matériaux doivent être évaluées afin d'accélérer l'adoption de technologies plus durables³⁰. Il est essentiel d'utiliser l'IA pour faire avancer la recherche sur les matériaux à toutes les échelles, et d'encourager le développement de systèmes d'IA pour dynamiser le processus et l'ingénierie des matériaux, et pour les évaluer. L'IA pourrait jouer un rôle clé dans la formation du développement d'une main-d'œuvre informée, capable de gérer les opportunités, les compromis et les externalités des progrès liés aux nouveaux matériaux. Mais il faut s'assurer qu'elle favorise leur intégration technologique dans des environnements logistiques, économiques et réglementaires complexes^{31,32}.

Dans l'attente de boucler la boucle avec l'automatisation

Figure 2 : Exemple de processus de découverte de matériaux intégrant un co-scientifique en IA agentique et un laboratoire autonome, avec un scientifique humain dans la boucle.



Agents de recherche

La découverte de matériaux est un processus ardu et complexe guidé par la méthode scientifique : la mise en place d'une boucle itérative de rétroaction composée d'observations, de questions, d'hypothèses, d'expériences, d'analyses et de conclusions. Il devient possible de développer des systèmes d'IA capables d'assister les chercheurs dans chacune de ces étapes. Un outil numérique scientifique de première génération propose aujourd'hui une interface grâce à laquelle les utilisateurs peuvent interagir avec le système, accéder à des outils, à des modules et à des agents spécifiques à un domaine – mais aussi exécuter des tâches asynchrones, continues et configurables tout en disposant d'une mémoire contextuelle qui peut être utilisée pour faciliter les recherches³³. Les premiers exemples d'expériences ont été rapportés par Google³⁴ et Microsoft Discovery³⁵. Cette dernière plateforme a notamment mis en avant son rôle dans la découverte des liquides de refroidissement alternatifs aux substances polyfluoroalkylées (PFAS) pour les applications de refroidissement des centres de données de nouvelle génération. L'utilisation des PFAS est menacée d'interdiction mondiale et le développement de nouveaux liquides de refroidissement pourrait aider les centres de données à réduire leurs émissions de GES de 20 %³⁶. À mesure que les modèles d'IA deviennent de plus en plus performants, l'AI co-scientist de Google a le potentiel de réduire considérablement le délai de découverte de nouveaux matériaux, surtout lorsqu'elle est utilisée en lien avec des capacités expérimentales rapides.

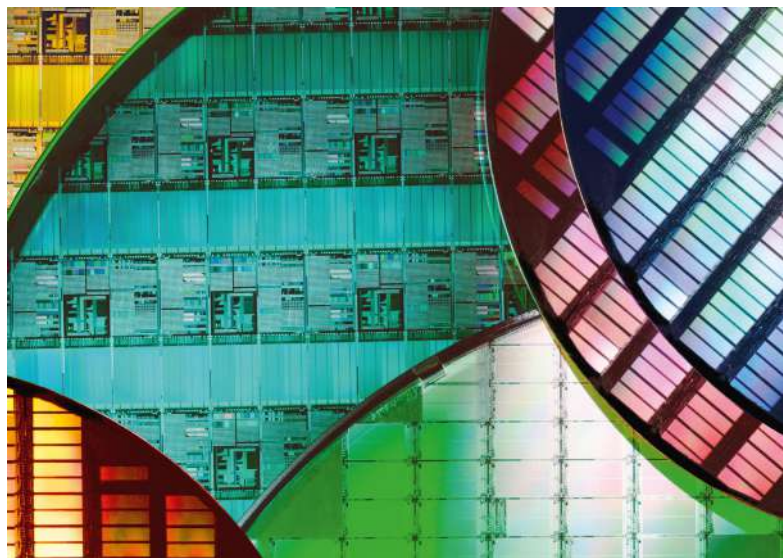
Laboratoires autonomes

La validation expérimentale est essentielle à la détermination de la fonctionnalité des matériaux, et combiner la conception de matériaux assistée par l'IA avec la synthèse expérimentale autonome représente une avancée majeure pour relier les approches computationnelles et expérimentales dans le domaine de la découverte de matériaux³⁷. Mais le principal avantage de l'automatisation est la capacité d'acquérir des données expérimentales à haut débit qui peuvent ensuite servir de référence pour les prédictions computationnelles³⁸. Un laboratoire autonome assisté par l'IA peut néanmoins dépasser le cadre de la seule collecte de données expérimentales. Parmi les exemples notables dans ce domaine en plein essor, citons l'A-Lab de l'université de Berkeley³⁹ pour les matériaux inorganiques, la plateforme autonome de l'université de Liverpool pour la chimie⁴⁰ et le PolyBot de l'Argonne National Laboratory⁴¹ pour le développement de films minces de polymères. En intégrant un vaste corpus de données bibliographiques et des modèles d'apprentissage automatique associés à la robotique, les plateformes autonomes basées sur l'IA ont démontré leur capacité à prédire la nature de matériaux, à créer des plans de synthèse, à exécuter la synthèse, à effectuer la caractérisation et à raisonner tout au long de l'expérience. À mesure que les capacités autonomes progressent, le rythme des découvertes de matériaux devrait s'accélérer.

Conclusion

Les matériaux sont les fondations de nos sociétés. Leur conception, leur utilisation, leur production et leur destruction occupent une place importante dans les émissions mondiales de GES. La convergence de l'IA et de la science des matériaux offre une occasion unique d'accélérer le déploiement d'innovations liées aux matériaux durables, où les matériaux fonctionnels peuvent être conçus et optimisés pour proposer des avantages techniques et environnementaux. Malgré les défis que posent la diversité limitée des données et les lacunes en matière de calcul, l'IA s'est révélée prometteuse pour atteindre les objectifs de réduction rapide de nos émissions. Elle repère et identifie mieux l'espace de recherche des matériaux remplaçants potentiels, des polymères biodégradables au béton à faible teneur en carbone, en passant par les matériaux cristallins pour le stockage d'énergie, accélérant ainsi la découverte de nouveaux matériaux. Mais la découverte n'est que la première étape. L'impact sur la durabilité nécessite une validation expérimentale rigoureuse, une intégration réfléchie dans les écosystèmes de production mondiaux et, surtout, du temps. Exploiter tout le potentiel de l'IA pour la durabilité ne se fera pas du jour au lendemain. Il faut du temps pour synthétiser, caractériser et déployer de nouveaux matériaux. Il faut aussi du temps pour instaurer la confiance, mettre en place les infrastructures et les cadres politiques qui soutiennent l'adoption de l'IA. Il faut du temps pour créer et cultiver l'expertise humaine nécessaire pour guider l'IA de manière responsable et efficace. Ce n'est qu'en investissant dans l'IA et en s'engageant à lier théorie et pratique que nous pourrions garantir un avenir plus durable.

À mesure que les modes d'IA deviennent de plus en plus performants, les chercheurs en IA peuvent réduire considérablement le délai nécessaire à la découverte de nouveaux matériaux, en particulier quand ils peuvent s'appuyer sur de rapides capacités expérimentales



Matériaux cristallins.

À propos de l'auteure

Bichlien H Nguyen est directrice de recherche chez Microsoft, à Redmond, dans l'État de Washington. Elle est aussi professeure adjointe affiliée au département d'informatique et d'ingénierie de l'université de Washington. Son domaine d'étude se situe à la croisée de la chimie, de la biologie, de l'informatique et du génie électrique. Ses recherches portent plus précisément sur le développement de technologies d'intelligence artificielle permettant d'accélérer la construction d'infrastructures plus durables, de la conception des matériaux à la modélisation des systèmes.



II DÉVELOPPER DES INFRASTRUCTURES NUMÉRIQUES ET DE DONNÉES POUR UNE IA DURABLE

Le plein potentiel de l'intelligence artificielle (IA) ne peut être réalisé qu'à condition de s'appuyer sur des écosystèmes de données robustes et des infrastructures numériques performantes. Cette deuxième partie du rapport examine les composantes essentielles au déploiement réussi de l'IA dans les contextes environnementaux : l'accès aux données, leur qualité, les infrastructures, la gouvernance et l'éthique. La combinaison de ces facteurs est indispensable pour exploiter pleinement les capacités de l'IA dans des secteurs tels que l'énergie, l'eau et la gestion des déchets, où la précision, l'efficacité et la capacité de déploiement à grande échelle sont déterminantes.

Dans le premier article, **Hamed Alemohammad** souligne que l'intégration réussie de l'IA dans les services environnementaux repose fondamentalement sur la solidité de l'écosystème de données sous-jacent. Il met en avant quatre dimensions essentielles : l'accès aux données, la gouvernance, la qualité et l'éthique. Si l'IA a démontré un fort potentiel pour améliorer la surveillance, la prévision et la gestion environnementales, des obstacles majeurs subsistent, tels que la fragmentation des données, les incohérences de qualité et le contrôle propriétaire de certains jeux de données. Pour que l'IA puisse apporter des solutions durables, Alemohammad insiste sur la nécessité de supprimer les silos de données et de garantir l'interopérabilité des systèmes. Il plaide également pour la création de plateformes de données ouvertes, le développement de cadres de gouvernance adaptatifs et la disponibilité de données de haute qualité, afin d'assurer une gestion de l'IA à la fois éthique et transparente.

David Olawade met quant à lui l'accent sur le rôle central des infrastructures de données dans le déploiement des applications d'IA au sein des secteurs environnementaux. Il souligne que l'efficacité de l'IA dans la gestion des systèmes d'énergie, d'eau et de déchets dépend étroitement de la qualité des données et du niveau de préparation

des infrastructures numériques associées. S'appuyant sur des exemples de villes telles que Barcelone et Amsterdam, où l'IA est intégrée aux systèmes intelligents de gestion de l'eau et des déchets, Olawade montre que la robustesse des infrastructures de données est déterminante pour optimiser l'utilisation des ressources et améliorer l'efficacité opérationnelle. Il analyse également les défis auxquels ces villes sont confrontées, notamment en matière de fiabilité des données, de maîtrise des délais de traitement et de protection de la confidentialité des données au sein de cadres partagés. À mesure que les villes évoluent vers des systèmes intelligents et pilotés par les données, l'importance des infrastructures de données ne cesse de croître, ce qui favorise un suivi en temps réel et des processus décisionnels plus efficaces.

Ces deux éclairages montrent que le déploiement réussi de l'IA dans la gestion de l'énergie, de l'eau et des déchets ne dépend pas uniquement de la technologie elle-même, mais aussi de la solidité des données sur lesquelles elle s'appuie. En garantissant des données accessibles, de haute qualité et gérées de manière éthique, l'IA peut réaliser son plein potentiel et contribuer de manière significative à la durabilité environnementale, en proposant des solutions à la fois efficaces et équitables.

Enjeux des données pour les applications d'IA environnementale

Hamed Alemohammad
Université Clark

Les progrès et l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) offrent une opportunité de transformation majeure pour relever les défis environnementaux mondiaux urgents, notamment le changement climatique, l'érosion de la biodiversité et la pollution. Cependant, la réalisation du plein potentiel de l'IA dans les services environnementaux dépend d'un écosystème de données solide et éthique. Cet article propose une synthèse de la littérature existante afin d'examiner les principaux enjeux liés aux données selon quatre dimensions clés : l'accès, la gouvernance, la qualité et l'éthique. L'analyse révèle que, si l'IA offre des capacités sans précédent en matière de surveillance, de prévision et de gestion environnementales, des défis importants subsistent. Ils sont liés notamment à la fragmentation des données, aux barrières propriétaires, à l'hétérogénéité de la qualité et aux complexités éthiques inhérentes au déploiement de l'IA. Les principales opportunités résident dans le développement d'initiatives de données ouvertes, l'élaboration de cadres de gouvernance adaptatifs, la mise en œuvre de pratiques correctives inclusives et de prétraitement des données, ainsi que dans la priorité accordée à une IA durable et centrée sur l'humain. L'article se conclut par des recommandations stratégiques visant à favoriser la mise en place d'une infrastructure de données collaborative, transparente et équitable pour exploiter efficacement l'IA au profit d'une planète plus saine.

Introduction

L'IA est en train de s'imposer rapidement comme une technologie transformatrice dotée d'un immense potentiel pour relever certains des défis environnementaux mondiaux les plus urgents du XXI^e siècle, notamment le changement climatique, l'érosion de biodiversité, la réponse aux catastrophes naturelles et l'atténuation de leurs effets, entre autres. La capacité intrinsèque de l'IA à traiter de vastes volumes de données complexes, à identifier des schémas sophistiqués et à optimiser des systèmes multifactoriels la rend particulièrement adaptée à ces enjeux. Les applications de l'IA démontrent d'ores et déjà une valeur significative dans de nombreux domaines environnementaux, qu'il s'agisse de la surveillance environnementale en temps réel, de l'optimisation des systèmes énergétiques, de faire progresser l'agriculture durable ou de gérer les situations de crise et de réponse aux catastrophes (Figure 1)¹.

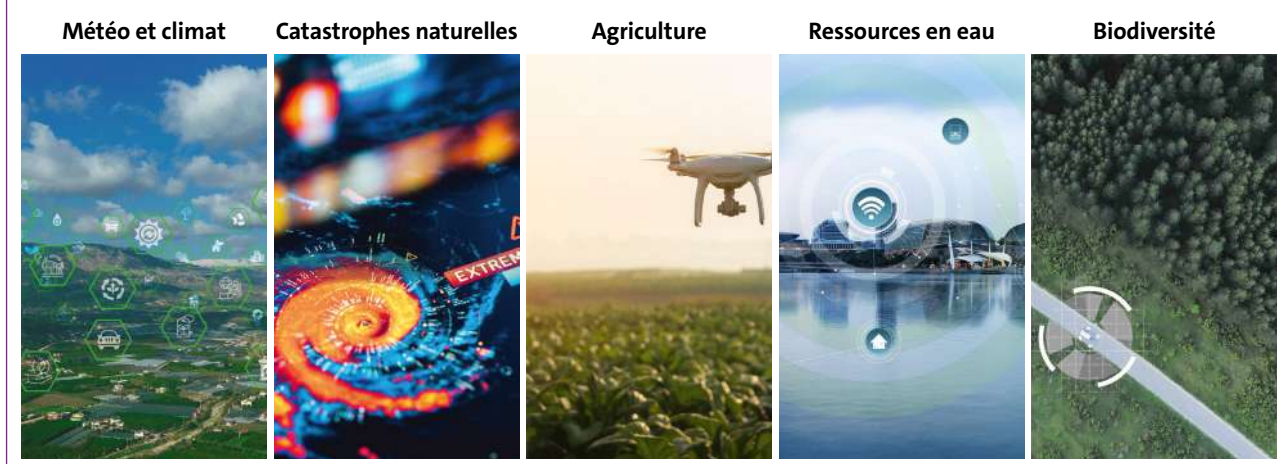
Par exemple, l'IA s'est révélée remarquablement efficace pour identifier les contrevenants potentiels aux réglementations environnementales. Une étude a montré que les algorithmes d'apprentissage automatique permettaient d'améliorer de plus de 600 % la détection des contrevenants en matière de pollution de l'eau, en comparaison avec des méthodes de sélection aléatoire². Dans le domaine de la conservation de la biodiversité, l'IA a permis d'améliorer le suivi et l'identification des espèces³. Elle contribue par ailleurs à la lutte contre la pollution et à la gestion des ressources grâce à des applications en agriculture de précision, en gestion des déchets ainsi que dans la surveillance de la qualité de l'air et de l'eau, tout en renforçant la résilience face au changement climatique⁴.

Les avancées récentes démontrent l'impact de l'IA sur la réponse aux catastrophes et leur atténuation. Par exemple, le système de prévision des inondations basé sur l'IA de Google protège désormais plus de 700 millions de personnes dans plus de 100 pays, en prédisant l'étendue des inondations jusqu'à sept jours et en évitant des millions d'euros de dommages économiques chaque année⁵. De manière similaire, les réseaux de détection des feux de forêt basés sur l'Internet des objets (IoT) en Europe ont permis de réduire les délais d'intervention de plusieurs heures à quelques minutes, contribuant ainsi à prévenir des pertes catastrophiques⁶. Ces exemples illustrent comment des écosystèmes de données robustes et l'intégration de l'IA peuvent générer des bénéfices mesurables allant bien au-delà des promesses théoriques.

Contrairement aux modèles statistiques traditionnels, qui reposent généralement sur des hypothèses prédéfinies et des jeux de données plus petits et structurés, les approches modernes en matière d'IA sont dynamiques et axées sur les données, nécessitant des volumes importants de données diversifiées et de haute qualité pour fonctionner efficacement. Cette évolution renforce considérablement la nécessité de cadres de gouvernance des données robustes, car là où les modèles statistiques pouvaient souvent fonctionner à partir de données restreintes ou soigneusement sélectionnées, les systèmes d'IA dépendent de jeux de données complets et interopérables. Dans ce contexte, les cadres éthiques deviennent essentiels afin de garantir l'équité, la fiabilité, la confiance et l'impact des systèmes d'IA.



Figure 1 : Applications de l'IA dans le domaine de l'environnement



Cet article propose une synthèse des travaux existants et des enjeux pratiques liés aux données pour l'application de l'IA aux enjeux environnementaux. Il se concentre spécifiquement sur quatre domaines fondamentaux : l'accès aux données, la gouvernance, la qualité et l'éthique, et offre une analyse critique de la littérature afin d'éclairer les décideurs publics, les chercheurs et les praticiens sur la manière d'exploiter de manière responsable et efficace les données au service de solutions environnementales basées sur l'IA.

Accès aux données dans l'IA environnementale Environmental AI

Les performances de l'IA dépendent fortement de l'étendue et de la qualité des données à partir desquelles elle est entraînée. Des données environnementales de haute qualité et accessibles sont essentielles pour alimenter les outils et les modèles d'IA destinés à relever les défis environnementaux mondiaux.

Les données environnementales se présentent sous différentes formes. Les *données structurées* sont des informations organisées selon un format clair et tabulaire, similaire à un tableau, où chaque ligne représente une observation (comme les relevés d'une station météorologique) et chaque colonne un attribut spécifique (comme la température, la date ou la localisation). Cette structure prévisible facilite leur traitement et leur analyse par les systèmes d'IA. À l'inverse, les *données non structurées* comprennent des éléments tels que des photos, des vidéos ou du texte libre, qui ne suivent pas de format prédéfini et nécessitent des étapes supplémentaires pour être interprétés par l'IA. De plus en plus, l'analyse environnementale s'appuie sur des *données multimodales*, qui combinent différents types de données (telles que des images, des relevés de capteurs et du texte) afin de fournir aux modèles d'IA une représentation plus riche et plus complète des phénomènes étudiés.

Il existe également la notion de données prêtes pour l'IA (*AI-ready data*), qui ne fait pas encore l'objet d'une définition pleinement établie et adoptée par l'ensemble de la communauté. La meilleure pratique largement admise considère que les données prêtes pour l'IA sont des informations de haute qualité, bien structurées et gérées, qui sont précises, accessibles, représentatives de la population et enrichies de contexte, ce qui les rend immédiatement exploitables pour l'entraînement et le déploiement de modèles d'IA à grande échelle.

À mesure que les problématiques environnementales deviennent plus complexes et interconnectées, une analyse IA complète nécessite l'intégration de jeux de données diversifiés, et les silos de données ne sont plus suffisants. Pour que l'IA soit pleinement efficace, les données provenant des capteurs IoT, des satellites, des stations météorologiques et des démarches de science participative doivent être harmonisées. Dans cette perspective, la Global Environmental Data Strategy (GEDS) du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) a été conçue pour faciliter l'accès, le partage et l'utilisation des données environnementales en améliorant leur qualité, leur gouvernance et leur interopérabilité. La GEDS aide les pays et les organisations à développer les compétences et les systèmes nécessaires pour collecter et gérer efficacement les données, notamment grâce à des programmes de renforcement des capacités qui soutiennent la formation technique, le développement institutionnel et l'alignement des politiques publiques⁷.

À ce jour, la GEDS a mobilisé plus de 500 parties prenantes à l'échelle mondiale, conduit à la refonte de la *World Environment Situation Room* du PNUE et lancé 11 prototypes et 9 solutions numériques qui testent ses

principes dans des contextes opérationnels réels⁸. Ces initiatives ont contribué à rendre les données environnementales plus adaptées à l'IA, à soutenir l'élaboration de politiques publiques fondées sur des données probantes et à favoriser la coopération internationale face aux enjeux du changement climatique, de la pollution et de l'érosion de la biodiversité.

Les modèles collaboratifs multipartites mettent en évidence la manière dont des chaînes de données ouvertes et exploitables, associées à des contrôles d'accès sécurisés, peuvent accélérer la recherche tout en protégeant la propriété intellectuelle. Les grands programmes biopharmaceutiques illustrent cette approche : par exemple, la plateforme de données multicloud Nerve Live, créée par Novartis, a permis de réorganiser des données de recherche et d'exploitation à l'échelle du pétaoctet afin de décloisonner les silos et de soutenir le déploiement de l'IA à grande échelle. Cette approche est directement transposable aux observatoires environnementaux cherchant à unifier des jeux de données satellitaires, *in situ* et administratifs⁹.

Lorsque les données demeurent cloisonnées, la capacité de l'IA à produire des analyses robustes et des modèles prédictifs performants s'en trouve limitée, conduisant à des solutions fragmentées. La création d'un écosystème de données collaboratif et interopérable est donc essentielle pour permettre à l'IA de soutenir des réponses environnementales systémiques, au-delà d'initiatives isolées et localisées¹⁰.

Défis liés à l'accès aux données

La littérature récente souligne que l'intégration de l'IA dans la surveillance environnementale et la prise de décision est fondamentalement remise en question par les silos de données, les normes hétérogènes et l'interopérabilité limitée¹¹.

- **Fragmentation et silos** : les données environnementales sont souvent stockées dans des systèmes isolés utilisant des normes et des formats variés, ce qui limite leur découvrabilité, leur interopérabilité et leur intégration fluide. Cette fragmentation, conjuguée à l'absence de formats de données et de métadonnées interopérables, entrave l'unification des workflows de l'IA, complique l'agrégation et la comparaison de jeux de données issus de différents domaines, et réduit la capacité de l'IA à produire des analyses environnementales globales et à soutenir des actions coordonnées. Les travaux empiriques et prospectifs consacrés aux données environnementales identifient ainsi l'interopérabilité limitée et le cloisonnement des données comme des freins majeurs à l'analyse intégrée à l'ère de l'IA¹².
- **Découvrabilité et utilisabilité des données** : de nombreux jeux de données supposément accessibles au public ne disposent pas de métadonnées adéquates, de licences ou de formats lisibles par machine, ce qui complique leur identification, leur exploitation et leur intégration dans des systèmes d'IA.
- **Enjeux de propriété et de partage des données** : les acteurs du secteur privé peuvent considérer les données comme des actifs propriétaires et en limiter l'accès. Or, les systèmes d'IA nécessitent des jeux de données vastes, diversifiés et de haute qualité pour fonctionner efficacement. Des restrictions excessives sur l'accès aux données peuvent freiner l'innovation, réduire la diversité des données d'entraînement et conduire à des modèles d'IA moins robustes ou biaisés. La question de la propriété des données est également étroitement liée à des enjeux de confiance, d'équité et de justice. Par exemple, lorsque des communautés locales produisent des données environnementales, mais que des acteurs externes (entreprises, chercheurs) les exploitent sans consentement continu ni mécanismes de partage des bénéfices, la confiance peut être fragilisée et la capacité d'action locale réduite. De telles dynamiques sont susceptibles de décourager la participation future et de compromettre l'efficacité des réponses environnementales et climatiques portées par les communautés¹³.



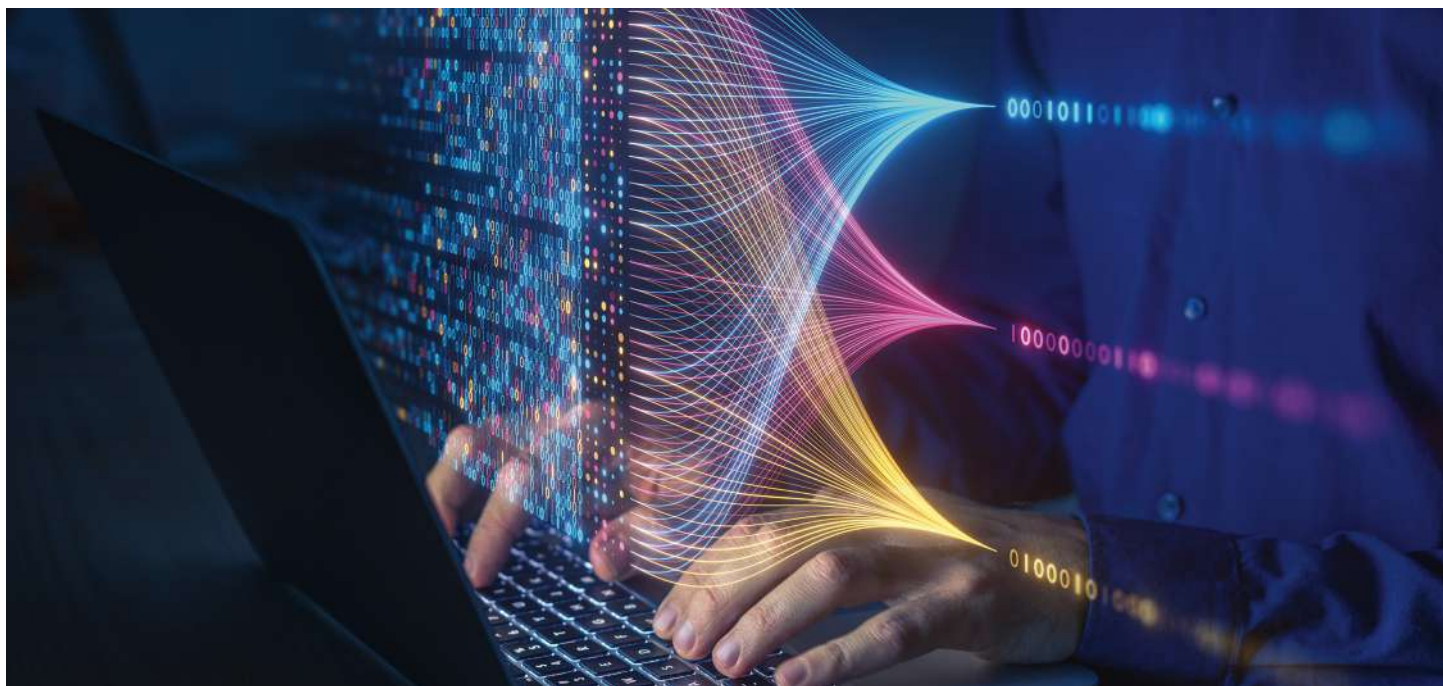
© Conseil municipal de Maputo

La tension entre le contrôle privé des données et leur valeur d'intérêt général constitue un défi fondamental. La puissance de l'IA repose sur son accès à des jeux de données vastes et diversifiés. Mais lorsque des données clés sont propriétaires ou mal gérées sur le plan éthique, cela limite le déploiement d'applications d'IA équitables. Cette situation exige plus que des solutions techniques : des changements de politiques publiques, des bases de données communes et des modèles de gouvernance partagée sont nécessaires pour repositionner les données environnementales comme une ressource collective qui favorise à la fois l'innovation et l'équité.

Possibilités d'améliorer l'accès aux données

Malgré ces obstacles, il existe des moyens clairs d'améliorer l'accès aux données pour l'IA environnementale :

- **Initiatives et plateformes de données ouvertes** : l'accès ouvert aux données est essentiel pour que l'IA puisse relever les défis environnementaux. La plateforme Open Targets dans le domaine des sciences de la vie est un exemple réussi d'une telle solution^{14, 15}. Open Targets est un consortium réunissant des organismes de recherche, des fondations à but non lucratif et des entreprises pharmaceutiques. Il met en commun des données génomiques, protéomiques et bioinformatiques au sein d'une base de données commune, favorisant à la fois l'innovation et l'intérêt général. Ce modèle permet à des acteurs privés de participer avec des données propriétaires tout en bénéficiant d'infrastructures et de mécanismes de gouvernance partagés, conciliant ainsi intérêts commerciaux et bien commun. La gouvernance repose sur des principes participatifs, avec des règles claires en matière d'accès aux données, d'utilisation et de partage des bénéfices.
- **Lisibilité machine et préparation des données pour l'IA** : il est essentiel de garantir que les données environnementales et les métadonnées soient lisibles par machine pour permettre une intégration fluide de l'IA. Cela implique le recours à des formats standardisés et à des métadonnées claires et accessibles¹⁶. Darwin Core est un exemple d'initiative communautaire visant à fournir un cadre standardisé et interopérable pour les données sur la biodiversité, permettant aux algorithmes d'apprentissage automatique de traiter et d'intégrer plus efficacement des jeux de données hétérogènes¹⁷.
- **Tirer parti de la science citoyenne** : la science citoyenne est une source croissante de données précieuses qui enrichit la compréhension des systèmes écologiques. Par exemple, des programmes tels que MOPA au Mozambique permettent aux citoyens de signaler des problèmes de gestion des déchets via leur téléphone portable, réduisant les délais d'intervention de cinq jours à quatorze heures¹⁸. Cependant, l'exploitation de ces données dans des systèmes d'IA suppose une gestion éthique rigoureuse, garantissant le consentement, la représentativité et la qualité des informations. Ces enjeux seront examinés plus en détail dans les sections suivantes.
- **Encourager le partage des données** : les politiques publiques peuvent inciter les fournisseurs de données – du monde académique au secteur privé – à générer des données ouvertes et prêtes à être utilisées par l'IA¹⁹. Les stratégies possibles incluent notamment le conditionnement des financements à des efforts de numérisation ou au partage ouvert des données. Par exemple, le programme Digital Europe finance les administrations publiques et les organismes de recherche pour numériser les infrastructures et les services. Le financement est conditionné à la mise en œuvre de projets de transformation numérique, incluant notamment des initiatives de partage et d'interopérabilité des données²⁰.
- **Normes d'interopérabilité** : afin de mesurer les progrès et de renforcer la transparence et la responsabilité, des normes de données largement adoptées sont nécessaires. Les principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) offrent un cadre



permettant d'améliorer la découvrabilité et la réutilisabilité des données, tout en respectant les contraintes éthiques²¹. L'adoption des principes FAIR par la communauté du géospatial illustre la demande croissante de données environnementales bien documentées et accessibles²².

Gouvernance des données dans l'IA environnementale

Une gouvernance solide des données est essentielle pour garantir une application responsable et efficace de l'IA dans le contexte environnemental. Elle comprend des politiques et des normes visant à gérer les données tout au long de leur cycle de vie. Les modèles de gouvernance doivent donner la priorité à la responsabilité, à l'équité, à la traçabilité des données, à la transparence et à la protection de la vie privée.

Compte tenu de la complexité des systèmes d'IA et de l'ampleur de leurs implications, la gouvernance doit être adaptative, capable de suivre le rythme des avancées technologiques rapides tout en garantissant une innovation responsable. Cela signifie qu'il faut trouver un équilibre entre le progrès, l'équité et la maîtrise des risques. Les approches universelles sont inefficaces ; il faut plutôt des structures flexibles et évolutives pour soutenir une utilisation éthique de l'IA et maintenir la confiance du public. La gouvernance doit permettre des mises à jour continues afin de suivre l'évolution des capacités de l'IA dans les différents secteurs environnementaux.

La qualité des données ne constitue donc pas un enjeu secondaire, mais un pilier fondamental d'une IA environnementale digne de confiance

Défis liés à la gouvernance des données

De nombreux obstacles entravent la mise en œuvre d'une gouvernance efficace des données pour l'IA environnementale :

- **Fragmentation et lacunes réglementaires** : bien qu'il existe certaines recommandations internationales, le paysage des politiques publiques reste fragmenté et souffre d'un manque de normes internationales harmonisées, ce qui rend difficile la mise en œuvre d'une gouvernance cohérente²³.
- **Opacité et problème de la « boîte noire »** : à mesure que l'IA devient plus complexe, il devient moins évident de comprendre ou de contrôler son processus décisionnel, ce qui augmente les

risques liés à la conformité, à l'éthique et à la responsabilité. L'opacité des modèles d'IA complexes complique l'explicabilité et la responsabilité, qui sont pourtant essentielles.

- **Biais et confidentialité** : l'IA entraînée sur des données historiques biaisées peut reproduire des schémas discriminatoires, ce qui affecte des domaines tels que la justice environnementale. Parallèlement, la nécessité de disposer de jeux de données diversifiés et à grande échelle pour entraîner les modèles d'IA soulève des préoccupations en matière de confidentialité et de sécurité.²⁴

Dans les contextes environnementaux où l'IA peut influencer la réglementation, la gestion des catastrophes ou l'utilisation des ressources, il est essentiel de comprendre comment les décisions sont prises. Le manque de transparence peut perpétuer des biais et aggraver les inégalités, en particulier lorsque les données historiques reflètent des injustices systémiques. Une IA biaisée pourrait cibler injustement certaines communautés ou entreprises, renforçant ainsi les disparités. La gouvernance doit imposer une IA explicable (XAI) et mettre en place des mécanismes de

supervision afin de retracer les décisions et d'auditer les systèmes. Ces mesures sont essentielles pour instaurer la confiance et garantir que l'IA serve l'intérêt général, et non l'inverse.

Opportunités pour une meilleure gouvernance des données

Malgré ces défis, plusieurs opportunités se dégagent :

- **Gouvernance multipartite** : l'implication de parties prenantes issues de différents secteurs (industrie, monde académique, société civile et communautés concernées) peut favoriser une gouvernance plus inclusive et éthique.
- **Réglementation sur mesure** : les États devraient adapter la réglementation de l'IA à leurs contextes nationaux et aux spécificités sectorielles, plutôt que d'appliquer des règles universelles. À titre d'exemple, le règlement européen sur l'intelligence artificielle (AI Act) repose sur une approche fondée sur le niveau de risque, en définissant des exigences différenciées selon les usages et les impacts potentiels des systèmes d'IA²⁵. Par exemple, l'IA déployée dans les soins de santé ou les

infrastructures critiques est soumise à des exigences plus strictes que celle utilisée dans le domaine du divertissement, reflétant des risques et des besoins distincts.

- **Coopération internationale** : l'harmonisation des normes à l'échelle mondiale est essentielle. La *Coalition for Sustainable Artificial Intelligence*, portée notamment par la France, le PNUF et l'ITU, en est un excellent exemple. Cette coalition rassemble des gouvernements, des organisations internationales, des acteurs industriels et la société civile afin de normaliser la mesure de l'impact environnemental de l'IA et de créer des cadres de gouvernance adaptatifs et évolutifs qui répondent aux changements technologiques rapides²⁶.
- **Data Stewardship (gouvernance responsable des données)** : la promotion d'une gestion des données responsable, participative et fondée sur les droits peut faire évoluer les rapports de pouvoir vers des écosystèmes de données plus équitables et axés sur l'intérêt général²⁷.

Qualité des données dans l'IA environnementale

L'efficacité de l'IA dans la surveillance et la prise de décision environnementales dépend fortement de la qualité des données d'entrée. Cette dépendance est encore plus marquée dans les cadres d'IA supervisés, où les modèles sont entraînés à l'aide de paires de données d'entrées et de cibles (ou *labels*), et où le modèle doit prédire la cible à partir des données d'entrée. Dans ces contextes, des données d'annotation fiables et cohérentes sont indispensables ; à défaut, les modèles d'IA risquent de produire des prédictions erronées et des orientations peu fiables pour l'action environnementale.



Défis liés à la qualité des données

Malgré son importance, la qualité des données environnementales est souvent compromise par des problèmes majeurs :

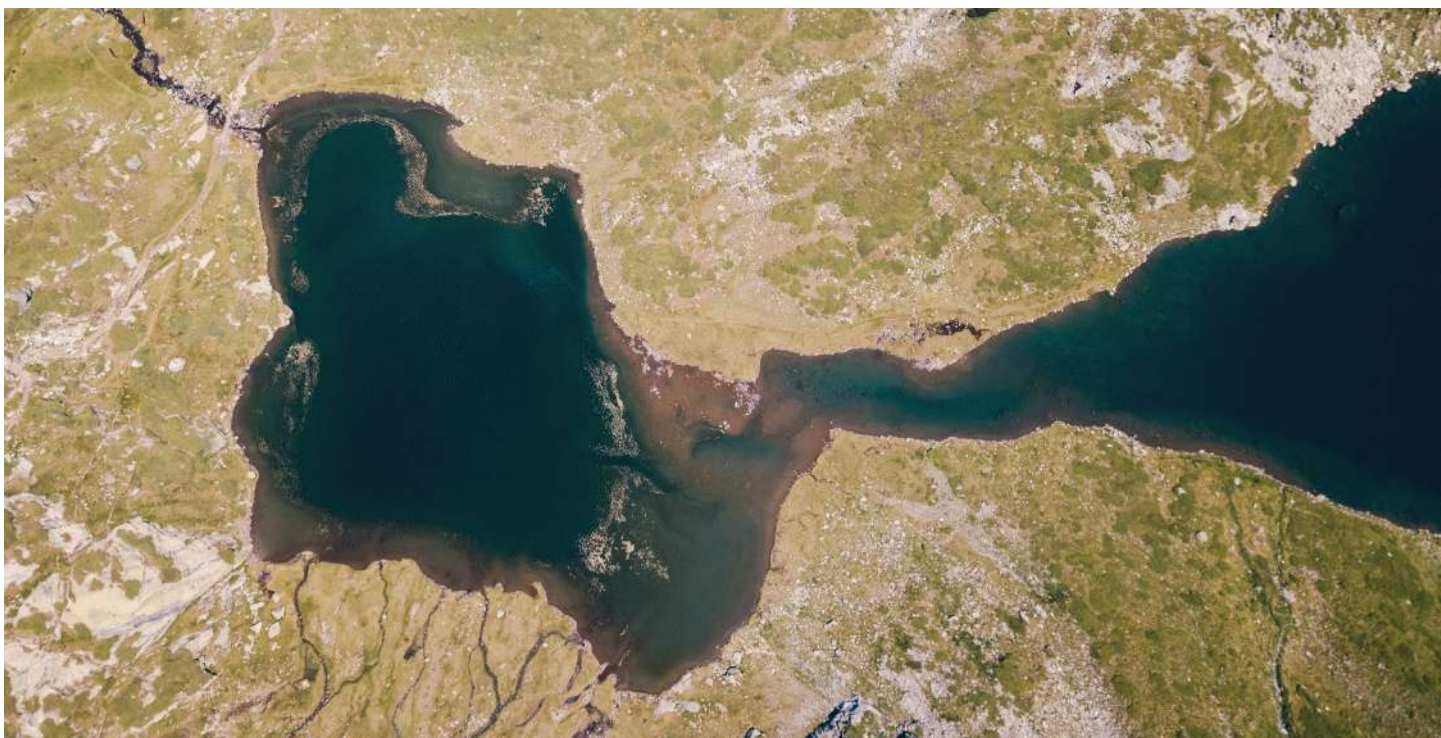
- **Données manquantes** : fréquentes dans les données satellitaires, de l'IoT et des capteurs, en raison de défaillances matérielles, de problèmes de transmission ou de lacunes dans l'échantillonnage. Les données manquantes peuvent se produire dans le temps ou dans l'espace et entraver l'entraînement des modèles et la détection des tendances à long terme, des événements extrêmes ou des phénomènes localisés.
- **Incertitude et incohérence** : la dérive des capteurs, les erreurs humaines (lors des mesures ou de l'annotation) et la variabilité des conditions environnementales introduisent du bruit dans les données. Si les modèles d'IA doivent être entraînés à tolérer le bruit inhérent aux données du monde réel, il est essentiel de disposer de données d'annotation précises et de haute qualité pour permettre l'apprentissage de motifs pertinents et la production de prédictions fiables, plutôt que l'amplification des erreurs ou du bruit présents dans les données d'entrée²⁸.
- **Biais** : des jeux de données historiques ou déséquilibrés peuvent renforcer les inégalités existantes, en particulier dans le contexte de la justice environnementale.

Les données environnementales sont par nature irrégulières : elles proviennent de satellites, de capteurs au sol, de la science citoyenne et d'archives, chacun reposant sur ses propres protocoles et incertitudes. Les jeux de données bruts sont rarement exploitables sans traitements approfondis. Des problèmes tels que les valeurs manquantes, le bruit environnemental, l'absence de normes cohérentes et les lacunes spatiales et temporelles réduisent directement la précision et la fiabilité des modèles d'IA²⁹. Lorsqu'elle est entraînée sur des données biaisées ou de mauvaise qualité, l'IA peut produire des résultats trompeurs, compromettant ainsi les objectifs environnementaux qu'elle est censée soutenir.

Possibilités d'amélioration de la qualité des données

Plusieurs stratégies peuvent améliorer considérablement la qualité des données environnementales :

- **Chaînes de prétraitement automatisées et reproductibles** : des chaînes de prétraitement flexibles et adaptatives peuvent détecter et corriger automatiquement les problèmes courants de qualité des données provenant de sources hétérogènes. La mise en place de chaînes reproductibles permet à des tiers d'évaluer les éventuels problèmes de qualité des données et d'ajuster les traitements en conséquence.
- **Investissements dans la correction des données** : un financement proactif pour la collecte, le nettoyage et la maintenance des données est essentiel pour garantir l'efficacité à long terme de l'IA et constitue un investissement d'intérêt général à part entière²⁹.
- **Normes de métadonnées et de nommage** : les jeux de données doivent être consultables, indexés et accompagnés de métadonnées riches et pérennes afin d'en garantir la facilité d'utilisation, la transparence et la traçabilité. La mise en place du *SpatioTemporal Asset Catalog* (STAC) pour les ressources de données géospatiales est un exemple de norme de métadonnées axée sur les cas d'usage, qui a favorisé le développement de toute une gamme de modèles et d'applications d'IA géospatiale³⁰.
- **Fusion des données en temps réel enrichie par l'IA** : le développement d'outils de fusion en temps réel basés sur l'IA permet une intégration fluide de flux de données hétérogènes, améliorant ainsi la réactivité des systèmes et la prise de décision.



Les bases de données géospatiales accessibles, consultables et indexées facilitent les tâches essentielles de gestion environnementale.

En définitive, le succès de l'IA dans la résolution des défis environnementaux est indissociable de l'intégrité et de l'utilisabilité des données sur lesquelles elle s'appuie. Les investissements dans les infrastructures de données, les normes de qualité et les traitements automatisés sont essentiels pour libérer tout le potentiel de l'IA au service des sciences de l'environnement. Un prétraitement rigoureux (imputation, harmonisation, réduction du bruit) ainsi que des mécanismes de validation sont essentiels pour rendre les données utilisables et garantir la fiabilité des résultats produits par l'IA. La qualité des données ne constitue donc pas un enjeu secondaire, mais un pilier fondamental d'une IA environnementale digne de confiance.

Éthique des données dans l'IA environnementale

Le déploiement de l'IA dans des contextes environnementaux soulève des enjeux éthiques majeurs qui doivent être abordés de manière proactive :

- **Biais algorithmiques** : les modèles d'IA entraînés sur des données biaisées ou incomplètes qui ne fournissent pas une représentation équitable des populations concernées risquent de reproduire et d'amplifier les inégalités sociales, en particulier dans des domaines sensibles tels que la justice environnementale³¹. Sans mécanismes de supervision adaptés, l'IA peut orienter involontairement des actions de contrôle ou d'allocation de ressources au détriment des communautés vulnérables.
- **Confidentialité des données** : l'utilisation de jeux de données volumineux dans la surveillance environnementale soulève des questions de confidentialité, en particulier lorsqu'il s'agit de données personnelles ou géolocalisées. Des techniques de préservation de la vie privée et des normes strictes de protection des données sont indispensables pour garantir les droits des personnes et des entités représentées dans les données (individus, communautés, organisations, etc.) et instaurer un climat de confiance.
- **Transparence et redevabilité** : une transparence et une redevabilité effectives des systèmes d'IA commencent dès le niveau des données. Il est essentiel d'établir clairement la provenance des données (en suivant leur origine, la manière dont

elles sont collectées et les transformations qu'elles subissent) pour comprendre et auditer les décisions prises par l'IA. Des métadonnées complètes et des pratiques de documentation rigoureuses garantissent que chaque jeu de données utilisé dans le développement d'un modèle est accompagné d'informations sur sa source, sa qualité et ses limites.

- **Équité sociale et inclusion** : pour garantir une répartition équitable des bénéfices de l'IA, il faut non seulement impliquer les régions défavorisées, telles que les pays à revenu faible et intermédiaire (PRFI), mais aussi corriger les déséquilibres dans la représentation des données. De nombreux PRFI sont confrontés à des obstacles importants pour produire, partager et accéder à des données environnementales de haute qualité, ce qui peut renforcer les fractures numériques et environnementales. Pour favoriser une véritable inclusion, il est essentiel d'investir dans la mise en place d'infrastructures de données locales, de soutenir la collecte de jeux de données adaptés aux contextes locaux, et de veiller à ce que les données provenant de diverses régions et communautés soient intégrées dans les systèmes d'IA.

Une IA entraînée à partir de données biaisées risque de perpétuer des formes de discrimination, en particulier dans le domaine de la réglementation environnementale. Par exemple, si les données historiques relatives aux contrôles environnementaux ont ciblé certaines communautés de manière injuste, l'IA pourrait perpétuer cette tendance. À l'inverse, une gouvernance responsable des données (*data stewardship*) et des approches participatives de gouvernance responsable des données peuvent renforcer le pouvoir d'agir des communautés locales, en leur permettant d'influencer la manière dont leurs données sont utilisées et de bénéficier des enseignements produits par l'IA.

Pour éviter cela, le développement d'une l'IA éthique doit s'appuyer sur une approche collaborative, inclusive et rigoureuse de la correction des données, mettre en œuvre des techniques visant à renforcer l'équité et procéder à des examens éthiques réguliers. L'objectif doit être de concevoir des systèmes qui favorisent l'équité et la justice, en garantissant des opportunités et des bénéfices égaux pour tous. Il est tout aussi essentiel de relever ces défis liés aux données que de mener des efforts de reconversion professionnelle visant à atténuer les pertes d'emplois, afin de garantir que l'IA favorise l'équité sociale à chaque étape du cycle de vie des données.

Conclusions et recommandations

L'intégration de l'IA dans les services environnementaux est très prometteuse, mais son succès dépend étroitement des modalités d'accès aux données, de leur gouvernance, de leur gestion et de leur utilisation éthique. La fragmentation des données, les contraintes liées à la propriété, les problèmes de qualité et les enjeux éthiques limitent l'efficacité de l'IA. Le changement de paradigme vers des solutions d'IA à forte intensité de données pour répondre aux défis environnementaux souligne que les données ne sont pas seulement une entrée, mais un élément essentiel des infrastructures, dont les caractéristiques conditionnent directement l'efficacité et l'équité des résultats produits par l'IA.

Les enseignements tirés de secteurs matures tels que les sciences de la vie et la finance soulignent l'importance d'une gouvernance rigoureuse des données et de l'interopérabilité. Dans le domaine de la découverte de médicaments, l'IA a accéléré les délais de développement jusqu'à 40 %, tout en réduisant les coûts et en améliorant les résultats de la médecine de précision³². De même, les institutions financières s'appuient sur l'IA pour détecter les fraudes, ce qui leur permet d'économiser plusieurs milliards chaque année. Ces exemples démontrent que des cadres structurés et une gouvernance responsable et éthique des données sont essentiels pour déployer l'IA à grande échelle de manière responsable – des principes que les sciences environnementales peuvent adopter pour obtenir des gains transformateurs similaires.

Néanmoins, l'IA offre de nombreuses opportunités pour faire progresser les services environnementaux. La collaboration interdisciplinaire entre les chercheurs en environnement, les développeurs en IA, les spécialistes en sciences sociales, les communautés locales et les décideurs publics est essentielle pour garantir que les solutions soient scientifiquement rigoureuses, éthiquement responsables et opérationnelles.

Afin de libérer pleinement le potentiel transformateur de l'IA au service de l'environnement, une approche concertée et multidimensionnelle est nécessaire. Les recommandations suivantes sont essentielles pour les décideurs publics, les chercheurs et les praticiens :

- 1. Prioriser des écosystèmes de données ouverts et interopérables :** investir dans des plateformes ouvertes et appliquer des normes d'interopérabilité universelles et conformes aux principes FAIR, afin de surmonter les obstacles liés à la propriété des données et aux silos. Des solutions environnementales globales nécessitent des données accessibles et intégrées, permettant à l'IA de produire des analyses complètes et pertinentes.
- 2. Mettre en place une gouvernance des données adaptative, collaborative et transparente :** créer des modèles de gouvernance flexibles qui mettent l'accent sur la redevabilité, l'équité et la transparence tout au long du cycle de vie de l'IA. Promouvoir une IA explicable et veiller à l'auditabilité des décisions afin d'instaurer la confiance et d'éviter les biais.
- 3. Investir dans une gestion rigoureuse de la qualité des données :** financer le nettoyage et la normalisation des données, ainsi que la R&D sur des méthodes automatisées de prétraitement et de fusion en temps réel. Des données d'entrée de haute qualité sont essentielles pour garantir des performances fiables et efficaces de l'IA dans les contextes environnementaux.
- 4. Promouvoir un développement éthique et durable de l'IA :** intégrer les considérations éthiques dès les phases de conception et de déploiement, notamment en atténuant les biais dans les données et en garantissant un accès équitable aux technologies. Encourager les modèles économes en énergie, l'utilisation responsable des données et les opérations durables afin de garantir que les bénéfices de l'IA l'emportent sur son empreinte environnementale.

En abordant de manière stratégique ces enjeux liés aux données, la communauté internationale peut considérablement renforcer la capacité de l'IA à fournir des solutions efficaces pour les services environnementaux, contribuant ainsi à un avenir plus résilient, plus équitable et plus durable.

À propos de l'auteur

Hamed Alemohammad est professeur associé à la Graduate School of Geography et directeur du Center for Geospatial Analytics de l'Université Clark. Leader technique et chercheur interdisciplinaire, il possède une expertise approfondie en télédétection, en sciences de la Terre et en intelligence artificielle.

Ces dernières années, ses travaux de recherche se sont concentrés sur le développement et l'application de modèles géospatiaux fondamentaux. Il est également membre du comité consultatif technique de Digital Earth Africa. Avant de rejoindre l'Université Clark, Hamed Alemohammad a occupé les fonctions de directeur scientifique des données (Chief Data Scientist) et de directeur exécutif au sein de Radiant Earth. Il est titulaire d'un doctorat (Ph.D.) en génie civil et environnemental du Massachusetts Institute of Technology (MIT).



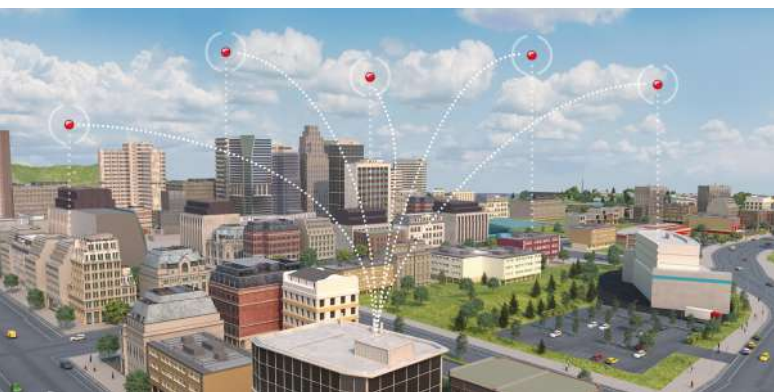


Infrastructure de données

Comment développer les services environnementaux basés sur l'intelligence artificielle

David Bamidele Olawade
(MPH, FRSPH, SFHEA)

Cet article examine le rôle essentiel de la qualité des données et de l'infrastructure numérique dans le déploiement efficace de l'intelligence artificielle (IA) pour les services environnementaux dans les systèmes de gestion de l'eau, de l'énergie et des déchets. Alors que les villes du monde entier sont confrontées à des défis environnementaux croissants, l'IA apparaît comme une solution transformatrice, mais uniquement lorsqu'elle s'appuie sur des écosystèmes de données robustes et une infrastructure numérique évolutive. À travers l'analyse d'exemples concrets dans des villes intelligentes, de New York à Barcelone, cet article explore la façon dont l'accessibilité des données, les normes de qualité et le niveau de préparation des infrastructures influencent directement les performances de l'IA dans les applications environnementales. Cet article révèle que les services environnementaux basés sur l'IA ont attiré 3,4 milliards de livres sterling de financement en 2024, soit une augmentation de 156 % par rapport à l'année précédente. Le succès de la libération du potentiel de l'IA pour la durabilité environnementale et la réalisation des objectifs climatiques mondiaux dépend fondamentalement de la résolution des incohérences en matière de qualité des données, des limites des infrastructures et des enjeux d'équité qui peuvent soit libérer, soit limiter le potentiel environnemental de l'IA.



Introduction

L'IA révolutionne les services environnementaux, mais son potentiel de transformation dépend fortement de la robustesse des systèmes de données et des infrastructures numériques. Si l'IA a déjà démontré des avantages significatifs dans des domaines tels que la surveillance des ressources, la modélisation climatique et la gestion des déchets, la mise à l'échelle de ces solutions nécessite des données de haute qualité et accessibles, ainsi que des plateformes numériques interopérables¹. Alors que le marché mondial de l'IA au service de l'environnement atteint 1,2 milliard de dollars en 2024, avec une croissance annuelle prévue de 28,4 % jusqu'en 2030, la question cruciale n'est pas de savoir si l'IA peut résoudre les défis environnementaux, mais plutôt si nos systèmes de données et nos infrastructures peuvent soutenir le déploiement de l'IA à grande échelle². Des réseaux d'eau intelligents au Texas gérant 2,3 millions d'habitants à la collecte des déchets alimentée par l'IA réduisant la consommation de carburant de 30 % dans les villes européennes, les solutions d'IA réussies pour les enjeux environnementaux partagent une base commune : des écosystèmes de données de haute qualité et une infrastructure numérique résiliente qui permettent une prise de décision en temps réel dans des systèmes urbains complexes³. Cet article examine comment des systèmes de données robustes et une infrastructure numérique évolutive conditionnent le succès des applications environnementales de l'IA.

L'enjeu clé des données : construire l'intelligence environnementale

La qualité, pierre angulaire du succès de l'IA

L'efficacité de l'IA dans les services environnementaux dépend fondamentalement de la qualité et de l'accessibilité des données. Comme le soulignent les chercheurs, « le succès des applications de l'IA repose sur la capacité à accéder à des données environnementales complètes et précises », mais cette exigence fondamentale pose des défis importants dans de nombreuses régions du monde⁴. Dans ce contexte, la qualité des données englobe l'exactitude, l'exhaustivité, la cohérence, la récence et la représentativité de l'échantillonnage dans diverses conditions environnementales. La représentativité des échantillons lors la collecte de données garantit que les modèles d'IA peuvent fonctionner efficacement dans différents contextes géographiques, saisonniers et démographiques, un aspect essentiel souvent négligé lors des déploiements initiaux.

Dans les systèmes de gestion de l'eau, ce défi se manifeste à plusieurs niveaux. Le Tarrant Regional Water District, dans le nord du Texas, illustre comment l'intégration des données transforme les opérations. Confronté à la fluctuation des coûts énergétiques sur un marché de l'électricité dérégulé, le district s'est associé à Arcadis pour mettre en place un outil de surveillance de l'énergie et du marché qui permet de visualiser les coûts de pompage de l'eau et les modèles de consommation. Comme le montre une étude pilote, cette approche fondée sur les données a permis au district d'anticiper les prix de l'énergie sur le marché, d'optimiser ses opérations en conséquence et de réaliser jusqu'à 11 % d'économies⁵. Cependant, ces réussites font figure d'exception.

Les exigences en matière d'infrastructure pour une surveillance environnementale complète sont considérables. Les systèmes modernes de gestion intelligente de l'eau nécessitent des appareils connectés à l'Internet des objets (IoT), des capteurs, une connectivité 5G, des compteurs intelligents, des systèmes de surveillance en temps réel, des analyses avancées et des algorithmes d'apprentissage automatique fonctionnant de manière coordonnée⁶. Le tableau 1 illustre les différentes exigences en matière d'infrastructure de données pour les applications d'IA environnementale, en soulignant la relation critique entre la fréquence de collecte, les exigences de précision et la réactivité du système qui déterminent le succès du déploiement de l'IA.



Tableau 1 : Exigences en matière de qualité des données pour les applications environnementales de l'IA

Domaine environnemental	Fréquence de collecte des données	Seuil de précision	Sources de données clés	Latence de traitement	Exigences en matière de stockage	Référence
Surveillance de la qualité de l'eau	Toutes les 15 minutes	Précision de 99,5 %	Capteurs de pH, turbidimètres, analyseurs chimiques	< 30 secondes	2 To par installation/an	7
Gestion du réseau énergétique	En temps réel (millisecondes)	Précision de 99,9 %	Compteurs intelligents, systèmes SCADA, stations météorologiques	< 100 millisecondes	50 To par région/an	8
Optimisation de la collecte des déchets	Mises à jour toutes les heures	Précision de 95 %	Capteurs à ultrasons, traceurs GPS, capteurs de poids	< 5 minutes	500 Go par ville/an	9
Évaluation de la qualité de l'air	Toutes les 5 minutes	Précision de 98 %	Capteurs de particules, analyseurs de gaz, stations météorologiques	< 2 minutes	5 To par zone urbaine/an	10
Systèmes de prévision des inondations	Toutes les 30 minutes	Précision de 97 %	Stations hydrométriques, capteurs de pluie, imagerie satellite	< 10 minutes	10 To par bassin versant/an	11
Prévision de la demande énergétique	Toutes les heures	Précision de 94 %	Compteurs de consommation, données météorologiques, tendances démographiques	< 15 minutes	1 To par service public/an	12

L'infrastructure comme socle du numérique

L'infrastructure numérique sert de système nerveux aux services environnementaux basés sur l'IA. Dans les villes intelligentes, la connectivité devient primordiale : les réseaux 5G doivent prendre en charge une multitude d'appareils connectés nécessaires à l'infrastructure intelligente, ainsi que la bande passante requise pour transmettre instantanément les données collectées¹². Cette infrastructure rend les systèmes environnementaux « intelligents » en utilisant l'IA pour fournir des informations sur l'ensemble des réseaux environnementaux.

La complexité de ces exigences est évidente dans les projets d'infrastructures hydrauliques intelligentes, où les villes doivent identifier des cas d'utilisation tels que la prévention des fuites et la surveillance de la qualité de l'eau, déterminer les besoins en données pour chaque cas d'utilisation, définir des plans d'infrastructure évolutifs, repérer les lacunes en matière de compétences, planifier la sécurité des données tout au long des étapes de collecte et d'analyse, et concevoir des stratégies globales de stockage des données¹². Le défi technique va au-delà du matériel et englobe l'interopérabilité des données, la protection, la confidentialité, les coûts initiaux élevés et les compétences de la main-d'œuvre.

La transformation fondée sur les données

Barcelone et Amsterdam illustrent de quelle manière une infrastructure de données sophistiquée avec des systèmes d'IA intégrés transforme la durabilité urbaine. Le système intelligent de gestion des déchets de Barcelone traite chaque année plus de 800 000 tonnes de déchets en utilisant des capteurs IoT et des algorithmes prédictifs pour optimiser les itinéraires de collecte en temps réel, améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle et l'utilisation des ressources. Les systèmes énergétiques basés sur l'IA d'Amsterdam utilisent des prévisions de consommation en temps réel pour réduire la demande électrique de pointe de 25 %. En 2024, la ville a amélioré ce système avec des contrôles au niveau des microréseaux, renforçant ainsi la résilience énergétique locale face à l'imprévisibilité climatique¹³. Ces villes démontrent comment des systèmes d'IA conçus à cet effet, lorsqu'ils sont pleinement intégrés à l'infrastructure physique, peuvent générer des bénéfices environnementaux et économiques significatifs à grande échelle.

De même, le département de la protection de l'environnement de la ville de New York a mis en place un système de lecture

automatique des compteurs (AMR) pour gérer la consommation quotidienne d'eau de la ville, qui s'élève à un milliard de gallons (3,79 milliards de litres). Le système AMR aide la ville à comprendre les habitudes de consommation d'eau et à identifier les fuites potentielles en se basant sur les pics de consommation inhabituels, ce qui a permis aux habitants de réaliser des économies cumulées de 98 millions de dollars¹⁴. Ces mises en œuvre sont des réussites, car elles répondent de manière systématique aux exigences fondamentales en matière de qualité des données et d'infrastructures.

Systèmes d'approvisionnement en eau : la révolution numérique de l'eau

Surveillance en temps réel et analyse prédictive

La gestion de l'eau basée sur l'IA représente l'une des applications les plus abouties de l'IA environnementale, en grande partie grâce aux investissements du secteur dans une infrastructure de données complète. Les services publics modernes de distribution d'eau utilisent l'IA pour différents objectifs essentiels : détection des fuites, surveillance de la qualité de l'eau, prévision de la demande et maintenance des infrastructures¹⁵. Le succès de ces applications repose sur des flux de données en temps réel de haute qualité qui répondent à des exigences de précision strictes, généralement de 99,5 % pour la surveillance de la qualité de l'eau, avec des latences de traitement inférieures à 30 secondes. Le facteur clé est l'intégration des algorithmes d'IA aux systèmes SCADA (Système de contrôle et d'acquisition de données) et aux infrastructures informatiques existantes afin de créer des systèmes de gestion de l'eau cohérents et intelligents¹⁶.

Les exigences en matière d'infrastructure de données pour les systèmes d'approvisionnement en eau comprennent des réseaux de capteurs distribués collectant toutes les 15 minutes des données sur le pH, la turbidité, la pression et le débit, des systèmes de communication sans fil capables de traiter 2 To de données par installation et par an, et des capacités de calcul en périphérie pour le traitement en temps réel. La ville de Tucson, en Arizona, illustre parfaitement la mise en œuvre proactive de l'IA dans la gestion des infrastructures hydrauliques. En 2020, la ville a déployé une technologie d'apprentissage automatique sur l'ensemble de son réseau de distribution de 7400 km. Le système détecte des schémas récurrents à partir de l'historique des pannes de canalisations et évalue les données relatives au

L'efficacité de l'IA dans les services environnementaux dépend fondamentalement de la qualité et de l'accessibilité des données

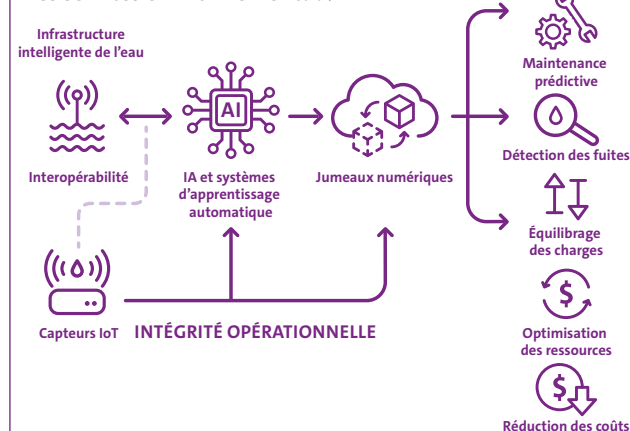
sol, aux conditions météorologiques, à l'utilisation des sols et à l'état des infrastructures afin d'élaborer des prévisions ciblées sur les ruptures de canalisations. En calculant les scores de probabilité de défaillance et de conséquences de défaillance pour chaque segment de canalisation, la technologie génère des scores trimestriels d'exposition au risque commercial, ce qui permet aux services publics de concentrer leurs ressources sur les actifs les plus critiques¹⁷.

Jumeaux numériques et maintenance prédictive

Les systèmes d'approvisionnement en eau avancés s'appuient de plus en plus sur la technologie des jumeaux numériques, qui combine l'IA, l'IoT (Internet des objets), l'*edge computing* (calcul en périphérie) et le *cloud computing* pour permettre une maintenance prédictive. Ces systèmes nécessitent des plateformes d'intégration de données complètes, capables de traiter en temps réel les données historiques de milliers de systèmes similaires, ce qui exige une infrastructure cloud robuste avec une capacité de stockage de l'ordre du pétaoctet et des capacités d'analyse de données avancées. Ces modèles virtuels de systèmes d'approvisionnement en eau réels permettent aux services publics de comparer les données en temps réel avec les données historiques de milliers de systèmes similaires, afin de prédire le comportement de chaque système spécifique. Les exigences en matière de données comprennent la surveillance continue des paramètres du système, l'intégration des données météorologiques, les registres de maintenance et les mesures de performance afin de créer des modèles prédictifs précis¹⁸.

Les exigences en matière d'infrastructure pour ces systèmes comprennent des capteurs IoT avec des taux de précision de 99,5 %, une connectivité 5G pour la transmission de données en temps réel, des systèmes de stockage basés sur le cloud et des plateformes d'analyse avancées. L'IA peut permettre de réaliser des économies de 20 à 30 % sur les dépenses opérationnelles en réduisant les coûts énergétiques, tout en facilitant les décisions d'investissement grâce à l'évaluation prédictive des besoins en infrastructures¹⁸. Toutefois, pour que la mise en œuvre soit réussie, il faut relever les défis liés à la qualité des données, établir des protocoles de communication robustes et garantir la cybersécurité dans l'ensemble de l'écosystème de données¹⁹. Le flux intégré des composants de l'infrastructure, des capteurs IoT et de l'interopérabilité aux plateformes d'IA et aux jumeaux numériques, permet d'obtenir des résultats avancés tels que la maintenance prédictive, la détection des fuites et l'optimisation des ressources, comme l'illustre la figure 1.

Figure 1 : Schéma détaillé de l'infrastructure d'IA pour les services environnementaux



L'illustration montre comment les systèmes d'eau intelligents, les capteurs IoT et la connectivité alimentent les plateformes d'IA et d'apprentissage automatique, qui fonctionnent en tandem avec les jumeaux numériques pour fournir des applications en temps réel telles que la maintenance prédictive, l'équilibrage de charge et la gestion rentable des ressources environnementales.

Systèmes énergétiques : alimenter la révolution des réseaux intelligents

Intelligence des réseaux alimentée par l'IA

La transformation numérique du secteur de l'énergie représente peut-être l'application la plus complexe de l'IA dans les services environnementaux, nécessitant une infrastructure de données sophistiquée avec des latences de traitement inférieures à 100 millisecondes et des exigences de précision de 99,9 %. Les systèmes d'IA des réseaux énergétiques doivent traiter en temps réel les données provenant des compteurs intelligents, des systèmes SCADA et des stations météorologiques, ce qui nécessite jusqu'à 50 To de stockage par région et par an. Ces technologies permettent la collecte de données en temps réel, l'analyse prédictive et la gestion décentralisée de l'énergie, indispensables au fonctionnement de systèmes énergétiques toujours plus complexes, alimentés de plus en plus par des énergies renouvelables²⁰. Les réseaux intelligents utilisent l'IA comme « agent intelligent » évaluant l'environnement et prenant des mesures pour optimiser des objectifs spécifiques tels que l'intégration des énergies renouvelables, la stabilisation du réseau et la réduction des risques financiers²¹.

L'infrastructure de données des réseaux intelligents nécessite une infrastructure de comptage avancée (AMI) capable de communiquer dans les deux sens, des réseaux de capteurs distribués surveillant les conditions du réseau en temps réel et des plateformes d'apprentissage automatique traitant les prévisions météorologiques, les données de production historiques et les conditions en temps réel. Les réseaux intelligents modernes compensent la nature intermittente des énergies renouvelables grâce à des capacités avancées de traitement des données. Des algorithmes d'IA analysent les prévisions météorologiques, les données historiques de production et les conditions en temps réel pour prédire la production d'énergie renouvelable, ce qui permet aux opérateurs de réseau de planifier le stockage de l'énergie, de gérer les excédents d'énergie et d'optimiser l'utilisation des ressources renouvelables²². Cette précision garantit que les énergies renouvelables atteignent leur plein potentiel tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles.

Exigences en matière d'infrastructure et mise en œuvre

La gestion des réseaux basée sur l'IA repose sur une architecture technique multicouche qui commence par l'acquisition de données à partir de capteurs, de compteurs intelligents et de ressources énergétiques distribuées, garantissant une visibilité en temps réel des conditions du réseau. L'infrastructure de données doit prendre en charge un traitement à l'échelle de la milliseconde pour la détection et la réponse aux anomalies, ce qui nécessite des capacités de calcul en périphérie (*edge computing*) et des réseaux de communication à haut débit. Ces données sont traitées à l'aide de modèles d'apprentissage automatique avancés, tels que les réseaux LSTM pour la prévision de la charge et de la production d'énergie renouvelable, et l'apprentissage par renforcement profond pour le contrôle dynamique, qui identifie les modèles et prédisent les fluctuations de l'offre et de la demande. Les niveaux décisionnels utilisent ensuite des algorithmes d'optimisation, notamment la programmation linéaire, les algorithmes génétiques et l'optimisation par essai particululaire, afin d'équilibrer les charges, de répartir les ressources et de maintenir la stabilité du réseau en temps réel²³.

L'infrastructure de comptage avancée (AMI) génère de grandes quantités de données de consommation détaillées, ce qui nécessite des systèmes de gestion des données robustes capables de traiter des mises à jour toutes les heures avec des seuils de précision de 94 % et des latences de traitement inférieures à 15 minutes. L'AMI permet une communication bidirectionnelle en temps réel entre les services publics et les consommateurs, favorisant une gestion de l'énergie plus dynamique et plus réactive. Associée à des technologies destinées aux consommateurs, telles que les thermostats programmables et les écrans domestiques, l'AMI permet aux services publics de mettre en place des structures



tarifaires basées sur le temps et des incitations qui encouragent les utilisateurs à modifier ou à réduire leur consommation d'énergie pendant les périodes de pointe²⁴.

Gestion des déchets : l'intelligence au service de l'économie circulaire

Systèmes intelligents de collecte et de traitement

Les systèmes de gestion des déchets basés sur l'IA représentent un secteur en pleine croissance dans le domaine des services environnementaux, stimulé par l'augmentation de la production mondiale de déchets et le besoin de solutions durables. Les défis liés à l'infrastructure des données dans la gestion des déchets concernent principalement la fiabilité des capteurs dans des environnements difficiles, avec des exigences de précision de 95 % pour l'optimisation de la collecte et des latences de traitement inférieures à 5 minutes. La production mondiale de déchets municipaux solides s'élève actuellement à 2,01 milliards de tonnes par an et devrait atteindre 3,4 milliards de tonnes d'ici 2050²⁵. Les systèmes d'IA pour la gestion des déchets nécessitent des capteurs à ultrasons pour la surveillance du niveau de remplissage, des traceurs GPS pour la localisation des véhicules et des capteurs de poids pour l'optimisation du chargement, générant environ 500 Go de données par ville et par an.

L'infrastructure technique comprend des réseaux LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) pour la connectivité des capteurs à l'échelle de la ville, des plateformes de traitement des données basées sur le cloud et des applications mobiles pour les équipes de collecte des déchets, qui doivent toutes être intégrées aux systèmes de gestion des déchets existants. Les systèmes de poubelles intelligentes utilisent des capteurs IoT pour surveiller les niveaux de déchets en temps réel et alerter les prestataires de services de gestion des déchets lorsque les poubelles doivent être collectées²⁶.

Optimisation des itinéraires et efficacité opérationnelle

L'optimisation des itinéraires grâce à l'IA représente l'une des applications les plus efficaces dans le domaine de la gestion des déchets. Les données requises comprennent les données en temps réel des capteurs des poubelles, les informations de suivi GPS,

l'analyse des schémas de circulation et les données historiques de collecte, traitées par des algorithmes d'apprentissage automatique qui optimisent les itinéraires de collecte. En analysant les données en temps réel provenant des capteurs des poubelles, des traceurs GPS et des conditions de circulation, les algorithmes d'IA déterminent les itinéraires de collecte les plus efficaces. Des recherches démontrent que l'optimisation par l'IA peut réduire les distances de transport jusqu'à 36,8 %, permettre des économies de coûts pouvant atteindre 13,35 % mais aussi des gains de temps allant jusqu'à 28,22 %²⁷. À Pékin, le déploiement d'une optimisation des itinéraires basée sur l'IA et d'une surveillance en temps réel grâce à l'IoT a permis de réduire de 25 % les trajets de collecte des déchets et de 30 % les incidents de débordement des poubelles²⁸.

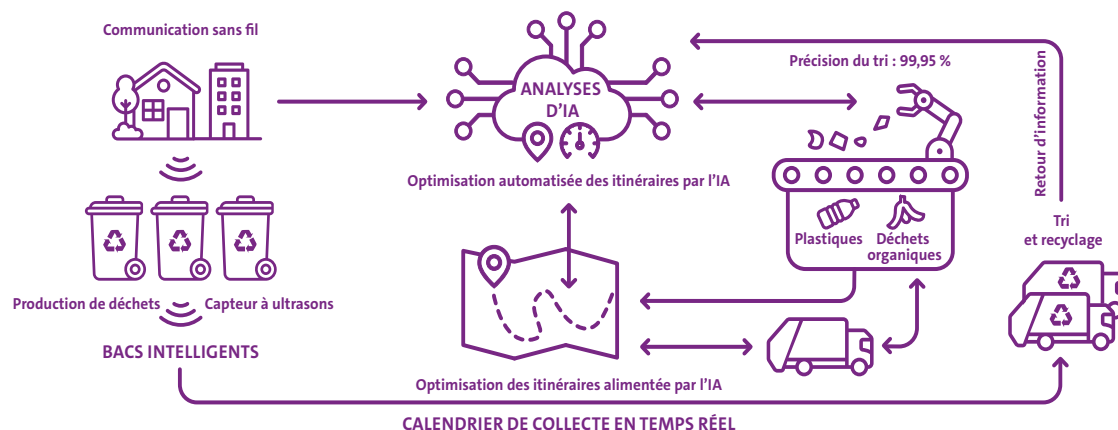
L'interopérabilité des données, leur protection, les préoccupations relatives à la confidentialité, les coûts initiaux élevés et l'accessibilité des infrastructures représentent des obstacles importants

L'infrastructure mise en jeu comprend des réseaux de capteurs avec connectivité LoRaWAN, des systèmes de communication sans fil, des plateformes de traitement de données basées sur le cloud capables de gérer des mises à jour horaires et des applications mobiles pour les équipes de collecte des déchets permettant une optimisation des itinéraires en temps réel.

Tri et recyclage avancés

Le tri des déchets basé sur l'IA représente une avancée technologique majeure en matière d'efficacité du recyclage. L'infrastructure de données des systèmes de tri basés sur l'IA nécessite des réseaux de caméras haute résolution, des capacités de traitement d'images par ordinateur et des algorithmes de tri en temps réel capables de traiter divers flux de déchets avec une précision allant de 72,8 % à 99,95 %. Les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent identifier et trier les déchets avec ce niveau de précision, améliorant considérablement les résultats du recyclage par rapport aux processus de tri manuel²⁷. Les systèmes de vision par ordinateur analysent les données sur la composition des déchets en temps réel, ce qui nécessite une infrastructure de traitement d'images robuste et des plateformes d'apprentissage automatique capables de traiter diverses tâches d'identification des matériaux. La figure 2 illustre un écosystème intégré de gestion des déchets alimenté par l'IA, montrant comment les données des capteurs, l'analyse en temps réel et l'automatisation améliorent l'efficacité, la réactivité et la durabilité des systèmes de gestion des déchets modernes.

Figure 2 : Représentation schématique d'un système intelligent de gestion des déchets alimenté par l'IA.



La figure illustre le cycle complet, depuis la production des déchets et la surveillance en temps réel via des poubelles intelligentes connectées à l'IoT, jusqu'à l'optimisation des itinéraires grâce à l'IA et au tri avancé dans les installations de recyclage. Les réseaux de communication sans fil permettent la transmission dynamique de données vers des plateformes d'IA basées sur le cloud, qui optimisent les itinéraires de collecte, réduisent la consommation de carburant et améliorent l'efficacité du tri grâce à l'apprentissage automatique et aux technologies de vision par ordinateur. Ce système intégré met en évidence le rôle de l'infrastructure numérique dans l'amélioration de l'efficacité opérationnelle et des résultats environnementaux dans la gestion des déchets urbains.

Défis en matière d'infrastructure et enjeux d'équité

Inégalités d'accès et fracture numérique

Le déploiement de services environnementaux basés sur l'IA se heurte à d'importants défis en matière d'infrastructure et d'équité, qui peuvent soit démocratiser, soit concentrer davantage les bénéfices environnementaux. L'interopérabilité des données, leur protection, les préoccupations en matière de confidentialité, les coûts initiaux élevés et l'accessibilité des infrastructures constituent des obstacles majeurs à la mise en œuvre de ces services, qui touchent de manière disproportionnée les communautés mal desservies. Ces défis sont particulièrement prononcés dans les régions où les infrastructures technologiques sont en cours de développement, où le besoin de solutions environnementales dépasse souvent la capacité de déploiement de l'IA de pointe²⁹.

La fracture numérique se manifeste dans l'accès à une connexion Internet haut débit (essentielle pour la transmission de données en temps réel), la disponibilité d'une expertise technique pour la maintenance des systèmes, les ressources financières pour les investissements dans les infrastructures et les cadres réglementaires favorisant l'innovation. Les villes doivent relever ces défis tout en veillant à ce que les services environnementaux basés sur l'IA profitent à tous les habitants plutôt que d'exacerber les inégalités existantes. Le tableau 2 présente une analyse de la mise en œuvre des infrastructures environnementales basées sur l'IA à différentes échelles et dans différents contextes géographiques, démontrant les avantages substantiels à long terme qui peuvent être obtenus grâce à des gains d'efficacité opérationnelle et à l'optimisation des ressources. Dans les régions en développement, comme de nombreuses parties de l'Afrique, ces délais peuvent être considérablement allongés en raison des lacunes des infrastructures, des coûts d'investissement plus élevés et de l'expertise technique limitée, soulignant la nécessité d'une adaptation contextuelle et d'une coopération internationale.

Tableau 2 : Analyse de l'implémentation des systèmes environnementaux basés sur l'IA

Type de système	Calendrier de mise en œuvre	Principaux facteurs de coût	Besoins en infrastructures de données	Facteurs de risque	Référence
Réseaux intelligents d'approvisionnement en eau	18 à 36 mois	Déploiement de capteurs, infrastructure de données	Réseaux de capteurs distribués, connectivité 5G, stockage dans le cloud	Intégration des canalisations vieillissantes, cybersécurité	31
Réseaux intelligents alimentés par l'IA	24 à 60 mois	Modernisation du réseau, plateformes IA	Traitement des données en temps réel, systèmes AML, informatique de pointe	Approbation réglementaire, complexité du système	32
Gestion intelligente des déchets	12 à 60 mois	Capteurs de flotte, logiciel d'optimisation des itinéraires	Réseaux de capteurs IoT, connectivité LoRaWAN, plateformes d'analyse de données	Modernisation des véhicules, formation des conducteurs	33
Surveillance de la qualité de l'air	18 à 36 mois	Réseaux de capteurs, traitement des données	Capteurs multiparamètres, réseaux sans fil, systèmes de validation des données	Interférences météorologiques, besoins d'étalonnage	34
Plateforme urbaine intégrée	36 à 60 mois	Intégration des systèmes, tableaux de bord unifiés	Normes de données interopérables, API unifiées, intégration intersectorielle	Interopérabilité, cybersécurité, confidentialité	35

Gouvernance des données et confidentialité

Pour être efficaces, les systèmes environnementaux basés sur l'IA nécessitent des cadres de gouvernance des données complets qui concilient innovation et protection de la vie privée. Les principaux aspects à prendre en compte en matière de gouvernance des données sont les suivants : veiller à ce que les données soient utilisées uniquement à des fins spécifiques, établir des droits de propriété clairs sur les données pour l'entraînement et l'inférence de l'IA, mettre en œuvre des stratégies d'atténuation des biais dans les données d'entraînement et les résultats, garantir la transparence des modèles afin que les utilisateurs comprennent comment les données influencent les décisions impactant les coûts, établir des contrôles d'accès clairs pour la consultation et la modification des données, et élaborer des politiques complètes de conservation et de suppression des données. L'intégration de réseaux de capteurs, de compteurs intelligents et de systèmes de surveillance génère des quantités détaillées et considérables de données sur la

consommation des ressources, les modèles de production de déchets et les conditions environnementales. Ces informations peuvent fournir des indications précieuses pour l'optimisation des systèmes, mais elles peuvent également porter atteinte à la vie privée des résidents, ce qui soulève d'importantes préoccupations en matière de confidentialité concernant la surveillance et la propriété des données³⁵.

La contribution positive de l'IA pour la soutenabilité environnementale et la réalisation des objectifs climatiques mondiaux dépend fondamentalement de la qualité des données, de l'accessibilité des infrastructures et de stratégies systémiques de déploiement

Une gouvernance des données efficace nécessite une infrastructure technique robuste, comprenant des systèmes de cryptage, des plateformes de stockage sécurisées, des mécanismes de contrôle d'accès et des pistes d'audit afin de maintenir la responsabilité et la confiance du public. Il est essentiel de garantir la confidentialité et la sécurité des données pour une mise en œuvre éthique de l'IA dans la surveillance et la préservation de l'environnement.

Une mise en œuvre réussie repose sur une gouvernance solide des données, capable de protéger les informations sensibles tout en permettant un échange éthique des données⁴.



Orientations futures et technologies émergentes

Infrastructure de nouvelle génération

L'avenir des services environnementaux assistés par l'IA dépend de l'évolution continue des infrastructures. Les technologies émergentes, notamment les réseaux 5G à capacité renforcée, le calcul en périphérie pour réduire la latence, les architectures de calcul distribuées, les systèmes de capteurs multiparamètres avancés et les algorithmes d'apprentissage automatique améliorés, promettent d'accroître les capacités et l'accessibilité des applications d'IA environnementale. Le calcul en périphérie, en particulier, offre la possibilité de traiter les données localement, ce qui réduit la latence, améliore les temps de réponse et renforce la résilience des systèmes³⁶.

Dans le domaine de la gestion de l'eau, les infrastructures de nouvelle génération comprendront des systèmes autonomes de détection des fuites avec des recommandations de réparation en temps réel, des plateformes de jumeaux numériques pour l'ensemble des réseaux de distribution d'eau et des analyses prédictives pour la planification du remplacement des infrastructures. Les systèmes énergétiques évolueront vers une gestion entièrement autonome du réseau, avec des temps de réponse de l'ordre de la microseconde et des normes de fiabilité de 99,99 %. La gestion des déchets intégrera des systèmes de vision par ordinateur pour un tri automatisé avec une précision supérieure à 99 % et des algorithmes de collecte prédictifs qui anticipent les schémas de production des déchets.

Intégration et interopérabilité

Les systèmes d'IA environnementale intégrés révolutionnent les villes intelligentes en permettant une gestion coordonnée entre différents secteurs tels que l'eau, l'électricité et les déchets. Les exigences en matière d'infrastructure de données pour les systèmes intégrés comprennent des normes de données unifiées dans tous les secteurs, des API interopérables pour la communication entre les systèmes, des lacs de données centralisés avec des capacités de traitement distribué et des cadres de cybersécurité complets protégeant tous les systèmes connectés. Ces systèmes utilisent l'intégration de l'IA, de l'Internet des objets (IoT) et des technologies de jumeau numérique pour collecter et analyser des données en temps réel, améliorer l'utilisation des ressources et faciliter les décisions politiques fondées sur des preuves³⁷.

Les jumeaux numériques de villes représentent l'expression ultime de l'IA environnementale intégrée, nécessitant des plateformes d'intégration de données complètes capables de traiter simultanément des pétaoctets d'informations en temps réel provenant des systèmes d'eau, d'énergie et de déchets. Le développement des jumeaux numériques de villes permet de créer des modèles virtuels complets qui simulent l'ensemble des systèmes environnementaux urbains. Ces plateformes permettent de tester des scénarios, d'évaluer des politiques et d'optimiser les systèmes dans tous les domaines environnementaux simultanément³⁸. Le tableau 3 détaille les indicateurs de performance démontrant le potentiel transformateur des systèmes environnementaux basés sur l'IA lorsqu'ils sont soutenus par une infrastructure de données robuste.

Tableau 3 : Indicateurs de performance de l'IA et gains d'efficacité dans les différents secteurs environnementaux

Application environnementale	Amélioration de l'efficacité	Économies de ressources	Amélioration du temps de réponse	Gains de précision	Réduction des coûts	Impact environnemental	Référence
Détection prédictive des fuites d'eau	Réduction de 45 à 65 % des pertes d'eau	Réduction de 20 à 40 % des coûts de réparation	Identification des défauts 75 % plus rapide	Précision de détection de 92 à 99 %	Économies de maintenance de 30 à 50 %	Réduction de 25 % du gaspillage d'eau	40
Équilibrage de charge du réseau intelligent	Amélioration de la stabilité du réseau de 20 à 55 %	Gains d'efficacité énergétique de 15 à 35 %	Réponse à la demande 85 % plus rapide	Précision des prévisions de 95 à 99,5 %	Réduction des coûts opérationnels de 15 à 30 %	Augmentation de 75 à 95 % de l'intégration des énergies renouvelables	41
Optimisation automatisée des itinéraires de collecte des déchets	Gain d'efficacité de 25 à 40 % dans la collecte	Réduction de la consommation de carburant de 30 à 45 %	Ajustements d'itinéraire 60 % plus rapides	Prévision de la capacité de 85 à 95 %	15 à 35 % d'économies opérationnelles	Réduction des émissions de 20 %	29
Prévision de la qualité de l'air	Réduction de 20 à 35 % des polluants	Réduction des coûts de surveillance de 10 à 25 %	Génération d'alertes 80 % plus rapide	Précision des prévisions de 88 à 96,5 %	Optimisation des équipements de 25 à 50 %	Amélioration de 15 % des résultats en matière de santé publique	42
Prévision de la demande énergétique	Amélioration des prévisions de 35 à 60 %	Optimisation de la capacité de 20 à 35 %	Réponse du marché 70 % plus rapide	Précision des prévisions de 91 à 97 %	Optimisation des transactions de 25 à 40 %	Réduction de 18 % de l'empreinte carbone	43
Systèmes de gestion des inondations	Augmentation de 55 à 75 % du délai de prévision	Protection des infrastructures de 30 à 50 %	Réponse d'urgence 90 % plus rapide	Prévision des événements de 89 à 95 %	Réduction des coûts liés aux dommages de 35 à 55 %	Amélioration de 40 % de la protection des écosystèmes	11

Conclusion

Le déploiement de l'IA dans les services environnementaux se trouve à un tournant décisif, où les capacités technologiques rencontrent la réalité des infrastructures. Cette analyse révèle que, si l'IA offre un potentiel de transformation pour les systèmes de gestion de l'eau, de l'énergie et des déchets, la mise en œuvre réussie de l'IA pour la durabilité environnementale et la réalisation des objectifs climatiques mondiaux dépend fondamentalement de la qualité des données, de l'accessibilité des infrastructures et des stratégies de déploiement systématiques. Les 4,6 milliards de dollars investis dans l'IA environnementale en 2024 témoignent d'une forte confiance du marché, mais une mise en œuvre efficace nécessite une attention systématique aux éléments fondamentaux qui permettent aux systèmes d'IA de fonctionner de manière fiable à grande échelle.

La qualité des données et le niveau de préparation des infrastructures apparaissent comme les préoccupations primordiales dans tous les domaines environnementaux, avec une exigence de précision de 99,5 % pour les systèmes d'approvisionnement en eau, de 99,9 % pour les réseaux énergétiques et de 95 % pour la gestion des déchets, chacun ayant des exigences spécifiques en

matière de latence et de stockage. De la gestion prédictive des canalisations d'eau à Tucson à la collecte optimisée des déchets à Barcelone, les mises en œuvre réussies ont en commun des écosystèmes de données robustes qui garantissent la précision, l'accessibilité et la réactivité en temps réel. Les villes doivent investir de manière stratégique dans des réseaux de capteurs, des infrastructures de communication et des cadres de gouvernance des données qui soutiennent le déploiement de l'IA tout en protégeant la vie privée et en garantissant un accès équitable à ces nouvelles infrastructures.

Les exigences en matière d'infrastructure technique vont au-delà des spécifications matérielles et englobent des plateformes complètes de gestion des données, des cadres de cybersécurité et des systèmes interopérables qui peuvent traiter de manière fiable des flux de données en temps réel. À mesure que les défis environnementaux s'intensifient, l'intégration de l'IA dans l'infrastructure numérique offre une voie vers des services environnementaux plus résilients, plus efficaces et plus durables, capables de servir efficacement l'ensemble des habitants.



À propos de l'auteur :

David Bamidele Olawade est facilitateur principal de projets de recherche et d'innovation à la Medway NHS Foundation Trust et maître de conférences en santé publique à University of East London. Il a publié plus de 120 articles sur la recherche environnementale et l'IA, notamment des travaux pionniers sur la gestion intelligente des déchets et l'IA au service du développement durable. Son expertise couvre la surveillance environnementale, la recherche sur la pollution atmosphérique et les applications de l'IA dans les systèmes de santé publique. Il possède également une expérience dans la conception d'infrastructures de données et la transformation numérique pour le développement durable dans les secteurs de l'eau, de l'énergie et de la gestion des déchets.







**RÉDUIRE L'USAGE DES
RESSOURCES, ÉLARGIR L'ACCÈS
À L'ÉNERGIE DÉCARBONÉE
ET SOUTENIR LES
COMMUNAUTÉS LOCALES**

Cette section se concentre sur deux dimensions clés de l'empreinte environnementale de l'intelligence artificielle (IA) : la consommation d'énergie et l'utilisation de l'eau. Ces dernières années, l'attention du public s'est largement portée sur la consommation énergétique de l'IA. Plus récemment, l'usage de l'eau par les centres de données a suscité des préoccupations croissantes. Il est essentiel de comprendre ces impacts pour développer des systèmes d'IA plus durables et limiter les effets environnementaux de leur croissance rapide.

Jonathan Koomey et Eric Masanet analysent la manière dont l'IA influe sur la consommation d'énergie, en soulignant que ses impacts vont bien au-delà de l'électricité utilisée pour l'entraînement et l'inférence des modèles.

Si la consommation directe d'énergie des opérations d'IA dans les centres de données constitue l'effet le plus visible et le plus facilement mesurable, les auteurs insistent sur le fait que les impacts les plus significatifs de l'IA résultent de ses usages au sein des systèmes énergétiques et de ses interactions avec l'économie dans son ensemble.

Selon les modalités de déploiement, l'IA peut soit accroître la demande énergétique globale, soit la réduire – notamment lorsqu'elle favorise des gains d'efficacité et l'intégration des énergies renouvelables, ou au contraire lorsqu'elle génère des effets rebond, encourage l'intensification de l'extraction des combustibles fossiles et stimule la consommation.

Ces interactions systémiques complexes entre l'IA, l'énergie et l'économie compliquent l'estimation de l'impact net de l'IA sur la consommation énergétique et les émissions. Face à l'évolution imprévisible des technologies d'IA, Koomey et Masanet préconisent le recours à des mesures systématiques, à l'amélioration des données et des cadres analytiques, ainsi qu'à des approches fondées sur des scénarios, plutôt qu'à des projections ponctuelles, afin de mieux appréhender les implications à long terme de l'IA sur l'énergie et les émissions.

Ana Pinheiro Privette oriente ensuite l'analyse vers une dimension des opérations d'IA encore insuffisamment comprise : l'empreinte hydrique des centres de données. Elle explique que l'entraînement et le déploiement de modèles d'IA à grande échelle requièrent une puissance de calcul importante, générant de la chaleur souvent dissipée à l'aide de systèmes de refroidissement fortement consommateurs d'eau. Par ailleurs, la production d'électricité nécessaire au fonctionnement de ces systèmes d'IA peut également entraîner une consommation indirecte significative d'eau. Si l'usage mondial de l'eau par les centres de données demeure relativement limité par rapport à d'autres secteurs, l'expansion rapide de ces

infrastructures peut accentuer les tensions locales sur la ressource, en particulier dans les régions déjà confrontées à un stress hydrique. Pour répondre à ces enjeux, Privette souligne l'importance d'aligner la croissance de l'IA et le développement des centres de données avec la planification locale et régionale des ressources en eau, tout en adoptant des pratiques de gestion circulaire de l'eau, telles que la réutilisation des eaux usées et les systèmes de refroidissement en boucle fermée. L'article met également en avant la nécessité de disposer d'indicateurs standardisés de consommation d'eau et de mécanismes de reporting transparents, afin de soutenir une gouvernance efficace et un développement de l'IA plus sobre en eau. Enfin, l'IA elle-même peut être mobilisée pour le suivi prédictif et la gestion adaptative de l'eau, contribuant ainsi à une gestion plus intelligente des ressources hydriques. Privette conclut en soulignant l'urgence d'une approche multidimensionnelle et intersectorielle pour assurer une évolution durable de l'IA, en la positionnant comme un levier potentiel d'une gestion environnementale plus globale.

Ces deux articles offrent une vision des impacts environnementaux de l'IA, tant du point de vue de la consommation d'énergie que de l'utilisation de l'eau. Nombre de ces impacts se manifestent au sein des communautés locales où les centres de données sont implantés. Les articles des sections 1, 2, 4 et 5 examinent ainsi les impacts et opportunités de l'IA à l'échelle communautaire, notamment l'accès aux données, la gouvernance inclusive et les capacités de la main d'œuvre.

Si l'IA recèle un potentiel considérable pour soutenir la durabilité – notamment en optimisant la gestion des systèmes énergétiques et hydriques – son déploiement rapide soulève des enjeux majeurs, en particulier à l'échelle locale. Relever ces défis nécessite une approche multidimensionnelle combinant innovation technologique, cadres réglementaires, transparence en matière de reporting et approche communautaire du développement des infrastructures d'IA.

Comprendre la consommation énergétique de l'IA

Jonathan Koomey
Koomey Analytics,
Baie de San Francisco, Californie

Eric Masanet
Université de Californie,
Santa Barbara

De nombreuses évaluations récentes des effets des systèmes de l'intelligence artificielle (IA) manquent de rigueur. La consommation d'électricité et les émissions de carbone liées au fonctionnement de l'IA sont souvent considérées comme les questions les plus prégnantes. Mais l'utilisation même de l'IA peut avoir un impact important sur les systèmes énergétiques et l'économie dans son ensemble.

Si tous les effets du déploiement de l'IA sont soumis à une grande incertitude, l'analyse des effets de ses opérations est généralement plus réalisable. La compréhension humaine des impacts du déploiement de l'IA sur des domaines spécifiques, ainsi que de ses interactions avec l'économie dans son ensemble, n'en est qu'à ses débuts. Cependant, nous savons que les effets de l'IA pourraient soit augmenter la consommation énergétique (en rendant l'extraction des combustibles fossiles ou géothermiques moins coûteuse, en stimulant la consommation des particuliers grâce à des publicités plus ciblées), soit la réduire (par exemple en permettant le déploiement de batteries pour accroître l'adoption des énergies renouvelables, qui sont plus efficaces que les centrales thermiques en matière d'énergie primaire, ou en améliorant l'efficacité au sein de l'économie dans son ensemble).

Pour ces effets moins bien compris, les chercheurs doivent concevoir des cas tests cohérents mesurant les impacts économiques, énergétiques et environnementaux avant et après le déploiement de systèmes d'IA récents. Pour tester les interactions, de nouveaux modèles économiques à grande échelle pourraient être nécessaires, capables de représenter de manière suffisamment détaillée les conséquences des changements technologiques.

Introduction

L'IA désigne une vaste catégorie de méthodes informatiques conçues pour imiter certains aspects de l'intelligence humaine. Il s'agit notamment de reconnaître des schémas, d'interpréter le langage, de faire des prédictions et même de générer du contenu créatif. Si le concept d'IA existe depuis des décennies, ce domaine a connu une évolution spectaculaire ces dernières années, tant en termes de capacités technologiques que de visibilité publique.

Traditionnellement, la plupart des systèmes d'IA étaient « étroits » ou spécifiques à une tâche : optimisation des recommandations publicitaires, détection des fraudes, prévision de la demande, réduction de la consommation énergétique des centres de données pour le refroidissement ou analyse d'images satellites ou médicales. Ces systèmes sont généralement construits à l'aide d'algorithmes d'*apprentissage automatique* qui identifient des modèles dans les données et améliorent les performances humaines et institutionnelles.

Plus récemment, une nouvelle génération de systèmes d'IA, connue sous le nom d'*IA générative*, a fait son apparition. Ces modèles, en particulier les *grands modèles linguistiques (LLM)* comme ChatGPT, Copilot, Claude ou Gemini, sont entraînés à partir de vastes ensembles de données et peuvent produire des textes, des images, des codes ou de la musique fluides, semblables à ceux créés par des humains. L'IA générative est souvent considérée comme une technologie polyvalente, capable d'effectuer un large éventail de tâches avec un minimum de personnalisation. Elle a suscité des espoirs en matière de gains de productivité et d'accélération des découvertes scientifiques, mais elle a également soulevé des inquiétudes quant à son empreinte environnementale.

Cet article analyse la relation entre l'essor de l'IA et l'énergie, en examinant les enjeux liés à la consommation et aux émissions et en présentant ce que nous savons et ce qui reste incertain. Il aborde également l'importance de ces questions pour les responsables politiques, les chercheurs et les leaders industriels qui s'efforcent de faire coïncider l'IA avec les objectifs de durabilité. Enfin, il propose un cadre permettant d'organiser et d'étudier les différents effets de l'IA sur la consommation énergétique.

Trois façons dont l'IA affecte la consommation d'énergie

Pour comprendre l'impact de l'IA sur la consommation d'énergie, il est utile de distinguer trois catégories d'effets, comme l'illustre la figure 1 :

- Les effets directs des opérations d'IA
- Les effets de l'application de l'IA sur les activités liées à l'énergie
- Les effets systémiques et interactifs de l'IA sur le reste de l'économie



Les effets directs des opérations d'IA

Il s'agit notamment de l'électricité consommée lorsque les modèles d'IA sont entraînés puis utilisés de manière concrète. L'entraînement est le processus par lequel un modèle d'IA apprend à partir de grands ensembles de données, en ajustant ses paramètres internes pour effectuer une tâche efficacement. Cette étape est réalisée périodiquement à l'aide d'une infrastructure informatique très puissante et donc très demandeuse en énergie. Une fois entraîné, le modèle est déployé et utilisé pour générer des prédictions ou des résultats, un processus appelé «inférence». L'inférence est beaucoup moins gourmande en ressources informatiques par tâche que l'entraînement, mais elle se produit en continu, souvent sur des millions d'appareils.

L'entraînement et l'inférence de l'IA consomment de l'énergie via l'alimentation électrique et le refroidissement des centres de données, constituant leur consommation opérationnelle directe. Bien que cette composante soit la plus facilement mesurable, les estimations restent incertaines^{1,2}. À mesure que l'IA se généralise, l'inférence pourrait devenir la principale source de demande énergétique, avec des conséquences majeures sur la conception et la gestion des centres de données.

Les effets de l'application de l'IA sur les activités liées à l'énergie

L'IA pourrait s'intégrer largement aux systèmes de production, de distribution et de consommation d'énergie dans l'ensemble de l'économie³. Ces applications potentielles peuvent recouvrir de nombreux secteurs⁴. Elle permettrait notamment d'optimiser les réseaux électriques en anticipant la demande et en intégrant les énergies renouvelables⁵, d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et de l'industrie, et d'optimiser les transports via la gestion des itinéraires et de la recharge des véhicules électriques.

Elle pourrait également accélérer l'automatisation industrielle, améliorer l'efficacité énergétique de l'agriculture et contribuer à la sensibilisation des citoyens à la transition énergétique.

D'autre part, l'IA pourrait être déployée pour réduire le coût de l'exploration et de l'extraction du pétrole et du gaz, afin d'accroître la compétitivité et la longévité des systèmes à combustibles fossiles. Si elle est utilisée pour guider les véhicules autonomes, elle pourrait augmenter le nombre de kilomètres parcourus par passage⁶ tout en réduisant le recours aux transports en commun. Elle pourrait également entraîner la création de nouveaux biens et services, et un marketing plus ciblé de ces biens et services, augmentant ainsi la consommation⁷. Enfin, elle pourrait aussi être déployée pour diffuser de la désinformation sur la transition énergétique et semer le doute sur les nouvelles technologies⁸.

Selon leurs usages et leur régulation, ces applications peuvent ainsi augmenter ou réduire la demande énergétique globale, avec des effets potentiellement importants mais difficiles à quantifier.

Les effets systémiques et interactifs de l'IA sur le reste de l'économie

Au-delà de l'énergie, l'IA pourrait stimuler les avancées scientifiques et technologiques et transformer l'économie et le marché du travail. Ces effets, potentiellement majeurs sur l'énergie et les émissions, restent toutefois difficiles à anticiper et dépendent fortement des usages et de la régulation de l'IA.

Le triangle inversé de la figure n°1 représente l'échelle et le degré d'incertitude de chaque catégorie quant à sa consommation d'énergie et ses émissions : les effets directs sont les mieux compris, mais leur impact est probablement plus faible ; les effets au niveau du système pourraient être transformationnels, mais ils restent très incertains. L'analyse de scénarios et une gouvernance agile seront essentielles dans les prises de décision à venir.

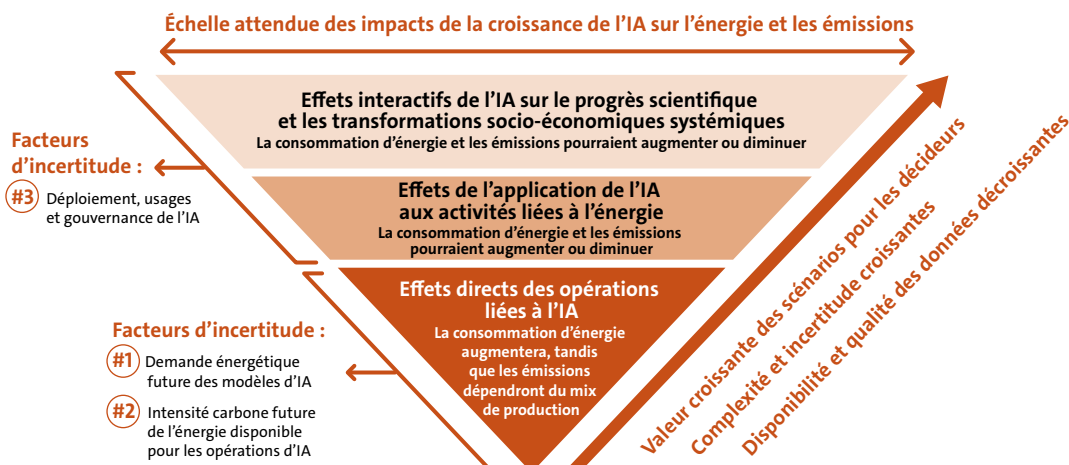
Comprendre la demande énergétique actuelle et future des opérations d'IA

Pour évaluer les implications de l'utilisation de l'IA dans le secteur de l'énergie, il est important de considérer la consommation électrique globale des technologies de l'information (TI). Les charges de calcul de l'IA sont généralement hébergées dans des centres de données à grande échelle qui prennent aussi en charge des services informatiques classiques, tels que la recherche, les réseaux sociaux, le e-commerce et l'informatique d'entreprise.

L'informatique centralisée peut être divisée en deux grandes catégories : les centres de données informatiques, qui font fonctionner les IA et d'autres services cloud, et les réseaux, qui transmettent et acheminent les données. Ces catégories peuvent parfois se chevaucher, et leurs profils énergétiques peuvent différer.

Selon Malmodin *et al.*⁹, les centres de données informatiques et les réseaux ont chacun consommé environ 1 % de l'électricité mondiale en 2020, et l'AIE a estimé que la part des centres de données informatiques passerait à 1,5 % en 2024⁴. L'AIE estime également que les charges de calcul de l'IA exécutées sur des « serveurs accélérés » ont représenté environ 15 % de la consommation électrique mondiale des centres de données informatiques cette année-là. Les appareils destinés aux utilisateurs, tels que les ordinateurs portables, les ordinateurs de bureau, les smartphones et les imprimantes, représentent 2 % de la consommation mondiale d'électricité, un chiffre qui est resté

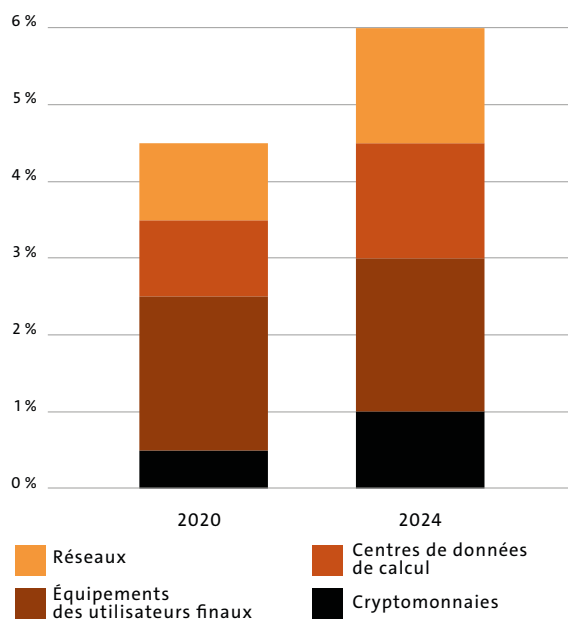
Figure 1 : Dimensions pour évaluer les effets de l'IA sur la consommation d'énergie et les émissions



relativement stable. Le minage de cryptomonnaies, dominé par le Bitcoin, a fluctué entre 0,5 % et 1 %, avec d'importantes variations d'une année sur l'autre.

La figure 2 présente les fractions approximatives de la consommation mondiale d'électricité pour ces composants en 2020 et 2024, sur la base des références et des hypothèses citées dans la légende. La consommation totale d'électricité de l'ensemble des équipements informatiques représentait environ 6 % de la consommation mondiale d'électricité en 2024.

Figure 2 : Parts approximatives de la consommation mondiale totale d'électricité représentées par différents types d'équipements informatiques en 2020 et 2024



Sources : Centres de données informatiques en 2020 : Malmudin et al.⁹. Centres de données informatiques en 2024 : AIE⁴. Les réseaux en 2024 devraient correspondre au total des centres de données informatiques de l'AIE (1,5 %). Appareils des utilisateurs finaux en 2020 d'après Malmudin et al.⁹, avec un pourcentage supposé constant jusqu'en 2024. Totaux des cryptomonnaies (Bitcoin) d'après l'indice de consommation énergétique du Bitcoin de Cambridge (<https://ccaf.io/cbnsi/cbeci>) divisés par les totaux de consommation d'électricité de l'AIE¹⁰.

Cinq facteurs majeurs influençant la consommation énergétique future de l'IA

À l'avenir, la consommation d'électricité liée à l'IA sera déterminée par des changements dans cinq facteurs interdépendants :

- **La demande de services**, soit le degré d'adoption de l'IA et son intensité d'utilisation dans différents secteurs.
- **L'efficacité énergétique de l'informatique**, soit le nombre de calculs pouvant être générés par kWh d'électricité consommée, qui dépend du matériel, des logiciels et de l'architecture des modèles.
- **Les technologies de refroidissement et d'alimentation électrique**, qui déterminent l'énergie nécessaire pour refroidir les ordinateurs et faire fonctionner les centres de données, souvent appelée « consommation énergétique des infrastructures ».
- **Les contraintes de déploiement**, c'est-à-dire les goulots d'étranglement physiques ou logistiques qui affectent le rythme et l'ampleur de l'expansion de l'IA et des infrastructures énergétiques.
- **Les politiques publiques**, comme les règles, les réglementations et subventions gouvernementales limitant les choix en matière de conception, de construction et d'exploitation des centres de données.

a. Demande de services. L'impact énergétique de l'IA dépendra de l'ampleur de son adoption dans l'économie, qui peut varier selon les scénarios. Il est donc nécessaire d'envisager aussi bien un déploiement massif qu'une croissance plus modérée de ses usages pour évaluer ses effets futurs sur l'énergie¹¹.

Les projections de l'industrie concernant la demande en matière de calculs IA sont ambitieuses, mais leur réalisation dépendra de la capacité des entreprises à générer des retours sur investissement importants dans ce domaine et à répondre de manière adéquate aux préoccupations des utilisateurs concernant la précision et la fiabilité de ces calculs^{12,13,14}. La trajectoire de l'IA pourrait également être affectée par de nouvelles technologies (par exemple DeepSeek) qui offrent des services similaires à des coûts d'entraînement bien inférieurs¹⁵. Elle pourrait aussi être influencée par une redéfinition du service fourni, passant d'un entraînement à grande échelle reposant sur des systèmes informatiques de plus en plus puissants à des modèles plus petits, des ensembles de données restreints, des modèles de raisonnement et des cas d'utilisation plus limités. Enfin, à mesure que l'IA passe de la phase d'entraînement (qui consomme beaucoup d'énergie) à la phase de déploiement ou d'inférence, sa manière de consommer changera également, ce qui pourrait répartir la demande énergétique sur un plus grand nombre de sites et d'appareils.

b. Efficacité énergétique de l'informatique. Historiquement, la demande croissante de services informatiques a été partiellement ou largement compensée par des gains d'efficacité¹⁶. Au début du boom de l'IA, l'efficacité n'était pas une priorité : les entreprises achetaient le matériel informatique disponible, sans se soucier de son efficacité. Lorsque les contraintes liées au déploiement de l'IA sont apparues, le secteur a commencé à se concentrer sur l'efficacité comme moyen de les alléger¹⁷.

Entre 2000 et 2005, la consommation électrique des centres de données a presque doublé, ce qui a stimulé les efforts d'efficacité¹⁸, ce qui a renforcé l'attention portée à l'efficacité. Ces efforts ont ralenti la croissance jusqu'en 2010, puis celle-ci est restée faible jusqu'en 2018¹⁹. On ne sait pas encore dans quelle mesure les gains d'efficacité à venir sur l'énergie compenseront l'augmentation de la consommation liée à l'essor de l'IA.

Pour les systèmes d'IA, l'efficacité est un sujet complexe. Historiquement, les modèles ont amélioré leurs performances grâce à un changement d'échelle des données traitées^{20,21}, menant les modèles entraînés sur davantage de données à surpasser les anciens modèles. Les chercheurs en IA ont souvent réinvesti les gains d'efficacité dans l'entraînement de modèles encore plus grands, augmentant ainsi la consommation d'électricité²². Cette tendance s'est maintenue lors de la dernière explosion du développement de l'IA²³.

Dans l'ensemble, les coûts et les bénéfices n'ont pas été pris en compte dans ces efforts d'entraînement, sauf au sens strict où les entreprises qui ont construit ces grands modèles ont vraisemblablement respecté les budgets qu'elles avaient fixés pour ces projets. À terme, ce sont la valeur commerciale et la viabilité économique, plutôt que les seules performances, qui détermineront les futurs déploiements de l'IA, et c'est le marché qui tranchera selon la volonté des utilisateurs de payer pour les services d'IA et les coûts associés à leur mise en œuvre.

Quel est le potentiel d'amélioration de l'efficacité informatique ? La plupart des gens connaissent la « loi de Moore », la tendance à la miniaturisation des transistors combinée à des changements architecturaux^{24,25} qui a entraîné pendant des décennies des améliorations rapides et constantes des performances et de l'efficacité²⁶. Avant 2000, l'efficacité énergétique informatique à puissance maximale doublait tous les 1,6 ans environ¹⁶, puis le rythme a ralenti pour atteindre un doublement tous les 2,6 ans²⁷.



La miniaturisation des transistors n'étant plus suffisante, le secteur s'est tourné vers des innovations dans d'autres domaines. Leiserson et ses collègues²⁸ ont identifié des moyens permettant à l'industrie de continuer à améliorer les performances et l'efficacité grâce à des changements dans l'architecture matérielle, de créer de meilleurs logiciels et algorithmes, et enfin d'effectuer des calculs à usage spécifique, tels que la conception couplée de matériel et de logiciels. Le potentiel d'amélioration de l'efficacité de l'IA est énorme : la technologie actuelle est loin d'avoir atteint les limites physiques de l'informatique. Les entreprises devront sans doute repenser la technologie informatique à partir des principes fondamentaux à mesure qu'elles approcheront de ces limites dans les décennies à venir²⁹.

Contrairement au « paradoxe de Jevons »³⁰, la demande croissante pour les services d'IA dépasse les gains d'efficacité, grâce à l'amélioration énergétique et au développement rapide de cette technologie.

c. Technologies de refroidissement et d'alimentation électrique.

L'efficacité et la consommation d'eau des équipements utilisés pour refroidir et alimenter les centres de données varient considérablement, et l'évolution des caractéristiques et de l'utilisation de ces technologies au fil du temps peut avoir un effet significatif sur la consommation d'énergie de ces installations^{31, 32, 33}.

d. Contraintes de déploiement.

La capacité à répondre à la demande croissante de services peut être limitée par des contraintes liées à la chaîne d'approvisionnement dans la production et le déploiement des nœuds d'IA et des équipements de soutien. Au début du récent boom de l'IA, les gens ont acheté autant de nodes (une unité essentielle à plusieurs structures de données et modèles computationnels) que NVIDIA pouvait en produire, provoquant des pénuries qui pourraient persister si la demande continue de croître rapidement. Il existe également des contraintes sur les systèmes physiques, tels que les générateurs électriques de secours pour les centres de données, qui pourraient ralentir le déploiement de l'IA. Si la croissance de la demande se modère, ces problèmes deviendront moins urgents. Lorsque le développement des nouvelles technologies est rapide, il est susceptible d'influencer le rythme auquel ces technologies peuvent être déployées³⁴.

e. Politiques publiques. Les changements de politique peuvent également avoir un impact sur l'évolution des centres de données dans les années à venir⁴, bien qu'elles se soient jusqu'à présent principalement limitées à définir des objectifs d'efficacité, à promouvoir des systèmes d'alimentation performants et à suivre des indicateurs de durabilité³⁵. La difficulté d'évaluer l'efficacité informatique dans divers centres de données a limité les travaux sur le volet calcul de l'équation. Une attention croissante est accordée à la conception des tarifs des services publics, à la répartition des coûts et aux incitations liées aux centres de données, car ces installations contribuent de manière importante à la croissance de la demande dans certains pays et certaines régions^{36, 37}.

Incertitudes pour l'avenir

L'interaction entre les cinq facteurs évoqués dans la section précédente crée une grande incertitude quant au rythme et à l'ampleur du développement de l'IA. La demande de services pourrait exploser si les entreprises constatent des retours sur investissement importants dans l'IA, ou au contraire se stabiliser si les questions de coût, de performance et de fiabilité freinent son adoption.

L'augmentation du calcul d'inférence pourrait répartir la consommation d'énergie et réduire la pression sur les centres informatiques centralisés. Des gains d'efficacité restent possibles grâce à l'amélioration des processeurs et logiciels, mais ils pourraient ne pas compenser la croissance de la demande. Les tendances passées, telles que la loi de Moore, montrent que des progrès rapides sont envisageables, mais les améliorations futures dépendront de percées à plusieurs niveaux de la pile informatique.

De nombreuses projections concernant la consommation électrique des centres de données informatiques indiquent une croissance rapide et continue, qui devrait doubler ou tripler au cours des cinq à dix prochaines années^{4, 32, 38}. Toutes ces projections (même celles qui prévoient une croissance plus modeste) doivent être considérées avec prudence, compte tenu des incertitudes sous-jacentes et de la rapidité avec laquelle les choses évoluent dans ce secteur.

La profonde incertitude liée à la demande future en électricité des centres de données informatiques renforce l'importance des approches basées sur des scénarios^{39, 40, 41, 42}. Plutôt que de prédire un avenir unique, l'analyse par scénarios explore un éventail de résultats possibles, influencés par des dynamiques technologiques, économiques, politiques et comportementales, afin d'anticiper à la fois les opportunités et les risques. Les scénarios aident ainsi à tester les hypothèses,

à identifier des stratégies résilientes et à évaluer les impacts potentiels de l'IA sur la décarbonation ou la dépendance aux combustibles fossiles¹¹.

Des scénarios bien conçus doivent refléter l'ensemble des incertitudes, y compris les taux d'adoption futurs, l'intensité des émissions des réseaux électriques, les réponses réglementaires et les éventuels effets de rebond. Comme dans la finance ou la planification climatique, les scénarios permettent de tester les hypothèses, d'identifier des stratégies résilientes et d'anticiper les

risques, qu'ils soient favorables ou défavorables.

Effets potentiels de la croissance de l'IA sur les émissions

Pour comprendre l'impact climatique de l'IA, il faut avoir une vision intégrale de son fonctionnement, de ses applications dans le secteur de l'énergie et de ses effets interactifs et systémiques. Les changements dans la consommation d'énergie sont une clé de l'évolution des émissions, mais d'autres effets doivent également être pris en compte.

Bien que la consommation énergétique directe liée aux opérations d'IA (entraînement et inférence) reste encore limitée à l'échelle mondiale, elle devrait croître rapidement avec l'essor des centres de données^{2, 4, 38}. Son impact futur sur les émissions dépendra de l'évolution de la demande, des gains d'efficacité et du rythme de décarbonation des réseaux.

Les applications de l'IA dans le système énergétique et économique peuvent avoir des effets climatiques majeurs, dans un contexte de demande mondiale d'électricité en forte croissance¹⁰. L'IA et les centres de données ne contribuent pas seuls à cette croissance, mais leur impact local peut être significatif, en particulier dans les zones où les infrastructures énergétiques sont déjà sous pression.

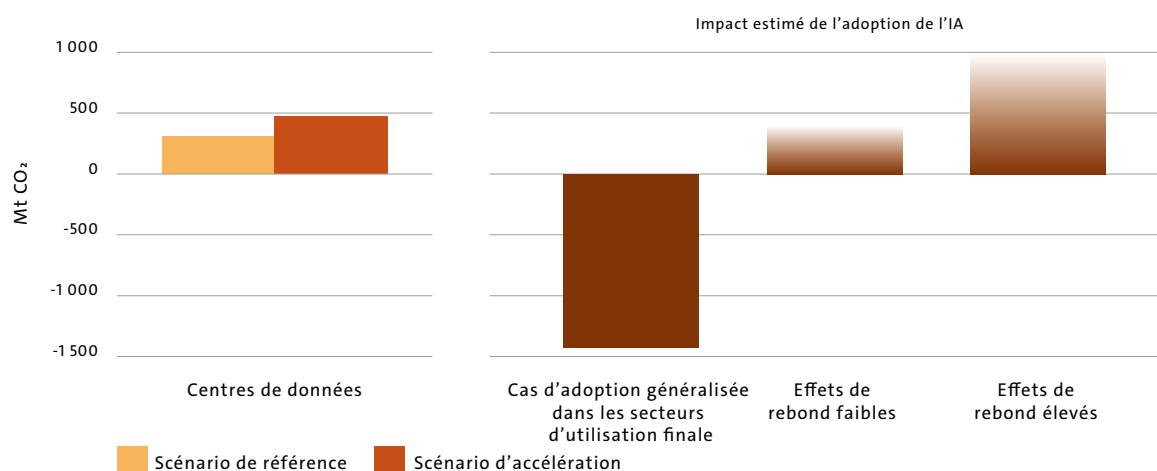
Le rapport 2025 de l'AIE sur l'énergie et l'IA souligne l'intérêt de scénarios holistiques pour évaluer l'impact climatique de l'IA⁴. Comme le montre la figure 3, si la consommation énergétique des centres de données et de l'IA peut accroître les émissions, celles-ci pourraient être compensées par l'usage de l'IA au service de la décarbonation. Cependant, dans des scénarios à fort effet rebond – où les gains d'efficacité liés à l'IA entraînent une augmentation de la consommation – ces bénéfices pourraient partiellement être annulés.

Il est nécessaire d'aller au-delà des réflexions théoriques en développant des cas tests, des analyses quantitatives¹ et des scénarios afin d'identifier les trajectoires clés et d'orienter l'IA vers des usages favorisant la réduction des émissions nettes.

Malgré de fortes incertitudes, l'AIE souligne que l'impact climatique de l'IA dépend largement des systèmes énergétiques et économiques dans lesquels elle s'inscrit, notamment de la décarbonation des réseaux, des usages sectoriels, des effets de rebond et de la capacité des infrastructures.

Atteindre les objectifs climatiques nécessite ainsi, au-delà du suivi de la consommation électrique, une gouvernance réfléchie, des investissements tournés vers l'avenir, une compréhension des tendances en matière d'intensité des émissions au fil du temps, et le recours à des analyses par scénarios qui nous aident à nous préparer à un éventail d'avenirs possibles.

Figure 3 : Évolution prévue des émissions directes des centres de données informatiques d'ici 2035 dans deux scénarios illustratifs, ainsi qu'une analyse exploratoire des effets de l'IA sur les émissions dans d'autres secteurs



Source : Adapté à partir de AIE (2025)⁴.

Conclusion

Les implications de l'IA sur l'énergie et le climat restent très incertaines, en particulier au-delà des 5 à 10 prochaines années. Si l'attention se concentre principalement sur l'énergie utilisée pour entraîner et faire fonctionner les modèles, les impacts liés à la manière dont l'IA est appliquée dans les différents systèmes énergétiques et dont elle induit des changements sociaux et économiques plus larges sont tout aussi importants – et potentiellement beaucoup plus significatifs que les effets directs. Ces impacts peuvent entraîner soit une augmentation, soit une diminution nette de la consommation d'énergie et des émissions. Parallèlement, la technologie elle-même évolue rapidement, ce

qui ajoute encore à l'imprévisibilité. Les scénarios deviennent alors des outils essentiels pour explorer ce paysage en mutation et comprendre comment l'expansion de l'IA pourrait influencer les systèmes énergétiques, les émissions et les objectifs climatiques.

Remerciements

J.K. tient à remercier Microsoft pour son soutien financier à la rédaction de cet article. E.M. remercie la Mellichamp Academic Initiative in Sustainability de l'université de Californie à Santa Barbara pour son financement. Les auteurs remercient également Amy Lynd Luers de Microsoft et Nuoai Lei d'Amazon pour leurs suggestions substantielles.

À propos des auteurs

Jonathan Koomey est chercheur, auteur et entrepreneur. Ses travaux portent sur les solutions climatiques, les compétences en pensée critique ainsi que les impacts énergétiques et environnementaux des technologies de l'information. Il est titulaire d'un master (M.S.) et d'un doctorat (Ph.D.) du *Energy and Resources Group* de l'Université de Californie, Berkeley, ainsi que d'un A.B. in *History and Science* de l'Université Harvard. Il a enseigné à l'Université Stanford, à l'Université Yale et à l'Université de Californie, Berkeley, et a travaillé pendant près de vingt ans comme chercheur au Lawrence Berkeley National Laboratory. Jonathan Koomey est l'auteur ou le coauteur de dix ouvrages et de plus de 200 articles et rapports.

Eric Masanet est titulaire de la *Mellichamp Chair in Sustainability Science for Emerging Technologies* à l'Université de Californie, Santa Barbara. Depuis vingt ans, il étudie les impacts de durabilité des centres de données et des systèmes industriels, et a (co)signé à ce jour 175 publications sur ces sujets. Il a également occupé plusieurs fonctions clés dans l'élaboration des politiques énergétiques, notamment : chef de l'unité *Energy Demand Technology* à l'Agence internationale de l'énergie, auteur principal des sixième et septième rapports d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), auteur des cinquième et sixième *U.S. National Climate Assessments*, conseiller industriel principal au Département de l'Énergie des États-Unis, et consultant auprès du Bureau de la politique scientifique et technologique de la Maison-Blanche. Il est titulaire d'un doctorat en génie mécanique de l'Université de Californie, Berkeley.



IA et eau

Vers un avenir numérique durable

Ana Pinheiro Privette

Université de l'Illinois, Urbana-Champaign

Alors que l'intelligence artificielle (IA) occupe une place croissante dans les services publics, son empreinte hydrique demeure largement sous-estimée. Cet article analyse la consommation d'eau de l'IA à travers le fonctionnement des centres de données, en distinguant la consommation directe liée au refroidissement, la consommation indirecte associée à la production d'électricité et l'eau indirecte incorporée dans la fabrication des équipements informatiques.

Bien que la consommation globale d'eau des centres de données reste inférieure à celle de secteurs majeurs, leur croissance rapide et leurs impacts locaux peuvent accentuer le stress hydrique, en particulier dans les régions déjà vulnérables, et générer des conflits d'usage avec les autres besoins économiques et résidentiels. L'article souligne ainsi la nécessité d'aligner le développement de l'IA avec la planification territoriale des ressources en eau et les politiques environnementales.

Il identifie les principaux freins technologiques et propose des leviers d'action pour un déploiement de l'IA plus sobre en eau : innovations en matière de refroidissement et d'efficacité énergétique, pratiques de gestion circulaire de l'eau, meilleure intégration des centres de données dans la gouvernance locale de l'eau et renforcement de la transparence via des rapports standardisés. L'article plaide enfin pour une approche multidisciplinaire afin de concilier innovation numérique et sécurité hydrique à long terme.

Introduction

L'IA est de plus en plus essentielle aux services environnementaux. Les capteurs IoT (*Internet of Things*) alimentés par l'IA aident les services publics à détecter les fuites et les utilisations anormales en temps réel¹. Ces capteurs permettent de réduire les pertes d'eau et d'améliorer les prévisions de la demande en intégrant les données météorologiques, de consommation et socio-économiques². L'IA améliore l'efficacité du traitement de l'eau en optimisant l'utilisation des produits chimiques et de l'énergie tout en maintenant la qualité de traitement³. Dans l'agriculture, l'IA permet une irrigation de précision, réduisant considérablement la consommation d'eau sans diminuer les rendements⁴.

En outre, l'IA renforce la prévision des inondations en analysant en temps réel les images satellites, les modèles météorologiques et les données hydrologiques⁵.

Cependant, à mesure que les systèmes d'IA continuent de se multiplier, leur impact environnemental suscite de plus en plus d'inquiétudes. Si la consommation d'énergie a traditionnellement dominé les discussions environnementales autour de l'IA, son empreinte hydrique apparaît désormais comme une dimension importante de sa potentielle durabilité. Le changement climatique rendant l'approvisionnement en eau de plus en plus imprévisible, la gestion des systèmes hydriques devient plus difficile, ce qui renforce la nécessité de comprendre et de réduire l'empreinte hydrique locale de l'IA afin de soutenir la résilience à long terme des systèmes numériques et naturels.

Cet article examine les implications hydriques des opérations d'IA tout au long de leur cycle de vie et à plusieurs échelles. Il présente un cadre permettant d'intégrer une planification soucieuse de la consommation d'eau dans le développement et le déploiement de ces systèmes. L'analyse met l'accent sur le rôle essentiel des technologies de refroidissement, des sources d'énergie, de la transparence des données et des stratégies de gestion de l'eau, tout en préconisant une innovation durable dans la conception et le fonctionnement de l'IA. Enfin, l'article présente une méthode de mesure, de gestion et de réduction de l'empreinte hydrique de l'IA et des centres de données.

L'empreinte hydrique des centres de données

Les processus d'IA dépendent de serveurs hautement performants, hébergés dans des centres de données, qui consomment de grandes quantités d'électricité et génèrent des quantités importantes de chaleur. Pour éviter la surchauffe des serveurs, de nombreuses installations utilisent des systèmes de refroidissement à forte consommation d'eau pour dissiper la chaleur. Bien que l'IA ne représente actuellement qu'une petite partie (~15 %) de la consommation électrique des centres



Tour de refroidissement.

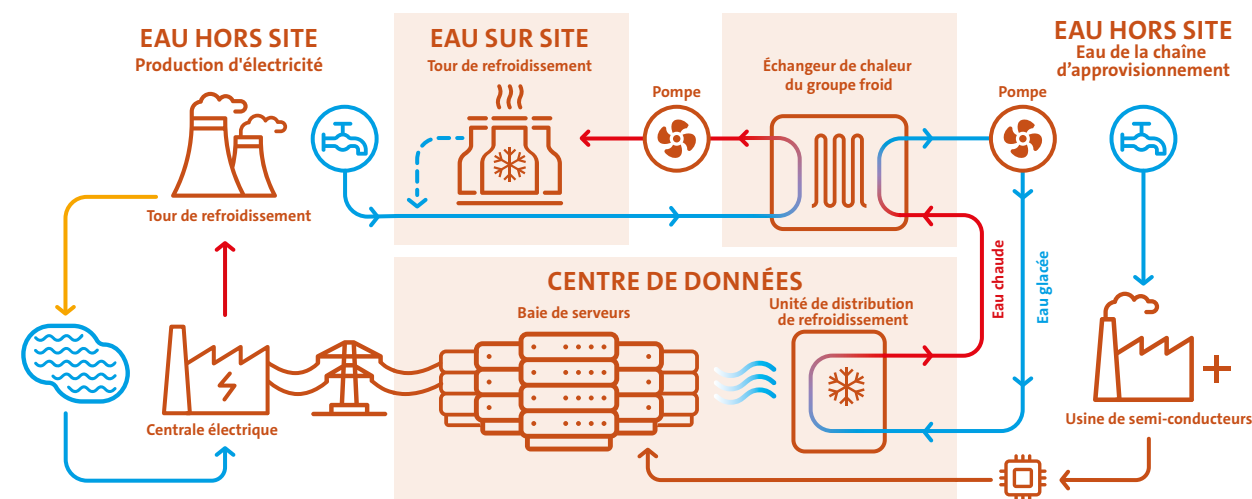
de données⁶, elle connaît la croissance la plus rapide⁷ et devrait représenter 27 % de leur consommation énergétique d'ici 2027⁸. Pour évaluer l'empreinte hydrique de l'IA, nous étudions la consommation d'eau des centres de données comme indicateur, compte tenu de la disponibilité limitée des données spécifiques à l'IA et du lien intrinsèque entre les charges de travail de l'IA et les opérations des centres de données⁹.

Lors du suivi des empreintes hydriques, il est important de faire la distinction entre l'utilisation de l'eau, les prélèvements d'eau et la consommation d'eau. Dans cet article, nous utilisons le terme *utilisation de l'eau* comme terme générique pour désigner toutes les façons dont l'eau est utilisée dans une activité ou un système, mais nous distinguons deux quantités spécifiques : *les prélèvements d'eau*, c'est-à-dire les volumes prélevés d'une source (rivière, lac ou aquifère) pour répondre à un besoin, dont

une partie retourne dans le milieu naturel sous forme d'effluent ou de purge de système de refroidissement, et *la consommation d'eau* (épuisement), c'est-à-dire la part de l'eau prélevée qui est effectivement retirée du bassin local dans un délai, un lieu ou une qualité utilisables (par exemple, par évaporation, incorporation dans des produits ou rejet dans un autre bassin versant). Cette distinction est importante : le dimensionnement des infrastructures et les permis sont déterminés par les prélèvements, tandis que la disponibilité écologique et la résilience à la sécheresse dépendent de la consommation, car l'eau consommée n'est pas facilement accessible à d'autres utilisateurs ou écosystèmes.

En outre, l'utilisation de l'eau par les centres de données se fait à plusieurs niveaux, notamment la consommation directe et indirecte d'eau (Figure 1) :

Figure 1 : Utilisation directe et indirecte de l'eau dans les centres de données



Source: Adapted from Pengfei Li, Jianyi Yang, Mohammad A. Islam, and Shaolei Ren (2025).

• **Utilisation directe de l'eau pour le refroidissement des centres de données :** la principale source d'utilisation directe de l'eau liée à l'IA est le refroidissement des centres de données. Les approches de refroidissement varient considérablement, et les méthodes reposant sur des liquides – notamment les systèmes à eau glacée, le refroidissement direct des composants et le refroidissement par immersion – sont de plus en plus déployées pour répondre aux besoins de charges de travail à haute densité. Parmi ces solutions, les systèmes à eau glacée demeurent les plus largement utilisés, en particulier dans les centres de données de grande dimension et les centres de données d'entreprise, en raison de leur efficacité énergétique relative, de leur maturité technologique et de leur flexibilité opérationnelle. Cette approche peut nécessiter des quantités d'eau importantes. Des techniques telles que le refroidissement par évaporation et les récupérateurs d'air tirent parti des conditions ambiantes pour réduire la consommation d'énergie, et les systèmes hybrides combinent l'eau glacée avec des moyens de refroidissement sec ou adiabatique⁹ afin d'optimiser à la fois l'efficacité hydrique et énergétique.

L'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE), mesurée en litres par kilowattheure (L/kWh), est un indicateur standard permettant de mesurer l'efficacité hydrique des centres de données. Alors que la WUE moyenne des centres de données est d'environ 1,8 L/kWh¹⁰, certaines installations de grande taille ont atteint un niveau aussi bas que 0,19 L/kWh grâce à des stratégies de refroidissement à haute efficacité¹¹. Étant donné que la WUE varie selon les lieux et les périodes, le choix stratégique du moment et de l'endroit où entraîner de grands modèles d'IA peut réduire considérablement leur empreinte hydrique. Le

choix du système de refroidissement est influencé par le climat, la taille de l'installation, la densité de calcul, la réglementation et des considérations environnementales et financières.

• **Utilisation indirecte de l'eau pour la production d'énergie :** outre le refroidissement, les centres de données entraînent également une utilisation indirecte importante de l'eau pour la production d'électricité, principalement à partir de sources thermoélectriques et hydroélectriques. Selon l'US Geological Survey, l'énergie thermoélectrique représente environ 40 % des prélèvements nationaux d'eau douce¹². Une étude de l'Agence internationale de l'énergie (AIE)⁶ a révélé que la production d'électricité est souvent le principal facteur contribuant à l'empreinte hydrique d'un centre de données (figure 2), puisqu'environ deux tiers de la consommation totale d'eau sont liés à l'alimentation électrique et seulement un quart au refroidissement direct.

Les choix des technologies de refroidissement et des sources d'énergie ont des implications majeures en termes d'eau et d'énergie, en particulier dans les régions soumises à un stress hydrique. Ces choix impliquent souvent des compromis : les systèmes de refroidissement par évaporation réduisent la consommation d'énergie, mais augmentent la demande en eau, tandis que les systèmes refroidis par air utilisent moins d'eau sur place, mais peuvent encore dépendre de sources d'énergie gourmandes en eau.

• **Eau indirecte intégrée dans la chaîne d'approvisionnement :** outre l'eau utilisée pour la production d'électricité, les centres de données contribuent également à la consommation indirecte d'eau par le biais de l'eau incorporée, c'est-à-dire l'eau nécessaire

à la fabrication des serveurs et à la construction des installations. Les installations de semi-conducteurs, en particulier, sont très coûteuses en eau, certaines consommant des quantités importantes d'eau ultra-pure chaque jour. Par exemple, l'installation de TSMC au nord de Phoenix devrait consommer plus de 17 millions de gallons (64,3 millions de litres) d'eau par jour, une quantité qui pourrait alimenter environ 57 000 foyers¹³. Si l'impact environnemental local de cette fabrication peut être considérable dans les régions qui accueillent ces installations, il ne représente qu'une part relativement faible de l'empreinte hydrique globale d'un seul centre de données. Selon l'étude de l'AIE⁶ mentionnée précédemment, seuls environ 8 % de la consommation totale d'eau des centres de données sont attribués à la production de semi-conducteurs et de microprocesseurs.

Les impacts de l'eau à différentes échelles

Lorsqu'on examine spécifiquement l'empreinte hydrique de l'IA, les données restent limitées, ce qui rend difficile l'évaluation complète des besoins en eau pour l'entraînement et l'inférence des modèles ou leur impact plus large sur les ressources en eau. Néanmoins, les études existantes offrent quelques indications. Par exemple, une étude indique que la puissance informatique nécessaire pour former un modèle de grande taille comme GPT-3 consommerait environ 185 000 gallons (700 000 litres) d'eau directe (sur site) et 1,2 million de gallons (4,7 millions de litres) d'eau indirecte (liée à la production d'énergie)⁹. Du côté de l'inférence, l'impact environnemental par requête est plus faible, mais reste mesurable et, à l'échelle de la durée de vie d'un modèle, peut représenter des quantités d'eau substantielles. On estime que chaque requête GPT-3 consomme directement environ 65 millilitres d'eau et 435 millilitres d'eau indirecte, soit un total de 500 millilitres (0,132 gallon)¹⁴.

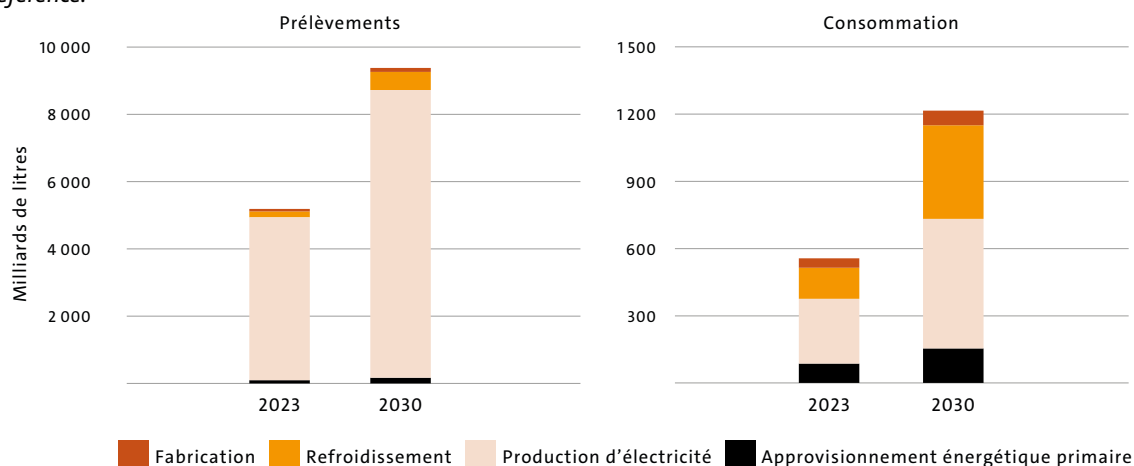
Afin d'évaluer plus en détail l'empreinte hydrique de l'IA et ses implications plus larges, examinons de plus près l'empreinte hydrique des centres de données, compte tenu de la disponibilité de données supplémentaires et de leur lien inextricable avec les opérations d'IA. Dans le contexte des centres de données, il est important de distinguer l'utilisation de l'eau (prélèvement) de la consommation d'eau. L'utilisation de l'eau désigne le volume total d'eau prélevé ou mobilisé par une installation. Cette eau n'est pas intégralement perdue, puisqu'une partie peut être rejetée dans le milieu. À l'inverse, la consommation d'eau correspond à la part de l'eau qui est définitivement soustraite au système local et n'est plus disponible pour un usage ultérieur – principalement en raison de l'évaporation lors des processus de refroidissement. Au niveau mondial, l'empreinte hydrique des centres de données est en augmentation, mais reste modeste par rapport à celle des secteurs à forte consommation, comme l'agriculture, l'industrie

manufacturière et la production d'énergie. L'AIE⁶ estime que la consommation mondiale d'eau des centres de données, tant directe qu'indirecte, est actuellement d'environ 148 milliards de gallons (560 milliards de litres) par an, et qu'elle pourrait atteindre environ 317 milliards de gallons (1 200 milliards de litres) par an en 2030. Les prélèvements mondiaux actuels d'eau pour les centres de données, estimés à plus de 2,3 billions de gallons (plus de 9 billions de litres) par an, affichent une augmentation similaire d'ici 2030 (Figure 2).

Ces quantités d'eau utilisées, bien que significatives, ne représentent qu'une fraction de celles des autres industries. L'agriculture domine la consommation mondiale d'eau, représentant environ 70 % de tous les prélèvements, principalement pour l'irrigation et l'élevage. Chaque année, ce secteur consomme environ 2 500 à 3 100 billions de litres d'eau à l'échelle mondiale¹⁵. La production d'un kilogramme de bœuf, par exemple, nécessite environ 15 000 litres d'eau¹⁶. On estime que l'industrie textile consomme plus de 79 000 milliards de litres d'eau par an¹⁷. Le secteur mondial de l'énergie est un consommateur important d'eau douce, représentant environ 10 % du total des prélèvements mondiaux d'eau douce. En 2021, le système énergétique mondial a utilisé environ 370 000 milliards de litres d'eau douce¹⁸.

Si la consommation mondiale d'eau des centres de données reste relativement modeste par rapport à d'autres secteurs, leur impact local est plus préoccupant. L'expansion rapide et incertaine de ces installations risque de mettre les réseaux d'approvisionnement en eau des communautés à rude épreuve, en particulier dans les régions arides ou soumises à un stress hydrique, où la pression sur des ressources limitées est déjà forte. Aux États-Unis, où plus de 5 400 centres de données sont en activité, environ 20 % devraient prélever de l'eau dans des bassins versants soumis à un stress modéré à élevé dans l'ouest du pays¹⁹. Les estimations suggèrent qu'ils consomment environ 0,3 % de l'approvisionnement public total en eau des États-Unis continentaux²⁰. Pourtant, ces installations peuvent exercer une pression considérable sur les réseaux d'approvisionnement en eau des communautés locales qui les accueillent. Par exemple, à The Dalles, dans l'Oregon, un centre de données Google a prélevé en 2021 plus de 355 millions de gallons (1,34 milliard de litres), soit environ 29 % de la demande totale en eau de la ville cette année-là²¹. Bon nombre de ces installations utilisent l'eau potable municipale pour leur refroidissement, entrant ainsi en compétition directe avec les besoins des ménages et d'autres industries, et ajoutant une pression supplémentaire sur les réseaux d'approvisionnement en eau. Afin de répondre à la demande croissante et aux besoins futurs en eau, Google s'est engagé à investir 28,5 millions de dollars pour moderniser les infrastructures hydrauliques de The Dalles. Les grands opérateurs (par exemple, Amazon/AWS,

Figure 2 : Prélèvements et consommation d'eau mesurés (2023) et prévus (2030) par les centres de données dans le scénario de référence.



Google, Microsoft, Meta), en particulier, commencent à investir davantage dans les réseaux locaux d'approvisionnement en eau afin de garantir un accès fiable à l'eau pour soutenir leurs activités et minimiser leur impact sur les communautés locales. En outre, ils se tournent de plus en plus vers des sources recyclées ou non potables, telles que les eaux usées traitées ou les systèmes de réutilisation régionaux, afin d'être moins dépendants des réseaux municipaux.

L'un des principaux défis liés à la gestion de la consommation d'eau des centres de données réside dans leur dépendance à l'égard de réseaux municipaux vieillissants qui n'ont pas été conçus pour répondre à une demande industrielle intensive. La fragmentation de la gouvernance, les disparités régionales en matière de droits sur l'eau et l'obsolescence des infrastructures compliquent encore davantage la planification et l'intégration durable des besoins en eau des centres de données dans les infrastructures et les réseaux existants. À lui seul, le réseau d'approvisionnement en eau des États-Unis comprend près d'un million de kilomètres de canalisations, dont beaucoup sont en mauvais état, et il est géré par plus de 50 000 entreprises de services publics²². Les réseaux d'approvisionnement en eau américains perdent chaque année environ 2,46 milliards de gallons (9,3 milliards de litres) d'eau traitée en raison de fuites et de ruptures, ce qui coûte aux services publics environ 6,4 milliards de dollars américains²³.

Cette perte est bien supérieure aux 135,5 milliards de gallons (512,6 milliards de litres) consommés par les centres de données américains en 2018²⁴. L'introduction d'utilisateurs à forte demande tels que les centres de données, sans planification adéquate, risque de mettre à rude épreuve des infrastructures déjà fragiles. Dans le même temps, la détection et la réparation des fuites grâce à l'IA représentent une opportunité majeure, car une meilleure efficacité des réseaux pourrait permettre d'économiser plus d'eau que ce que les centres de données consomment actuellement, compensant ainsi potentiellement leur demande supplémentaire.

La réduction de l'empreinte hydrique directe de l'IA dépendra donc en partie de la transition des centres de données vers des technologies utilisant peu ou pas d'eau, telles que le refroidissement par air ou par immersion liquide, au détriment des systèmes de refroidissement à base d'eau. Cela permettra de réduire leur empreinte hydrique locale. En outre, l'abandon des sources d'énergie coûteuses en eau est essentiel pour réduire la consommation indirecte d'eau des centres de données. À mesure que l'adoption des énergies renouvelables continue de se développer et d'alimenter une part croissante des activités des centres de données, l'empreinte hydrique indirecte globale de l'IA devrait diminuer. Étant donné que de nombreuses sources d'énergie conventionnelles, telles que le charbon et l'énergie nucléaire, sont très gourmandes en eau, le passage à l'énergie solaire, éolienne et à d'autres alternatives à faible consommation d'eau peut réduire considérablement l'utilisation indirecte d'eau. Cependant, comme les centres de données ont besoin d'une alimentation électrique ininterrompue et hautement fiable, la transition complète vers les énergies renouvelables dépend également des progrès réalisés en matière de stockage d'énergie et de stabilité du réseau électrique. Pour permettre un fonctionnement continu sans recourir à des sources de secours chères en eau, il sera essentiel d'innover dans le domaine du stockage par batterie, des systèmes de réseaux électriques intelligents et des infrastructures hybrides renouvelables.

La nécessité de disposer de données précises sur la consommation d'eau

Comme indiqué, les données sur l'empreinte hydrique des infrastructures d'IA sont limitées et fragmentées. Mais l'AIE note que la consommation d'eau des centres de données, en particulier

pour le refroidissement et la production d'électricité, est mal surveillée et sous-estimée⁶. Une enquête réalisée en 2021 par l'Uptime Institute a révélé que seuls 51 % des opérateurs de centres de données suivent leur consommation d'eau, principalement sur des sites individuels, et que seulement 10 % le font pour l'ensemble de leurs installations²⁴. Le même rapport estime que plus de 60 % des entreprises ne voient pas l'intérêt commercial de collecter des données détaillées sur leur consommation d'eau. Lorsqu'elles le font, elles divulguent rarement des informations au niveau des installations, préférant communiquer des chiffres agrégés à l'échelle de l'entreprise, ce qui complique l'évaluation de l'intensité hydrique spécifique des opérations liées à l'IA. Si certaines entreprises ont commencé à être plus transparentes (AWS, Google et Microsoft se sont par exemple engagés à publier des données sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau), les progrès restent inégaux. Le manque de normes suffisamment précises et largement adoptées aggrave le problème.

Sans mesures cohérentes ni exigences réglementaires, il est difficile de comparer l'empreinte hydrique des différentes entreprises ou des charges de travail liées à l'IA.

La pression pour rendre publique la consommation d'eau et la réduire s'intensifie, car un nombre croissant de municipalités exigent que les nouveaux centres de données limitent leur consommation directe d'eau, voire s'en passent complètement. Les États

situés dans des régions soumises à un stress hydrique, comme l'Arizona, le Texas et la Californie, ont déjà suspendu ou restreint les nouveaux projets de centres de données en attendant la mise en place de stratégies durables en matière d'eau²⁵. Ces mesures locales pourraient annoncer le début d'un changement réglementaire plus large, à mesure que les charges de travail liées à l'IA augmentent et que la nécessité de préserver les ressources en eau locales devient plus urgente. Dans le même temps, les investisseurs et les agences de notation intègrent de plus en plus les risques liés à l'eau dans leurs barèmes ESG, ce qui accentue la pression sur les opérateurs de centres de données pour qu'ils réduisent leur dépendance à l'eau, en particulier dans les régions soumises à un stress hydrique^{26, 27}.

Plus généralement, plusieurs inconnues subsistent, ce qui complique la planification de la demande croissante en eau pour les agences locales et régionales. Les services publics prévoient généralement les besoins en eau pour les 20 à 30 prochaines années, et de nombreux actifs coûteux sont conçus pour une durée de vie de 30 à 50 ans. En revanche, les délais de planification des centres de données vont de quelques mois pour les rénovations, à environ 5 à 10 ans pour les centres de grande ampleur (*hyperscale*), ce qui crée des difficultés de planification qui compliquent le choix du dimensionnement, l'obtention des permis et le financement des infrastructures hydrauliques. Parmi les inconnues figurent le nombre de centres de données qui seront construits, leur emplacement et leur consommation d'eau moyenne et maximale. À cela s'ajoutent des incertitudes quant à l'évolution des technologies d'IA, au rythme des innovations visant à réduire la consommation d'eau des centres de données et aux éventuels changements réglementaires visant à s'éloigner des sources d'énergie gourmandes en eau. Ces incertitudes entravent la capacité à évaluer les besoins et à gérer à long terme les réseaux d'eau des communautés locales qui accueillent ces installations, limitant ainsi l'élaboration de stratégies efficaces. Cela souligne la nécessité d'aligner la croissance des centres de données avec la planification locale et régionale des ressources en eau, la politique environnementale et la résilience des infrastructures. Pour y parvenir, une plus grande transparence et des rapports standardisés sont essentiels afin de permettre une évaluation précise et une gestion proactive de l'impact des centres de données sur l'eau.

Des stratégies pour une utilisation durable de l'eau par l'IA

La réduction de l'empreinte hydrique de l'IA se heurte à toute une série d'obstacles. La plupart sont liés aux pratiques actuelles des centres de données, notamment leur forte dépendance à l'égard de sources d'énergie et de refroidissement, mais aussi à l'égard de systèmes hydrauliques et énergétiques qui ne sont pas dimensionnés pour répondre à des demandes supplémentaires, ainsi que des données limitées sur l'utilisation de l'eau. Les cadres réglementaires se concentrent souvent sur l'efficacité énergétique plutôt que sur l'impact sur l'eau, tandis que les incitations du marché pénalisent rarement la consommation élevée d'eau. En outre, de nombreux modèles d'IA ne sont pas optimisés en termes d'efficacité, et les centres de données sont souvent situés dans des régions soumises à un stress hydrique en raison de facteurs tels que les incitations fiscales ou la disponibilité de l'énergie. Ensemble, ces obstacles compliquent le développement de l'IA tout en protégeant les ressources en eau.

Pour relever ces défis, il est essentiel de mettre en place une stratégie qui favorise l'innovation technologique, renforce les pratiques de gestion des ressources en eau et améliore la transparence grâce à la publication standardisée d'indicateurs d'utilisation de l'eau. Ces indicateurs sont essentiels pour un benchmarking efficace, la production de rapports et une planification à long terme. Afin de surmonter ces obstacles, il faudra également favoriser une collaboration solide entre les secteurs public et privé afin de mieux aligner les cadres réglementaires, les priorités d'investissement et la gouvernance de l'eau. En fin de compte, ces efforts doivent être coordonnés entre toutes les parties prenantes, y compris les fournisseurs de technologies, les régulateurs et les communautés locales, afin de garantir que le développement de l'IA s'aligne sur une gestion durable de l'eau.

1. Encourager l'innovation technologique :

• **Promouvoir l'innovation et l'efficacité en matière de refroidissement :** pour soutenir le déploiement durable de l'IA, les innovations en matière de refroidissement sont essentielles, et des progrès significatifs sont déjà en cours. Le refroidissement par liquide ou direct sur puce offre des économies d'énergie et d'espace importantes par rapport aux systèmes à air traditionnels. Bien que seulement 22 % des organisations utilisent actuellement le refroidissement direct par liquide²⁸, ce processus peut réduire la consommation d'énergie de refroidissement de 30 à 50 %²⁹. Par exemple, Microsoft a lancé un nouveau modèle de centre de données qui, en adoptant des solutions de refroidissement au niveau des puces, permet un contrôle précis de la température sans évaporation d'eau, évitant ainsi la consommation de plus de 125 millions de litres d'eau par an et par centre de données³⁰. Le refroidissement par immersion, qui consiste à plonger les serveurs dans des liquides conducteurs de chaleur, a démontré une efficacité de refroidissement pouvant atteindre 96 %³¹. Les systèmes dépendants du climat, comme le refroidissement adiabatique et les récupérateurs d'air, peuvent

réduire la consommation d'énergie jusqu'à 60 %³². Les systèmes hybrides qui permettent de changer de mode de refroidissement améliorent l'efficacité énergétique et l'utilisation de l'eau. Il existe également des preuves solides indiquant que l'augmentation de la température d'entrée des serveurs (dans la pièce) – dans les limites recommandées par l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) – réduit l'énergie nécessaire au refroidissement des centres de données et, lorsque des systèmes à évaporation sont utilisés, diminue la consommation d'eau de refroidissement. Une règle empirique largement citée indique une réduction d'environ 4 à 5 % de la consommation d'énergie pour chaque augmentation de 0,5 °C de la température d'entrée des serveurs³³. En outre, l'optimisation fondée sur l'IA joue un rôle croissant dans l'efficacité des centres de données.

• **Optimisation du matériel et des logiciels :** l'optimisation des centres de données va au-delà du refroidissement, avec des gains importants en matière de durabilité grâce aux progrès réalisés dans le domaine du matériel et des logiciels d'IA. Des techniques telles que la compression et l'élagage (*pruning*) des modèles peuvent réduire la consommation de 3 à 7 fois, tout en diminuant la demande en eau liée au refroidissement³⁴. L'efficacité des logiciels a été au centre du mouvement Green AI, qui promeut des modèles alliant précision et efficacité énergétique. Quant au matériel, les puces IA personnalisées telles que les modèles 2024 de Microsoft améliorent considérablement son efficacité. L'unité de traitement des données (DPU) offre des performances 4 fois supérieures tout en consommant 3 fois moins d'énergie que le matériel précédent de Microsoft³⁵.

• **Mise en place d'exercices de benchmarking :** la mise en œuvre d'un benchmarking robuste, c'est-à-dire la mesure et la comparaison de la consommation directe et indirecte d'eau dans les modèles d'IA, le matériel, les logiciels et les environnements de centres de données, est essentielle pour promouvoir les meilleures pratiques et améliorer l'efficacité hydrique dans diverses installations et charges de travail. Il est essentiel que les rapports distinguent les prélèvements d'eau de la consommation (épouement) et quantifient la part effectivement retirée du bassin local, afin que les impacts soient évalués avec précision, et pas seulement les volumes transitant par le système. Ces efforts doivent également différencier les phases opérationnelles, telles que l'entraînement et l'inférence, et tenir compte des différents types de centres de données, y compris ceux de grande taille (*hyperscale*), edge ou colocation, ainsi que les conditions géographiques et climatiques particulières. L'analyse comparative facilite non seulement les comparaisons intersectorielles, mais encourage également la transparence et la responsabilité. L'intégration de mécanismes de retour d'information en temps réel dans les opérations permet aux gestionnaires d'installations et aux développeurs d'IA de suivre les tendances en matière de performances, d'identifier les inefficacités et de déployer des stratégies ciblées d'économie d'eau, telles que des systèmes de refroidissement optimisés par l'IA et une planification de la charge de travail qui minimise les pics de demande en eau. Ce cycle continu de mesure, d'analyse et d'amélioration favorise une culture de l'innovation.

2. Renforcer la gestion des ressources en eau

• **Aligner l'expansion des centres de données sur la planification locale et régionale :** une coordination plus étroite entre les opérations des centres de données et la gestion locale et régionale de l'eau est essentielle. Un récent rapport d'atelier des Académies nationales américaines³⁶ met en garde contre le fait que les centres de données s'étendent dans des régions soumises à un stress hydrique sans planification suffisante, ce qui augmente les risques environnementaux. Pour remédier à cela, les objectifs de durabilité des centres de données doivent être alignés sur la planification locale et régionale grâce à une approche considérant l'eau comme une ressource interconnectée à travers les secteurs et les niveaux d'échelles. Exiger une étude d'impact environnemental (EIE) pour les nouveaux centres



La production d'électricité est l'un des secteurs qui consomme le plus d'eau.



de données, détaillant les prélèvements d'eau prévus, la consommation (par exemple, les pertes par évaporation), les rejets et la demande énergétique pendant la durée de vie de l'installation, favoriserait un développement plus transparent et durable. La directive européenne sur l'évaluation des incidences sur l'environnement (EIE) exige des évaluations environnementales pour les grands projets industriels susceptibles d'avoir un impact significatif sur l'environnement, ce qui peut inclure les centres de données, en particulier les installations *hyperscale* à forte demande en eau et en énergie. Cependant, aux États-Unis, l'EIE n'est déclenchée que si une agence fédérale est impliquée (par exemple, terrain fédéral, financement fédéral ou permis fédéral). La plupart des centres de données situés sur des terrains privés sont exemptés de cette obligation. Certains États (par exemple, la Californie, New York) ont des exigences en matière d'évaluation environnementale, mais la plupart des États ont des exigences faibles ou inexistantes avant l'approbation de tels projets. Une adoption plus large de l'EIE ou d'évaluations similaires peut mieux soutenir la planification intégrée des infrastructures et contribuer à atténuer l'empreinte hydrique croissante de l'IA.

L'un des principaux défis de la gestion de la consommation d'eau des centres de données réside dans leur dépendance à l'égard de réseaux municipaux vieillissants qui n'ont pas été conçus pour répondre à une demande intensive

- **Adopter les principes de l'économie circulaire de l'eau :** l'adoption d'une économie circulaire de l'eau est essentielle pour réduire la consommation d'eau douce dans les centres de données. Les stratégies clés comprennent le refroidissement en circuit fermé, la réutilisation des eaux usées et la récupération des eaux de pluie³⁷. Microsoft utilise des systèmes « zéro évaporation d'eau » à Phoenix et dans le Wisconsin, tandis que le site de Google en Géorgie recycle les eaux usées traitées sur place. À Quincy, dans l'État de Washington, un centre de données Microsoft recycle l'eau traitée, réduisant ainsi la dépendance à l'égard des eaux souterraines potables locales. En Irlande, les centres de données de grande taille exploités par AWS et Microsoft utilisent des systèmes de récupération des eaux de pluie pour compenser les besoins en eau de refroidissement et autres besoins en eau non potable. Cette source sur site réduit les prélèvements municipaux et atténue la pression sur les ressources locales.

3. Améliorer la transparence grâce à une publication des données standardisées

- **Normaliser les indicateurs de suivi de la consommation d'eau :** pour réduire efficacement l'empreinte hydrique de l'IA, il est nécessaire de développer, de suivre de manière cohérente et de publier en toute transparence des indicateurs de performance clés (KPI) qui tiennent compte à la fois des opérations des centres de données et des charges de travail spécifiques à l'IA. Il est tout aussi important d'établir une distinction claire entre l'utilisation directe de l'eau (par exemple, pour le refroidissement, avec des impacts locaux immédiats) et l'utilisation indirecte de l'eau (par exemple, par le biais de la production d'électricité ou des chaînes d'approvisionnement), car chacune a des implications différentes en matière de gestion et de limitation. Pour l'utilisation directe de l'eau, des indicateurs clés tels que l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE), l'utilisation directe totale de l'eau (le volume total d'eau consommé sur site) et l'efficacité du système de refroidissement (par exemple, litres par tonne-heure de refroidissement) fournissent une base de référence au niveau des installations. Il est tout aussi important de suivre les pertes d'eau de refroidissement, notamment l'évaporation, la dérive et la purge, ainsi que de documenter la source de l'eau utilisée (potable, recyclée ou douce). Ensemble, ces indicateurs sont essentiels pour évaluer à la fois l'efficacité opérationnelle et les impacts plus larges des centres de données sur la durabilité. Les indicateurs indirects (hors site) utiles pour mesurer l'utilisation/la consommation d'eau peuvent inclure l'intensité électrique-eau de la source d'énergie (consommation d'eau par MWh

pour le mix électrique alimentant le centre de données) et l'eau incorporée dans le matériel (eau utilisée dans la fabrication et le transport des serveurs, des puces et des infrastructures de refroidissement). Bien que ces indicateurs soient utiles au niveau des installations, ils manquent généralement de détails nécessaires au niveau des modèles pour comprendre l'impact réel de l'IA sur les ressources en eau. Les décomposer en indicateurs plus précis, tels que les litres d'eau utilisés par session d'entraînement d'IA, par tâche d'inférence, par GPU-heure ou par téraflopp, permettrait des comparaisons significatives entre les modèles et les plateformes d'IA. Les normes existantes telles qu'ISO 14046:2014 et les normes émergentes telles que IEEE SA peuvent fournir des orientations de départ. Pour permettre un niveau de précision plus élevé, les centres de données doivent utiliser des systèmes de gestion des bâtiments (BMS) et des systèmes de surveillance environnementale (EMS) avec des instruments spécifiques à l'eau tels que des compteurs intelligents, des capteurs de débit et des plateformes de contrôle de supervision et d'acquisition de données (SCADA).

- **Encourager la transparence des rapports :** plusieurs exploitants de centres de données ont commencé à rendre compte de leur consommation d'eau, principalement sous forme agrégée et parfois au niveau régional/local. Des rapports récurrents sont essentiels à la gestion de l'empreinte hydrique de l'IA. Dans la mesure du possible, les rapports doivent faire la distinction entre les prélèvements d'eau et la consommation d'eau afin de mieux comprendre l'impact réel sur les systèmes hydriques locaux. Bien que peu d'entre eux soient spécifiques à l'IA, des outils tels que le questionnaire CDP Water, les normes GRI 303 et le Water Footprint Network fournissent des bases solides pour suivre et rendre publics les risques, l'utilisation et les impacts liés à l'eau. Des organisations telles que la Green Software Foundation militent en faveur d'une transparence plus poussée, fondée sur l'étude du cycle de vie, incluant donc la consommation d'eau. Des initiatives plus larges, comme la CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) et la TNFD (Task Force on Climate-Related Financial Disclosures) militent également en faveur de la transparence sur l'usage de l'eau dans le secteur technologique. Afin de permettre une gestion proactive de l'eau au niveau local et régional et de soutenir l'innovation, les entreprises devraient publier publiquement des données détaillées liées aux infrastructures et aux modèles d'IA, notamment le type de système de refroidissement, la consommation d'eau au niveau du site, le mix énergétique local et l'eau incorporée dans le matériel, par le biais de plateformes en libre accès, accompagnées d'une vérification indépendante afin de garantir la transparence et la crédibilité. En outre, une plus grande transparence de la chaîne d'approvisionnement est requise grâce à des déclarations environnementales de produits (EPD) vérifiées par des tiers, qui rendent compte du cycle de vie des gaz à effet de serre, de l'énergie, de l'empreinte hydrique, des matériaux critiques et des hypothèses de fin de vie des principaux produits des centres de données (par exemple, les serveurs, les racks, les équipements de refroidissement et les microprocesseurs). Pour y parvenir, il faut un effort coordonné à l'échelle de l'industrie et un engagement soutenu en faveur de la normalisation des rapports, de la responsabilité et de l'intégration des centres de données dans les cadres de planification de l'eau.

À mesure que l'IA s'intègre de plus en plus dans les systèmes essentiels, il est important de mettre en place des mesures de protection environnementale qui tiennent compte à la fois des conséquences actuelles et des risques futurs. Pour faire face à ces incertitudes, il faut adopter une approche multidisciplinaire et prospective, fondée sur des recherches rigoureuses, des rapports

transparents et des cadres politiques qui concilient durabilité et progrès technologique. Cette responsabilité ne doit pas reposer exclusivement sur les épaules des entreprises technologiques. Il s'agit d'un devoir partagé, impliquant les gouvernements, les régulateurs politiques, les universités, la société civile et les utilisateurs, qui doit nous inciter à exiger et à concevoir des systèmes d'IA conformes aux objectifs environnementaux à long terme, qui protègent et améliorent activement nos ressources en eau.

Conclusion

Alors que l'IA devient de plus en plus intégrée aux services environnementaux, son empreinte environnementale, en particulier sa consommation d'eau, reste peu étudiée. La formation et l'utilisation de modèles d'IA à grande échelle nécessitent une puissance de calcul importante, ce qui entraîne une consommation d'énergie élevée et une production de chaleur considérable, souvent gérées par des systèmes de refroidissement des centres de données gourmands en eau qui peuvent mettre à rude épreuve les ressources locales en eau. Cet article examine l'empreinte hydrique de l'IA à travers le prisme des centres de données. Bien que l'empreinte hydrique mondiale des centres de données soit faible par rapport à celle de nombreux autres secteurs, leur impact local peut être considérable, en particulier dans les bassins soumis à un stress hydrique, où les nouvelles demandes de refroidissement peuvent entrer en compétition avec les utilisateurs existants et mettre à rude épreuve des systèmes déjà fragiles. Le rythme de croissance est tout

aussi important: l'expansion rapide de l'IA et les centres de données qu'elle nécessite sont susceptibles d'intensifier ces pressions dans les années à venir. Cependant, grâce à la planification stratégique et à une collaboration intersectorielle, l'IA peut évoluer de manière plus durable, mais aussi comme puissant catalyseur d'une gestion environnementale plus large. Pour réduire au minimum l'empreinte hydrique de l'IA, il faut adopter une approche multiforme, comprenant des technologies de refroidissement avancées telles que le refroidissement par immersion, la modernisation des infrastructures vieillissantes en partenariat avec les services publics et l'application de l'IA elle-même pour la surveillance prédictive et la gestion adaptative de l'eau. Dans les régions soumises à un stress hydrique, l'adoption de systèmes d'eau circulaires (traitement et réutilisation des eaux de process) peut renforcer la résilience et minimiser les impacts. Une gouvernance forte est essentielle. L'obligation de mettre en place des mesures standardisées de la consommation d'eau, la communication publique et les plateformes de données en libre accès peuvent améliorer la transparence, la responsabilité et l'innovation ciblée. L'intégration du développement des centres de données et des charges de travail de l'IA dans la planification locale et régionale de la gestion de l'eau est essentielle pour équilibrer durablement l'offre et la demande. Intégrer la durabilité dans le développement et le déploiement de l'IA est une nécessité. Alors que l'économie numérique se développe et que la consommation d'eau douce augmente, l'IA pourrait jouer un rôle clé dans la résolution des défis environnementaux qu'elle alimente aussi par ailleurs.

À propos de l'auteure

Ana Pinheiro Privette est une professionnelle chevronnée dont l'expertise se situe à la croisée des sciences de l'ingénierie, de la technologie et des systèmes de données. Avec plus de 25 ans d'expérience dans les secteurs public, privé et universitaire, ingénieure en environnement et géoscientifique de formation, elle a débuté sa carrière dans la recherche au Goddard Space Flight Center de la NASA et au National Centers for Environmental Information de la NOAA, où ses travaux ont fait progresser l'utilisation de la télédétection pour la modélisation de la température de surface terrestre et de l'hydrologie. Ana occupe actuellement le poste de directrice des applications des recherches et des nouvelles initiatives de recherche à l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign, où elle dirige également le Center for Secure Water. Elle a précédemment occupé les postes de responsable de l'informatique durable chez Amazon Web Services et de responsable mondiale de l'Amazon Sustainability Data Initiative (ASDI). Elle a dirigé d'importantes collaborations intersectorielles telles que le Partnership for Resilience and Preparedness (PREP) et la White House Climate Data Initiative (CDI), coordonnant les efforts de nombreuses agences et organisations fédérales. Ana est profondément engagée dans la promotion de l'innovation en matière de résilience climatique et de durabilité en facilitant la prise de décision fondée sur les données.







IV RENFORCER LES POLITIQUES PUBLIQUES ET LA GOUVERNANCE DE L'IA AU SERVICE DE LA DURABILITÉ

Cette section analyse l'évolution du rôle de la gouvernance dans la mobilisation de l'intelligence artificielle (IA) au service de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique, à travers deux axes majeurs : la gouvernance du déploiement de l'IA afin de renforcer la stabilité de la planète, et la gouvernance des données pour garantir leur standardisation, leur exhaustivité et leur interopérabilité. Ensemble, ces thématiques mettent en lumière la manière dont le développement et l'usage responsables de l'IA peuvent contribuer à un avenir plus durable.

Selon **Francesca Larosa**, les technologies d'IA offrent un potentiel significatif pour réduire les émissions, améliorer l'efficacité dans l'utilisation des ressources et contribuer à l'atteinte des objectifs climatiques. Toutefois, le développement rapide de l'IA s'accompagne également de risques socio-environnementaux, tels qu'une augmentation de la consommation énergétique, une pression renforcée sur les ressources et une possible accentuation des inégalités. Larosa présente le Principe d'« *Earth alignment* », un cadre de gouvernance destiné à orienter le développement de l'IA de manière à contribuer à la stabilité planétaire. Ce principe repose sur trois critères fondamentaux : la priorité donnée aux systèmes d'IA soutenant des modes de production et de consommation durables, la garantie d'un accès équitable aux technologies d'IA, et le renforcement de la cohésion sociale. Elle plaide pour une gouvernance proactive, orientée par des missions, capable de guider le développement de l'IA vers le bien commun à travers des politiques prospectives et coordonnées. En s'inscrivant dans ces principes, Larosa esquisse la perspective d'un avenir équilibré et positif pour la planète, dans lequel la technologie contribue à l'atténuation du changement climatique et à la résilience, sans aggraver les dommages environnementaux.

Masaru Yarime souligne pour sa part le rôle déterminant de la gouvernance des données pour permettre à l'IA d'exprimer pleinement son potentiel au service du climat. Si l'IA constitue un levier puissant pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, son efficacité dépend largement

de la disponibilité et de la qualité des données. L'article met en évidence les défis liés à la fragmentation des données, au manque d'interopérabilité et à l'insuffisance des cadres de gouvernance, qui limitent aujourd'hui la capacité de l'IA à répondre aux enjeux climatiques. Yarime appelle à une approche globale de la gouvernance des données, garantissant l'exactitude, la transparence et l'accessibilité des données, tout en prenant en compte les enjeux éthiques tels que la protection de la vie privée et les biais, ainsi que les défis institutionnels. Il insiste sur la nécessité de modèles fondés sur la confiance – comme les data trusts climatiques – afin de renforcer la confiance mutuelle et de faciliter la coopération intersectorielle. En mettant en place des structures de gouvernance robustes, Yarime estime que les organisations peuvent garantir la fiabilité et l'équité des systèmes d'IA, et ainsi favoriser une coopération mondiale efficace face au changement climatique.

Ces deux articles soulignent l'importance centrale de la gouvernance – tant sur le plan technique qu'institutionnel – pour permettre à l'IA de contribuer de manière effective à l'action climatique. À mesure que les systèmes d'IA s'intègrent plus profondément aux stratégies de réponse au changement climatique, il devient essentiel d'assurer leur alignement avec les objectifs mondiaux de durabilité et les principes éthiques. En favorisant un développement responsable de l'IA, la transparence des données et un accès équitable aux technologies, ces cadres de gouvernance ouvrent des voies concrètes vers un avenir plus durable, soutenu par l'IA.

Gouverner la double transition pour un avenir compatible avec la planète

Francesca Larosa

KTH Royal Institute of Technology (Stockholm)

Les progrès rapides et l'adoption croissante de l'intelligence artificielle (IA) transforment les systèmes mondiaux de production et de consommation. L'IA offre des possibilités d'améliorer l'efficacité, de réduire les coûts et de déclencher des transformations majeures dans de nombreux secteurs. Dans le même temps, son déploiement soulève des préoccupations socio-environnementales, notamment en matière de demande énergétique, d'impact sur les ressources et d'inégalités potentielles tout au long des chaînes de valeur.

L'IA évolue d'un simple outil technique vers une force socioculturelle qui façonne la manière dont les connaissances sont produites, détenues et partagées, influençant ainsi le fonctionnement des sociétés, la communication et la prise de décision. Dans le contexte de la durabilité et du climat, cette évolution crée à la fois des risques et des opportunités significatives pour soutenir des voies de développement plus résilientes et plus équitables. La question centrale est donc de savoir comment orienter intentionnellement l'IA afin qu'elle contribue à la stabilité de la planète. Cet article examine le concept d'« *Earth alignment* » comme cadre permettant de promouvoir le développement et le déploiement de l'IA de manière à protéger les systèmes terrestres, à garantir un accès équitable aux avantages et à renforcer la cohésion sociale. Il propose enfin plusieurs scénarios plausibles pour aligner le développement de l'IA sur des objectifs centrés sur la planète, en apportant des éclairages sur les voies possibles à explorer.

Introduction

Le 30 novembre 2022, OpenAI a annoncé le lancement de ChatGPT, un « modèle [...] qui interagit de manière conversationnelle »¹. L'objectif affiché de ce lancement était « de collecter les retours des utilisateurs et d'identifier ses forces et ses faiblesses ». Depuis lors, le modèle a fait l'objet d'examens approfondis et de mises à jour fréquentes, et a déclenché une course à la suprématie en matière d'IA qui redessine les équilibres géopolitiques, les investissements publics et privés, ainsi que la technologie elle-même². À mesure que les performances des modèles convergent au fil du temps, la concurrence à la frontière technologique de l'IA devient de plus en plus intense³. La seule supériorité technique ne suffira probablement pas à déterminer le paysage futur des gagnants et des perdants. Le succès dépendra plutôt d'autres facteurs critiques, au premier rang desquels l'alignement avec les valeurs humaines et les principes partagés par les communautés.

Les risques liés à la technologie sont perçus par le grand public comme des menaces majeures à court terme⁴, la diffusion de l'IA étant fortement liée à des phénomènes de fracture sociale et de conflits. Ces préoccupations émergent dans un contexte d'empreinte écologique croissante de l'IA, marqué par des inquiétudes relatives à l'utilisation des ressources naturelles et à l'augmentation de la demande énergétique nécessaire au fonctionnement des infrastructures, à l'entraînement des modèles et aux phases d'inférence⁵. Cependant, alors que les risques éthiques et les implications de l'IA ont fait l'objet d'une attention considérable de la part du monde académique⁶, des décideurs publics⁷ et des organisations de la société civile⁸, les enjeux de gouvernance liés à la responsabilité planétaire de l'IA demeurent relativement absents du débat public. Pourtant, la transition climatique vers une économie bas carbone et plus efficace dans l'utilisation des ressources, d'une part, et la révolution numérique, d'autre part, sont loin d'être déconnectées. Elles s'inscrivent au contraire dans le cadre d'une « double transition » (*twin transition*), dans laquelle les technologies peuvent accélérer et rationaliser des activités ayant des effets à la fois sur l'atténuation du changement climatique – c'est-à-dire la réduction des émissions – et sur l'adaptation (ou la gestion de ses impacts).

Qu'est-ce qui rend l'IA si particulière ?

Bien que l'engouement actuel autour de l'IA puisse sembler sans précédent aux yeux de l'opinion publique, l'« été de l'IA » que nous vivons aujourd'hui est le produit d'une chaîne d'innovations beaucoup plus longue et complexe. D'un point de vue systémique et socio-économique, la capacité à maîtriser les connaissances et leurs modes de diffusion est au cœur du progrès technologique. Le téléphone (1876-1877), premier dispositif permettant à deux interlocuteurs éloignés de communiquer en temps réel, a provoqué une profonde transformation culturelle : il a entraîné des changements significatifs dans l'organisation du travail, notamment une participation accrue des femmes, en particulier en temps de guerre. Cet appareil est à l'origine de l'économie connectée (*connected economy*), qui a ensuite conduit au



Les systèmes d'IA devraient favoriser la cohésion sociale, la confiance et une plus grande fiabilité des résultats.





déploiement massif d'Internet et à la diffusion rapide des réseaux haut débit à partir des années 1980. Au cœur de cette économie connectée se trouve la capacité à communiquer et à partager, en temps réel, des données, des informations et des connaissances générées à distance par le destinataire. La réglementation, en particulier dans l'Union européenne (UE), s'est largement appuyée sur le droit de la concurrence afin de garantir un accès équitable aux infrastructures pour les opérateurs historiques et de promouvoir la transparence. Parmi les exemples notables, citons la politique d'« *Open Network Provision* » de l'UE (directive 97/51/CE) et aux États-Unis, le *Cable Communications Policy Act* de 1984.

L'économie connectée a émergé pour répondre au besoin croissant d'échanges mondiaux et de liberté commerciale, permettant la circulation des données et des informations qui alimentent les pôles de connaissances d'aujourd'hui et de demain. Ce flux continu d'informations a favorisé l'innovation des modèles économiques, les plateformes numériques fournissant de plus en plus de biens et de services, marquant ainsi l'entrée dans l'ère de l'économie numérique au début des années 2000. Bien que les modèles traditionnels de production et de consommation soient restés en grande partie inchangés, les outils numériques ont permis aux produits et services de traverser facilement les frontières, contribuant à l'émergence d'un marché véritablement mondial. Cette évolution a également donné naissance à des services basés sur l'information qui soutiennent la prise de décision tant au niveau des entreprises que des pouvoirs publics. Aux

États-Unis comme dans l'UE, les mécanismes de gouvernance ont commencé à évoluer pour répondre aux défis de l'ère numérique, notamment en matière de protection de la vie privée et de contenus préjudiciables. Dans l'UE, la directive « vie privée et communications électroniques » (directive 2002/58/CE)⁹ a été introduite afin de protéger la confidentialité des communications en ligne et de réglementer les messages non sollicités (par exemple, les spams). Aux États-Unis, des textes tels que la loi E-SIGN (*Electronic Signatures in Global and National Commerce Act, 2000*)¹⁰ ont établi la validité juridique des contrats signés électroniquement dans le commerce interétatique et

international, permettant l'émergence de nouveaux modèles économiques conformes aux exigences légales. Ces évolutions réglementaires ont marqué l'apparition de nouveaux droits numériques et une reconfiguration des processus économiques, positionnant les données et les informations comme des ressources de valeur et comme de nouveaux objets d'échange à l'ère numérique.

La transformation liée à l'émergence de l'intelligence des machines, dont l'IA est un élément central, marque un changement dans le rôle de la connaissance, qui passe du statut de simple objet d'échange à celui de véritable sujet de l'échange. La connaissance ne fonctionne plus uniquement comme un outil d'aide à la décision : elle apparaît comme un atout indispensable au cœur de multiples chaînes de valeur. Cette évolution marque le début de

l'économie numérisée, caractérisée par deux traits distinctifs. Premièrement, la connaissance constitue désormais le principal moteur de la création de valeur. Les capacités de l'IA générative dans le domaine de la science des matériaux et de la découverte scientifique en sont un bon exemple. L'IA a le potentiel de réduire, voire d'éliminer, la dépendance vis-à-vis des ressources naturelles en introduisant des matériaux de base créés en laboratoire dans le processus de transition énergétique. Les algorithmes intelligents facilitent également la gestion du réseau énergétique en optimisant la charge et en favorisant une production d'énergie plus diversifiée, contribuant ainsi à l'intégration croissante des énergies renouvelables et à la réalisation des objectifs de décarbonation visant à maintenir le

réchauffement climatique dans la limite de 1,5 °C fixée à Paris il y a dix ans. Deuxièmement, la distinction entre utilisateurs et producteurs de données et d'informations est de plus en plus floue. Les systèmes d'IA générative évoluent en continu grâce aux interactions avec les utilisateurs, intégrant leurs retours pour affiner leurs résultats. Cependant, ces contenus sont souvent intégrés de manière transparente dans la vie quotidienne, généralement sans vérification externe ni contrôle des faits, ce qui soulève des inquiétudes quant à la fiabilité et la traçabilité des informations produites.

À mesure que les enjeux deviennent plus imbriqués et complexes, la gouvernance de l'IA doit évoluer pour répondre aux objectifs et aux ambitions de haut niveau de la société dans son ensemble. Inspirée par l'approche axée sur les missions adoptée par la Commission européenne, la nouvelle gouvernance de l'IA doit fixer des priorités claires et ambitieuses, reposant sur des critères communs

Traditionnellement, la réglementation et les politiques se sont principalement concentrées sur la concurrence et la protection des données. Cependant, à l'ère de l'IA, l'immatérialité des opérations et le brouillage des frontières (de plus en plus fines) entre propriétaires et bénéficiaires font que les outils de régulation existants risquent de devenir obsolètes. À mesure que les enjeux deviennent plus imbriqués et complexes, la gouvernance de l'IA doit évoluer pour répondre aux objectifs et aux ambitions de haut niveau de la société dans son ensemble. Inspirée par l'approche axée sur les missions adoptée par la Commission européenne¹², la nouvelle gouvernance de l'IA doit fixer des priorités claires et ambitieuses, reposant sur des critères communs. Une illustration convaincante de cette nouvelle trajectoire de gouvernance est la notion de gestion planétaire, avec laquelle la trajectoire de développement de l'IA doit être de plus en plus alignée.

Le principe d'Earth alignment

Le concept d'« alignement » a été formellement proposé par des acteurs du monde académique et industriel pour relever trois défis majeurs :

- i) concevoir des agents susceptibles de dépasser les capacités humaines (*smarter-than-human*) tout en poursuivant de manière fiable leurs objectifs spécifiques ;
- ii) définir rigoureusement et communiquer sans ambiguïté les objectifs qui leur sont confiés ;
- iii) veiller à ce que, malgré les erreurs inévitables dans leur programmation initiale, ces agents restent coopératifs avec leurs « créateurs »¹³.

La gouvernance des systèmes d'IA traite généralement les situations de désalignement de manière rétrospective, en recueillant des preuves et en mettant en œuvre des mesures correctives⁶. Les principes éthiques ont pour but de guider l'entraînement des systèmes de manière prospective. Les travaux en éthique, en philosophie et en études des systèmes sociotechniques se sont largement concentrés sur l'alignement comme un moyen d'empêcher l'IA de générer de nouveaux risques existentiels ou à fort impact, ou d'aggraver des risques existants, et de prévenir de manière proactive les dommages produits par des systèmes désalignés¹⁵. Si ces efforts ont posé des bases importantes pour les corrections a posteriori, il est de plus en plus reconnu qu'une IA véritablement alignée dès sa conception (*aligned-by-design*) ne peut résulter que de l'application de principes solides, partagés et de haut niveau.

Alors que les impacts du changement climatique deviennent plus fréquents et plus graves, il est urgent de promouvoir une transition juste, ordonnée et évolutive vers une économie bas carbone et plus efficace dans l'utilisation des ressources, tout en mettant en place des mesures d'adaptation aux contextes locaux. Introduit en 2025 par un groupe d'auteurs aux profils variés, le principe d'Earth alignment appliqué au développement de l'IA ne vise pas uniquement à atténuer les risques : il propose avant tout de réorienter la croissance et la diffusion de l'IA vers des applications bénéfiques pour la planète, afin d'améliorer le bien-être des populations et de limiter autant que possible les dynamiques de déstabilisation des systèmes terrestres¹⁴. Cette intention proactive de tirer parti des capacités de l'IA favorise des applications présentant des degrés variables d'alignement, de faible à fort, tout au long de leur cycle de vie. À l'instar de l'approche fondée sur des missions, le principe d'Earth alignment se décline en trois critères concrets et opérationnels, couvrant le développement, le déploiement et l'utilisation des systèmes d'IA¹⁴ :

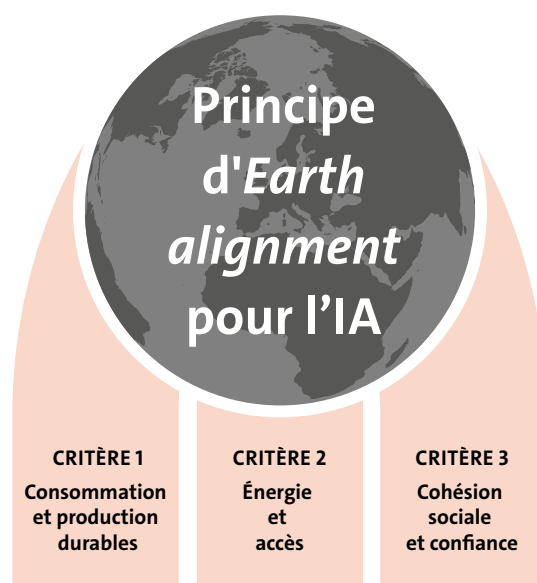
1. Les systèmes d'IA doivent soutenir de manière proactive des modes de consommation et de production durables, en tenant compte des limites fixées par les frontières planétaires et en atténuant les impacts environnementaux négatifs de l'IA.

2. Un accès équitable aux outils d'IA permet de diffuser l'innovation auprès du plus grand nombre et de limiter la concentration du pouvoir.

3. Les systèmes d'IA doivent soutenir la cohésion sociale, la confiance et une plus grande fiabilité des résultats, afin de promouvoir la responsabilité planétaire et la protection des biens communs.

Mise en œuvre des trois critères

Le premier critère donne activement la priorité à certaines applications par rapport à d'autres, afin de lutter contre les crises climatiques et de la biodiversité, en mettant l'accent sur la décarbonation et la préservation de la nature. L'électrification de nos économies est un moteur majeur de la transformation du secteur énergétique à l'échelle mondiale. Les entreprises déploient de plus en plus l'IA pour optimiser l'approvisionnement et la consommation d'énergie et de ressources, ainsi que le transport et l'équilibrage de l'électricité¹⁵. Les applications de l'IA peuvent notamment contribuer à réduire les pertes énergétiques, en particulier dans les pays en développement, et être mobilisées pour découvrir de nouveaux matériaux plus performants pour les systèmes photovoltaïques¹⁶. Si l'empreinte énergétique de l'IA est loin d'être négligeable – même si son ampleur reste contestée¹⁷ – des évaluations d'impact en amont, ainsi que des mécanismes transparents de publication et de reporting, sont nécessaires pour maîtriser le profil d'émissions lié à l'entraînement des modèles et aux phases d'inférence. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la demande mondiale en électricité des centres de données a augmenté de 12 % par an au cours des cinq dernières années¹⁷, mais la pression sur la demande peut atteindre jusqu'à 20 % dans certaines zones à forte concentration de centres de données (comme l'Irlande) et 25 % dans d'autres (comme l'État de Virginie). Aux États-Unis seulement, les centres de données dédiés à l'IA devraient émettre entre 24 et 44 millions de tonnes d'équivalent CO₂ par an entre 2024 et 2030¹⁸. Le principe d'Earth alignment ne néglige pas ces impacts négatifs. Son premier critère encourage au contraire le développement d'applications d'IA capables de soutenir la réduction des émissions de carbone, afin d'atteindre un bilan positif net à l'avenir. Au-delà de l'énergie, les applications d'IA peuvent soutenir le suivi de la biodiversité et l'aménagement des territoires, en contribuant à identifier et à résoudre les enjeux sociaux, éthiques et de gouvernance qui sous-tendent la double transition. Des évaluations récentes de l'expansion de l'IA^{19,20} soulignent que son utilisation dans le domaine de la biodiversité permet de prendre des décisions pertinentes à l'échelle locale, grâce à des informations très détaillées, et de donner les moyens d'agir aux communautés qui, jusque-là, disposaient d'un accès limité à l'information.



Le deuxième critère répond aux préoccupations croissantes concernant l'accès inégal et inéquitable aux systèmes, aux modèles et aux infrastructures d'IA. La vitesse d'adoption sans précédent des technologies IA (Figure 1) illustre à quel point cette technologie polyvalente irrigue désormais de multiples secteurs de l'économie. Si l'usage de l'IA est déjà marqué par une forte polarisation géographique (Figure 2a), cette concentration est encore plus prononcée lorsqu'il s'agit d'applications liées à la durabilité²¹ (Figure 2b). La double transition numérique et climatique risque d'amplifier les fractures existantes, exposant les acteurs les moins engagés à des risques accrus. Ce deuxième critère vise précisément à corriger cette diffusion problématique et encourage le transfert de technologies et d'infrastructures, ainsi que le renforcement des capacités, afin de garantir un partage équitable des bénéfices. Par exemple, des initiatives internationales telles que l'AI Climate Institute (lancé lors de la COP30 à Belém, au Brésil) cherchent à soutenir le partage des capacités de recherche et l'échange de connaissances entre les régions²².

**Figure 1 : La vitesse de diffusion de l'IA
(% des ménages américains)**

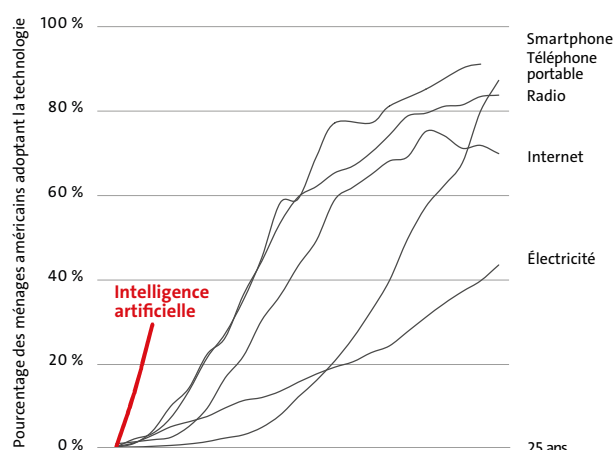


Figure 2a : La diffusion de l'IA selon les zones géographiques. L'usage de l'IA est fortement concentré dans quelques pays.

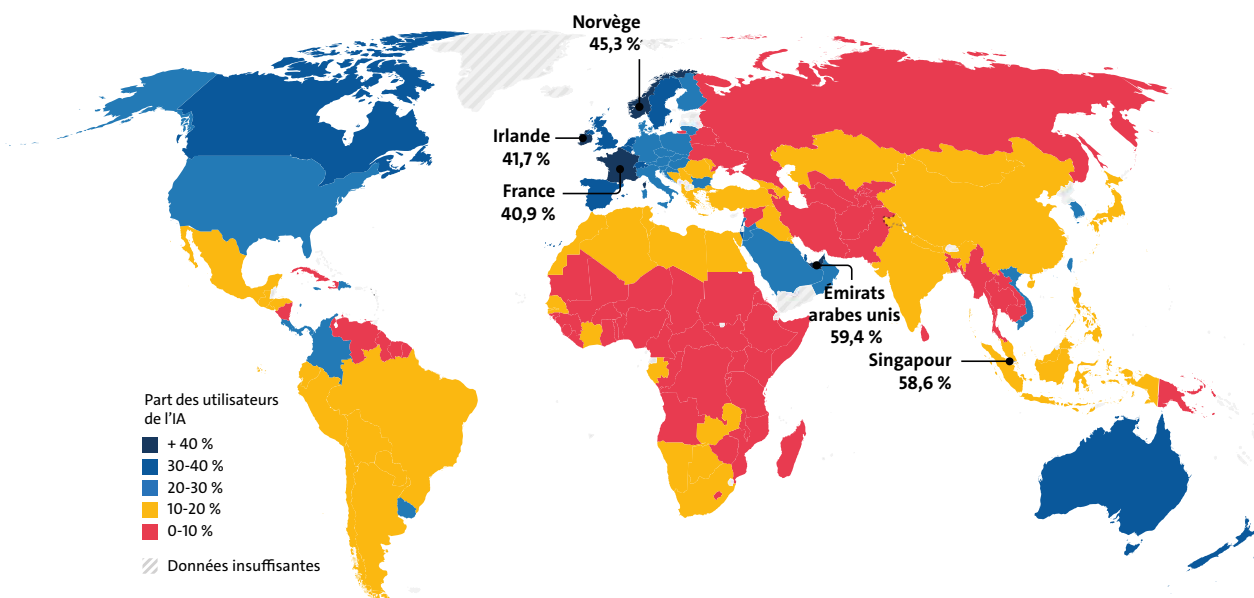
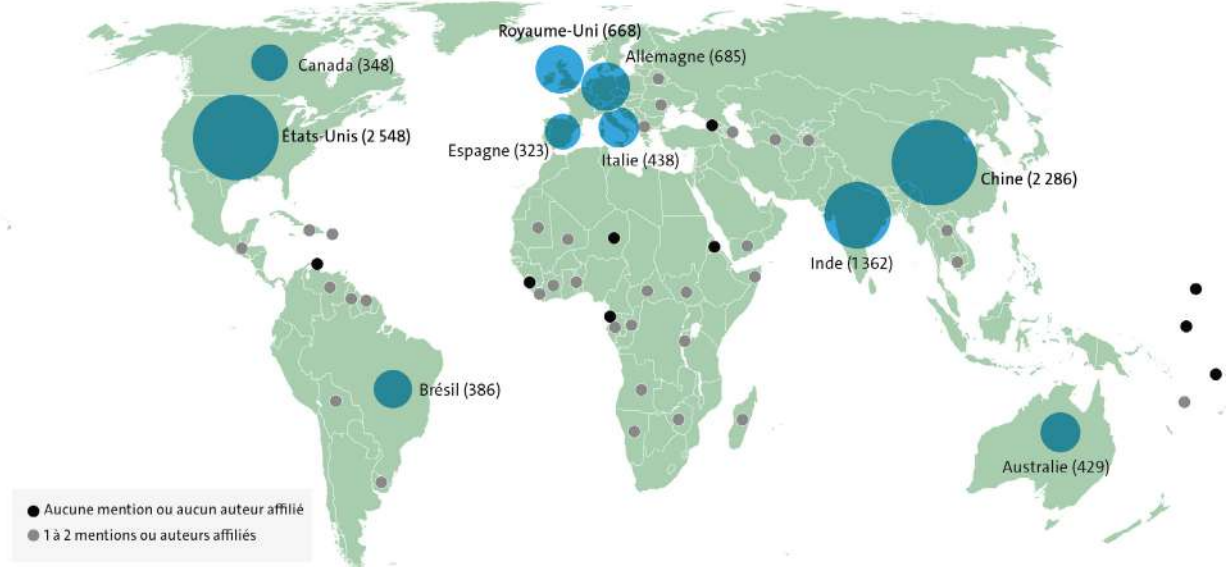


Figure 2b : Répartition mondiale de la recherche sur l'IA au service de la durabilité.

Les sites de recherche et les chercheurs travaillant sur l'IA pour la durabilité sont concentrés dans les pays à revenu élevé.



Sources : Microsoft AI Economy Institute, AI Diffusion Report (novembre 2025).²¹ Galaz and Schewenius (eds, 2025).²²

Alors que les pays en développement sont parmi les plus exposés aux impacts du changement climatique, bien qu'ils aient contribué de manière très limitée aux émissions de gaz à effet de serre, l'application des technologies d'IA peut aider à atténuer ces effets, améliorer la planification et soutenir des transitions rapides vers des technologies propres. La coalition AI Skills portée par l'initiative *AI for Good* de l'UIT est un exemple réussi de partenariat public-privé visant à développer les compétences de l'IA à l'échelle mondiale. Une attention particulière est accordée au secteur public et aux administrations, où la gouvernance des données et l'IA responsable peuvent intégrer le principe d'Earth alignment et le deuxième critère, avec une ambition renforcée.

Le troisième critère repose sur l'interaction synergique entre les facteurs sociaux, naturels et technologiques. Une nouvelle gouvernance des biens communs (y compris des bases de données communes) peut contribuer à restaurer la confiance institutionnelle. En réorientant de manière proactive le déploiement de l'IA vers la gestion responsable de la planète, les sociétés peuvent rétablir la confiance dans les processus démocratiques et les principes partagés. Sur le plan opérationnel, cet objectif peut être atteint de deux manières. Premièrement, à l'ère de la surabondance informationnelle, la promesse de sociétés interconnectées ne s'est pas traduite par des sociétés plus cohésives, mais par des positions divisées et polarisées. En tant que technologie tournée vers l'action et la production de sens, l'IA peut identifier et synthétiser les informations pertinentes afin d'éclairer la prise de décision et de maximiser l'impact des actions engagées. L'outil ImpactAI de la Banque mondiale constitue un exemple emblématique de ce type d'initiative. Il éclaire les stratégies d'investissement responsable visant à combler le déficit de financement des Objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies, notamment l'ODD 13 (Lutte contre le changement climatique), l'ODD 14 (Vie aquatique) et l'ODD 15 (Vie terrestre). Des modèles d'IA affinés sont également utiles pour détecter le *greenwashing* et les déclarations fausses ou inexacts figurant dans les rapports sur les risques liés au climat et à la biodiversité²⁴. En mettant au jour certaines pratiques abusives des entreprises, l'IA facilite l'émergence d'un consensus autour du Green Premium (c'est-à-dire une valeur additionnelle associée aux alternatives plus durables par rapport aux produits industriels conventionnels)²⁵. Le second levier repose sur la cocréation d'outils d'IA avec les parties prenantes concernées, favorisant l'appropriation, la maîtrise et le contrôle des modèles et des plateformes. L'intelligence collective peut intervenir à différentes étapes spécifiques de la chaîne de production des connaissances (telles que la collecte ou la validation des données) ou s'étendre à la coproduction de l'ensemble du produit²⁶. En allant au-delà du paradigme du « *human-in-the-loop* », citoyens, entreprises et organisations peuvent ainsi collaborer pour collecter des données pertinentes.

Bien que les mesures de politique publique doivent être adaptées aux contextes locaux et conçues en fonction des objectifs poursuivis – et qu'elles puissent donc varier selon les régions – les principes directeurs et les critères de gouvernance sous-jacents devraient, eux, être universellement applicables.

Conclusion

Le principe d'Earth alignment souligne qu'aucun critère ne doit être développé de manière isolée : chacun doit être conçu et mis en œuvre en coordination avec les autres.

Du point de vue de la gouvernance, cela se traduit par des politiques redistributives qui permettent à la fois de réduire les émissions et de promouvoir l'équité, favorisant ainsi des transformations systémiques. Dans le secteur des transports, par exemple, les pouvoirs publics peuvent mettre en place des incitations modulées selon les revenus qui encouragent les gens à passer de la voiture individuelle aux solutions de mobilité collective, en adaptant les mesures aux préférences et aux contraintes des usagers. Les outils d'IA peuvent soutenir ces démarches en analysant des données de qualité et diversifiées suivant les habitudes de mobilité, tout en garantissant l'anonymat et la protection de la vie privée. L'IA peut également améliorer le fonctionnement des secteurs à fortes émissions en réduisant les coûts fixes et en renforçant l'efficacité opérationnelle. Dans le cadre du principe d'Earth alignment, une gouvernance de qualité ne cherche pas à remettre en cause ces bénéfices, mais à orienter une partie des gains générés vers des mécanismes de compensation et de soutien, afin d'éviter des impacts négatifs sur l'environnement et les communautés, et, idéalement, de contribuer à leur bien-être.

Pour que le principe d'Earth alignment soit efficace, il doit être soutenu et reconnu par la communauté internationale. Étant donné que la double transition se déploie à l'échelle mondiale, mais qu'elle a des répercussions locales et dépend de réseaux de connaissances interconnectés et transfrontaliers, des accords multilatéraux solides constituent le moyen le plus approprié pour parvenir à un consensus sur les fondements et la mise en œuvre de ce principe. Bien que les mesures de politique publique doivent être adaptées aux contextes locaux et conçues pour répondre à des objectifs précis – et qu'elles diffèrent donc d'une région à l'autre –, les critères directeurs et de gouvernance sous-jacents devraient être universellement applicables.

À mesure que des modèles toujours plus performants transforment nos modes de production et de consommation, nos sociétés et leurs institutions pourraient évoluer vers des configurations imprévues qui risquent d'accélérer la dégradation des écosystèmes et de déstabiliser davantage la planète. Si l'IA partage bon nombre des défis associés aux innovations technologiques antérieures, elle présente également des spécificités inédites : dans la manière dont la propriété intellectuelle est protégée, dans son empreinte largement immatérielle, mais omniprésente, et dans la structure hybride publique-privée de son développement. Du point de vue de la gouvernance, ces caractéristiques exigent des changements dans la manière dont nous concevons et élaborons les politiques publiques. Plutôt que de s'appuyer principalement sur des approches réactives et correctives, une gouvernance proactive, tournée vers l'avenir et axée sur des missions a le potentiel d'orienter la croissance et le déploiement de l'IA vers le bien commun. Le principe d'Earth alignment en est un bon exemple, répondant à des priorités urgentes pour l'avenir : atténuer le changement climatique et s'y adapter. En tant que cadre de gouvernance coordonnée, il peut permettre à l'IA d'accélérer une transition positive pour la planète, sans générer de nouvelles sources d'instabilité.





À propos de l'auteure

Francesca Larosa est chercheuse postdoctorale dans le cadre d'une bourse Marie Skłodowska-Curie au Royal Institute of Technology (KTH) à Stockholm, en Suède. Elle est également membre du comité directeur de l'initiative « AI for Good » (L'IA au service du bien commun), portée et coordonnée par l'Union internationale des télécommunications (UIT) des Nations unies. Économiste de formation, Francesca est titulaire d'un doctorat en sciences et gestion du changement climatique. Ses travaux de recherche portent sur les compromis entre enjeux climatiques et durabilité des outils numériques et de l'intelligence artificielle.

Gouvernance des données pour l'intelligence artificielle dans la lutte contre le changement climatique

Masaru Yarime

Université des sciences et technologies de Hong Kong

Face à l'aggravation du changement climatique, l'intelligence artificielle (IA) offre un potentiel majeur pour accélérer les efforts d'atténuation et d'adaptation grâce à ses capacités d'analyse, de prédiction et d'optimisation. Mais ce potentiel reste sous-exploité en raison de défis techniques, éthiques et institutionnels liés aux données. La qualité, l'interopérabilité et la gouvernance des données apparaissent ainsi comme des leviers stratégiques indispensables au déploiement responsable de l'IA climatique.

L'article met en lumière la relation étroite entre IA et gouvernance des données, en soulignant à la fois les opportunités et les risques : fragmentation des données, empreinte environnementale des infrastructures numériques et risques d'accentuation des inégalités sociales. Il plaide pour une approche globale combinant normes de données harmonisées, mécanismes de partage fondés sur la confiance et cadres internationaux d'IA responsable, afin de faire de l'IA un outil équitable, fiable et efficace au service de la transition climatique.

Introduction

La convergence entre l'IA et les technologies climatiques marque un moment charnière dans l'effort mondial de lutte contre la dégradation de l'environnement. De la modélisation climatique avancée à l'agriculture de précision, les capacités analytiques de l'IA remodelent notre approche de l'adaptation au changement climatique et de l'atténuation de ses effets, offrant une suite d'outils puissants pour relever ce qui constitue sans doute le défi le plus complexe du XXI^e siècle. Le potentiel transformateur de l'IA se manifeste dans un large éventail de secteurs, ce qui justifie pleinement son rôle central dans les futures stratégies climatiques¹. L'IA est devenue une force concrète et opérationnelle, qui produit des résultats tangibles dans la lutte contre le changement climatique. Sa capacité à traiter de grands volumes de données et à en tirer des informations exploitables peut améliorer l'efficacité de la production et de la consommation d'énergie, faciliter l'intégration des énergies renouvelables et renforcer la résilience face aux impacts du changement climatique¹.

Le rôle de l'IA dans l'atténuation et l'adaptation au changement climatique

L'IA présente un potentiel considérable pour lutter contre le changement climatique et s'y adapter dans un large éventail de domaines².

Atténuation du changement climatique

Les domaines dans lesquels l'IA peut contribuer à l'atténuation du changement climatique comprennent les systèmes électriques, les transports, les bâtiments et les villes, l'industrie, l'agriculture et la foresterie, ainsi que les technologies d'élimination du dioxyde de carbone. L'IA peut améliorer le déploiement des énergies propres en identifiant les emplacements optimaux pour de nouveaux parcs solaires et éoliens et en maximisant la production d'électricité des installations existantes³. Cette technologie renforce également l'exploitation des réseaux grâce à la gestion prédictive de la végétation et à l'évaluation dynamique des lignes, qui contribuent à maintenir la fiabilité du système et à augmenter les capacités de transport d'électricité. Dans le secteur manufacturier, l'IA améliore l'efficacité énergétique et réduit les déchets en optimisant les calendriers de production. Au-delà de ces applications, l'IA accélère

de manière spectaculaire la recherche de nouveaux matériaux de batterie à faible coût, essentiels au stockage de l'énergie à grande échelle. Le calcul d'itinéraires économes en carburant – qui a permis de réduire les émissions de manière équivalente au retrait de plus de 630 000 voitures à essence de la circulation pendant un an – ou encore l'API Solar, qui utilise l'IA et l'imagerie satellitaire pour estimer les économies d'énergie solaire de millions de bâtiments, sont des exemples emblématiques de solutions d'IA à grande échelle ayant un impact direct sur le climat⁴. Un suivi précis et fiable des émissions est fondamental pour atténuer le changement climatique. L'IA offre des capacités transversales pour surveiller les émissions de dioxyde de carbone et de méthane à l'échelle mondiale, permettant d'attribuer les émissions à des installations et des sites spécifiques, et facilitant l'évaluation de l'impact global des politiques climatiques³. Au-delà de la mesure des émissions, l'IA améliore les coûts et les performances des technologies de capture de carbone en facilitant la conception et la sélection de matériaux adaptés.

Adaptation au changement climatique

L'IA peut également jouer un rôle crucial dans l'adaptation au changement climatique dans divers domaines, tels que la prévision climatique, les impacts sociétaux et l'ingénierie solaire. Le changement climatique accentue la fréquence et la gravité des phénomènes météorologiques extrêmes, rendant les stratégies d'adaptation indispensables. L'IA améliore la précision et l'anticipation des prévisions météorologiques, permettant aux pays disposant de ressources limitées de mieux se préparer aux événements extrêmes³. L'IA fournit des prévisions critiques sur les inondations plusieurs jours à l'avance à des millions de personnes, optimise la gestion des incendies grâce à la détection précoce des zones à risques et facilite la détection rapide de nouveaux départs de feu. Dans le milieu marin, les systèmes d'IA peuvent cartographier les grands icebergs de l'Antarctique en une fraction de seconde, fournissant des données essentielles sur les taux de fonte des glaces⁵. Cette capacité de prévision permet aux entreprises et aux pouvoirs publics de mieux se préparer aux catastrophes liées au climat. La technologie est également mobilisée pour restaurer les écosystèmes naturels : au Brésil, des ordinateurs pilotés par l'IA sont associés à des drones pour définir des zones cibles et disperser des semences dans le cadre d'initiatives de reforestation⁶.



Les applications de l'IA sont vastes et en pleine expansion, chaque nouvel outil apportant une contribution à la résolution d'un défi climatique particulièrement complexe. La capacité de l'IA à traiter de grands volumes de données hétérogènes et à produire des informations exploitables en temps utile en fait un levier puissant pour l'action climatique. L'efficacité de chaque initiative d'IA – qu'il s'agisse d'optimiser un parc éolien ou de prévoir une inondation – est directement liée à la qualité des données qui l'alimentent. Le déploiement réussi et à grande échelle de ces applications dépend donc d'un écosystème de données robuste et bien gouverné. Une gouvernance solide des données est indispensable pour garantir des données fiables et une IA responsable⁷.

La gouvernance des données comme fondement de l'IA au service du climat

Une gouvernance solide des données constitue un levier majeur pour l'IA. Loin d'être une contrainte réglementaire, elle doit être envisagée comme un atout stratégique permettant de libérer tout le potentiel de l'IA au service de l'action climatique. Cela passe par l'instauration d'un climat de confiance, la mise en œuvre d'une innovation responsable et la promotion d'une culture d'investissement stratégique.

Renforcer la confiance et garantir l'intégrité des données

L'un des principaux avantages d'une gouvernance solide des données est l'instauration d'un climat de confiance entre les parties prenantes, condition indispensable à une collaboration efficace face aux enjeux climatiques. En appliquant des politiques claires et en assurant une supervision clairement définie, la gouvernance des données garantit que les systèmes d'IA sont fiables, transparents et équitables. Sur le plan technique, cela se traduit par des bénéfices concrets, tels qu'une meilleure précision des résultats et une réduction des hallucinations.

La création d'une IA digne de confiance commence par des données fiables. Une gouvernance proactive des données renforce cette confiance en garantissant que les modèles d'IA utilisent des données de qualité, collectées avec le consentement nécessaire et disposant d'une traçabilité claire. La traçabilité des données, c'est-à-dire la capacité à retracer les données depuis leur source jusqu'à leur utilisation finale en passant par leurs transformations, constitue un élément clé de cette confiance. Elle fournit la piste d'audit dont les parties prenantes ont besoin pour avoir confiance dans l'intégrité des données et, par extension, dans la fiabilité des résultats de l'IA. Cette confiance facilite à son tour un consensus plus large entre les différentes parties prenantes. Le lien de causalité entre l'intégrité des données et la coopération institutionnelle est profond : en l'absence d'une base de données commune et fiable, toute action coordonnée devient extrêmement difficile.

Le manque de systèmes de données unifiés et le recours à des jeux de données hétérogènes sont d'ailleurs identifiés comme des obstacles majeurs à l'action climatique coordonnée⁸. Par conséquent, un cadre de gouvernance clairement défini ne constitue pas seulement une exigence technique, mais aussi une nécessité sociale et institutionnelle pour permettre le déploiement des solutions climatiques efficaces à grande échelle.

Mise en œuvre d'une IA responsable et évolutive

Une gouvernance efficace des données fournit une approche structurée pour gérer l'ensemble du cycle de vie de l'IA, condition essentielle tant pour sa responsabilité que pour son évolutivité. En imposant des mécanismes de contrôle des versions, des pistes d'audit et un suivi continu, la gouvernance permet aux organisations de garantir la transparence et la redevabilité de leurs initiatives en matière d'IA⁹. Cela est particulièrement important pour les cas d'usage à haut risque, où le potentiel d'impact négatif est élevé. Par exemple, dans l'évaluation des risques financiers liés au climat, la gouvernance des données garantit que les données et les modèles utilisés pour la prise de décision sont transparents et auditaibles¹⁰.



La gouvernance des données constitue un cadre solide permettant de faciliter la collaboration et d'améliorer l'efficacité opérationnelle dans la gestion des données. Elle fournit une approche structurée qui aide à éliminer les silos de données – qui représentent un frein majeur au progrès et génèrent un désalignement important lorsque plusieurs équipes sont impliquées dans des initiatives d'IA⁹. En établissant une source unique de référence pour les actifs de données à forte valeur ajoutée, la gouvernance des données permet à des équipes aux profils variés de collaborer plus efficacement tout en garantissant la redevabilité et la visibilité nécessaires⁷. Fournir aux organisations un accès sécurisé à des données pertinentes et de haute qualité améliore l'efficacité opérationnelle et renforce l'action climatique.

Favoriser l'innovation grâce à des investissements stratégiques

Les bénéfices de la gouvernance des données vont au-delà de l'efficacité opérationnelle : elle constitue un levier direct d'innovation. Les organisations qui investissent de manière proactive dans la gouvernance des données se positionnent comme des leaders de l'innovation responsable, libérant ainsi le plein potentiel de l'IA à grande échelle. Pour cela, il faut élever la gouvernance des données au rang de priorité au niveau des instances dirigeantes et intégrer ses métriques dans les indicateurs clés de performance (KPI) de l'entreprise ainsi que dans les reportings destinés aux conseils d'administration⁷. Ce positionnement stratégique envoie un signal clair indiquant que les données sont un pilier central de la stratégie IA de l'organisation.

L'investissement stratégique implique également la modernisation des architectures et des outils. Cela passe par l'adoption de plateformes capables de centraliser, de qualifier et de gouverner les données en vue de leur exploitation par l'IA, en mettant l'accent sur l'interopérabilité et la traçabilité. L'IA elle-même peut être un outil puissant pour automatiser de nombreux aspects de la gouvernance, tels que la détection d'anomalies et la validation de la qualité des données⁷. Les outils de gouvernance des données basés sur l'IA peuvent apprendre à partir des modèles de données et des interactions des utilisateurs, s'adaptant ainsi de manière fluide à l'évolution des besoins métiers et des exigences réglementaires¹¹. Cette automatisation est essentielle pour gérer les volumes et la vitesse considérables des données dans des environnements complexes, qui seraient impossibles à maîtriser par des processus exclusivement manuels.

*Une gouvernance solide
des données constitue
un levier majeur pour l'IA*

Principaux défis de la gouvernance des données pour faire face au changement climatique

Si les opportunités sont immenses, le chemin vers un avenir fondé sur les données, optimisé par l'IA et résilient face au changement climatique est semé d'embûches. Ces obstacles ne sont pas seulement d'ordre technique : ils relèvent également de questions éthiques, sociétales et institutionnelles, qui entravent la circulation efficace des données et leur exploitation par l'IA.

Défis techniques et opérationnels

Les défis les plus immédiats sont de nature technique et opérationnelle. Malgré les volumes considérables de données générées par de nombreux dispositifs et instruments, le manque de données de haute qualité, facilement accessibles et normalisées limite souvent l'utilisation efficace de l'IA dans les applications liées au changement climatique⁵. Des informations essentielles demeurent dispersées entre des systèmes, des institutions et des organisations cloisonnés, ce qui conduit à un paysage de données fragmenté⁸.

Un problème majeur réside dans la couverture géographique limitée des jeux de données existants. La plupart des données disponibles se concentrent sur l'hémisphère Nord et couvrent un éventail limité de zones géographiques et de types de bâtiments, principalement situés dans les pays industrialisés⁵. Ce biais est particulièrement prononcé dans les jeux de données utilisés pour la modélisation énergétique des bâtiments, où les données de référence sont rares et peuvent manquer de précision. Il en résulte que les modèles entraînés à partir de ces données limitées peuvent hériter de biais et d'incertitudes préexistants, ce qui les rend moins applicables à d'autres régions du monde, en particulier aux pays du Sud global, où les facteurs culturels et comportementaux diffèrent considérablement. Ce défi est aggravé par des problèmes de discontinuités techniques, tels que le recours à des formats de données propriétaires ou hérités, qui posent des difficultés de conversion, et par l'hétérogénéité des formats entre les différentes sources, compliquant l'intégration de données multisources. Ces difficultés sont encore accentuées par l'ampleur des volumes de données, dont le transfert et le traitement sont complexes, ainsi que par le manque de capacités de calcul et d'infrastructures réseau adéquates, en particulier dans les régions où les infrastructures sont limitées.

Défis éthiques et sociétaux

Les défis auxquels est confrontée la gouvernance des données pour l'IA au service du climat dépassent largement le domaine technique et englobent des questions éthiques et sociétales majeures. Le risque que les systèmes d'IA perpétuent des biais, conduisant à des résultats inexacts ou injustes, fait l'objet d'une préoccupation centrale. Des biais algorithmiques peuvent apparaître si les données utilisées pour entraîner les modèles d'IA ne sont pas correctement gouvernées. Ils peuvent également résulter de biais structurels ou paramétriques propres aux modèles eux-mêmes, entraînant des erreurs systématiques ou des écarts entre les résultats du modèle et les données climatiques réelles¹². Par exemple, un modèle peut systématiquement sous-estimer les épisodes de précipitations extrêmes ou produire des projections de température inexactes, conduisant à des stratégies d'atténuation ou d'adaptation inefficaces.

Un enjeu encore plus complexe réside dans l'articulation entre fracture numérique et injustice climatique. Au début de l'année 2025, près de trois milliards de personnes restent hors ligne, dont une large part vit dans des pays à revenu faible ou intermédiaire, qui sont les plus exposés aux effets du changement climatique¹³. Ce manque d'accès au numérique prive ces communautés d'alertes précoces cruciales et d'informations relatives aux catastrophes, souvent basées sur l'IA. Le lien entre le manque de données géographiquement diversifiées et la fracture numérique est déterminant : les modèles d'IA sont majoritairement entraînés

à partir de données issues des pays développés et adaptées à leurs réalités, ce qui limite la pertinence de leurs résultats pour les communautés les plus exposées au changement climatique. Cette situation entretient un cercle vicieux, dans lequel les populations les plus touchées par le changement climatique ne peuvent ni accéder aux solutions les plus avancées ni en bénéficier pleinement.

Ces considérations soulignent la nature ambivalente de la technologie. Si l'IA offre des bénéfices considérables, son empreinte carbone reste très préoccupante¹⁴. Les centres de données, indispensables au traitement des volumes massifs de données requis par l'IA, représentent environ 1,5 % de la demande mondiale en électricité et contribuent à hauteur d'environ 0,5 % aux émissions mondiales de dioxyde de carbone¹⁵. Une question éthique fondamentale se pose : les bénéfices environnementaux et sociaux d'une application donnée de l'IA compensent-ils réellement les émissions et la consommation de ressources qu'elle génère ? Ce calcul éthique est un élément essentiel de toute stratégie d'IA responsable. Une étude récente montre d'ailleurs que l'IA peut contribuer de manière significative à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans trois secteurs clés, à savoir l'énergie, l'alimentation et la mobilité, qui représentent à eux seuls près de la moitié des émissions mondiales. Selon cette étude, d'ici 2035, le potentiel de réduction des émissions de l'IA dans le secteur de l'énergie pourrait être jusqu'à deux fois et demie supérieur aux émissions générées par les centres de données eux-mêmes¹⁵.

Lacunes des cadres politiques et institutionnels

Le défi institutionnel que représente la fragmentation de la gouvernance est à l'origine de nombreux problèmes techniques et opérationnels. Les données climatiques sont dispersées entre des systèmes cloisonnés, et la coexistence d'exigences réglementaires concurrentes selon les différentes juridictions complique la mise en place de systèmes de données unifiés⁹. Ce paysage fragmenté entrave les flux transfrontaliers de données et crée de l'incertitude, tant pour les décideurs publics que pour les acteurs économiques¹⁶.

Le partage efficace des données est un problème complexe, étroitement lié à des préoccupations sociales, économiques et environnementales qu'aucune organisation ne peut résoudre seule. Il nécessite la mobilisation de coalitions diversifiées et des mécanismes de facilitation adaptés. L'absence de structures de gouvernance claires – notamment lorsque la propriété de certains jeux de données et la responsabilité de leur qualité ne sont pas clairement définies – peut fortement peser sur la prise de décision des parties prenantes et compromettre la capacité des organisations à fonctionner efficacement. Par ailleurs, le manque de confiance du public dans la manière dont les données privées sont traitées peut compliquer la mise en place des partenariats, soulignant la nécessité cruciale de nouveaux modèles d'engagement et de confiance.

La question ne concerne pas uniquement la technologie ou la politique, mais aussi les capacités et les institutions. De nombreux pays, en particulier dans le Sud global, ne disposent pas des structures de gouvernance fondamentales ni de l'expertise nécessaires pour gérer des enjeux complexes, ce qui crée un écart important en matière de capacités. Cela conduit à un décalage entre la disponibilité des données et la capacité¹⁶ à les transformer en informations exploitables pour une prise de décision éclairée face au climat¹⁷. Sans un changement stratégique visant à dépasser les approches fragmentées au profit d'un cadre plus unifié et collaboratif, ces obstacles continueront d'entraver le déploiement à grande échelle de l'IA au service de l'action climatique.

Initiatives émergentes de gouvernance des données pour l'IA au service du climat

Pour relever ces défis, diverses initiatives pionnières ont été lancées. Elles constituent de puissants prototypes pour l'avenir de la gouvernance des données pour l'IA au service du climat.



Plateformes de données ouvertes et initiatives collaboratives

La création de plateformes de données ouvertes et accessibles constitue une étape cruciale pour relever le défi de la fragmentation des données. De nombreuses plateformes de données liées au changement climatique sont fournies par le gouvernement fédéral américain¹⁸. Le programme *Climate Data Records* (CDRs) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) est un exemple emblématique de cette approche. Les CDRs sont des ensembles de données climatiques robustes et scientifiquement validés, rigoureusement contrôlés selon des normes établies par le Conseil national de la recherche (*National Research Council*). Ils fournissent des informations fiables sur la variabilité et l'évolution du climat¹⁹. En rendant ces données accessibles au public, la NOAA garantit une base solide et cohérente pour la recherche climatique et l'élaboration des politiques publiques.

À plus grande échelle, le Portail de connaissances sur le changement climatique (*Climate Change Knowledge Portal – CCKP*) de la Banque mondiale sert de guichet unique pour les données liées au climat, en offrant un accès à des informations complètes aux niveaux mondial, régional et national²⁰. En centralisant et en organisant des données auparavant dispersées, le CCKP réduit les barrières à l'entrée pour les décideurs et les chercheurs. De manière similaire, l'initiative OS-Climate, un projet open source hébergé par la Linux Foundation, met en place l'infrastructure de données et d'analyse nécessaire à l'intégration des risques climatiques dans la prise de décision financière à grande échelle²¹. Son projet *Data Mesh* constitue une innovation clé, qui permet la fédération de données provenant de sources publiques, propriétaires et commerciales, tout en répondant aux préoccupations des fournisseurs de données.

Modèles de gouvernance pionniers : l'essor des *data trusts*

La question de la confiance institutionnelle dans le partage des données trouve une réponse dans de nouveaux modèles de gouvernance, au premier rang desquels figurent les *data trusts*. Ces derniers constituent un cadre de gestion et de prise de décision autour des données, comparable aux *land trusts*, c'est-à-dire à des fiducies foncières chargées de gérer des terres au nom de communautés locales²². Un exemple notable est le *Climate Action Data Trust* (CAD Trust), une plateforme décentralisée de métadonnées qui utilise la technologie *blockchain* pour relier, agréger et harmoniser les données des principaux registres de crédits carbone²³. L'objectif de ce *data trust* est de créer un registre transparent et inaltérable des activités des marchés du carbone, afin d'éviter le double comptage – un problème persistant susceptible de compromettre l'intégrité et la confiance dans ces marchés.

Le modèle de gouvernance du CAD Trust est un prototype permettant de répondre à la nature complexe et multipartite de la coopération climatique. Il s'agit d'une entité indépendante fondée par la Banque mondiale, l'International Emissions Trading Association (IETA) et le gouvernement de Singapour, dont la structure de direction comprend un Conseil, un Conseil d'administration, un Comité technique et un Forum des utilisateurs. Cette approche multipartite garantit que la plateforme s'appuie sur une diversité de points de vue et qu'elle demeure techniquement robuste, transparente et attentive aux besoins du marché. Le CAD Trust illustre ainsi la manière dont un modèle de gouvernance clair, combiné à des technologies modernes, peut instaurer la confiance nécessaire au fonctionnement d'un système mondial efficace.

Partenariats entre les secteurs public et privé

Les entreprises du secteur privé disposant d'une expertise approfondie en matière de données et d'IA jouent également un rôle essentiel, souvent en partenariat avec des acteurs publics. Les initiatives climatiques menées dans le cadre de partenariats public-privé démontrent comment les actifs de données des entreprises peuvent être mobilisés au service de solutions climatiques à grande échelle, directement destinées aux consommateurs. Ces applications montrent qu'il est possible de réduire considérablement les émissions globales en donnant les moyens d'agir à des millions d'utilisateurs individuels. Des initiatives telles que le *Climate Data Store*, le *Climate Montreal* et le *Pacific Climate Impacts Consortium* servent de pôles de coopération réunissant des parties prenantes issues de différents secteurs, contribuant ainsi à renforcer la légitimité et la confiance dans l'écosystème des données climatiques²⁴.

Du côté des entreprises, des acteurs comme *ClimateAi* fournissent des solutions B2B qui mettent en avant la valeur économique de l'intelligence climatique basée sur l'IA²⁵. Les services de *ClimateAi* aident les entreprises et les gestionnaires d'investissements à évaluer et à atténuer les risques liés au climat pesant sur leurs chaînes d'approvisionnement et leurs portefeuilles. Ces partenariats illustrent le fait que les solutions climatiques reposant sur l'IA ne sont pas seulement un bien public, mais aussi une source d'avantage concurrentiel et de résilience pour le secteur privé.

Conclusion : vers un avenir climatique résilient fondé sur les données

La clé pour libérer tout le potentiel de l'IA en faveur de l'action climatique réside dans une approche stratégique, globale et proactive de la gouvernance des données. Les opportunités offertes par l'IA sont immenses, qu'il s'agisse d'optimiser les réseaux d'énergie propre, d'améliorer la résilience face aux catastrophes ou de rendre le marché du carbone plus transparent. Cependant, ces opportunités sont actuellement limitées par un écosystème de données fragmenté, biaisé et mal gouverné. Les défis techniques, éthiques et institutionnels sont importants et profondément interdépendants, ce qui nécessite une réponse coordonnée et globale.

La voie à suivre implique une nouvelle ère de coopération fondée sur des principes communs de confiance, de transparence et d'équité. Elle requiert la modernisation des infrastructures techniques afin de garantir l'interopérabilité des systèmes et de combler les lacunes critiques en matière de données, en particulier dans les régions sous-représentées. Plus important encore, elle appelle à l'émergence de nouveaux modèles de gouvernance collaborative – tels que les *data trusts* climatiques – capables de faire le lien entre secteurs public et privé, de renforcer la confiance mutuelle et de garantir que l'IA réponde aux besoins de tous, en particulier des communautés les plus vulnérables aux effets du changement climatique. En investissant dans une gouvernance solide des données, depuis les instances dirigeantes jusqu'aux cadres de politiques publiques internationales, les organisations et les gouvernements peuvent faire de l'IA un levier puissant, fiable et équitable pour construire un monde plus résilient et durable. Si le défi semble complexe, les solutions stratégiques sont à portée de main, à condition qu'il existe une volonté collective de gérer nos données de manière responsable.

À propos de l'auteur

Masaru Yarime est professeur associé à la *Division of Public Policy* et à la *Division of Environment and Sustainability*, ainsi que codirecteur du *AI Ethics and Governance Lab* à la *Hong Kong University of Science and Technology*. Il est également professeur associé honoraire au *Department of Science, Technology, Engineering, and Public Policy* de *University College London*, professeur associé invité à la *Graduate School of Public Policy* de la *University of Tokyo*, ainsi que professeur associé invité à la *Graduate School of Environmental Studies* de *Tohoku University*.

Ses travaux de recherche portent sur les politiques publiques en matière de science, de technologie et d'innovation au service de la durabilité.

V RENFORCER LES COMPÉTENCES
POUR MOBILISER L'IA AU
SERVICE DE LA DURABILITÉ

Cette section analyse les dynamiques de la main-d'œuvre et les compétences nécessaires pour libérer le potentiel de transformation de l'intelligence artificielle (IA) au service de la transition durable.

Les articles mettent en évidence le rôle majeur de l'IA dans la transformation des métiers et des modes de collaboration, mais aussi dans l'accompagnement de la double transition – écologique et numérique.

Rosie Hood s'intéresse particulièrement à la durabilité et à l'IA, envisagées comme deux transitions indissociables, et à la façon dont leurs interactions transforment les deux industries. Elle examine les tendances du marché du travail dans le domaine de l'IA durable, et souligne la nécessité de développer des compétences écologiques chez les professionnels et la main d'œuvre soutenant la croissance de l'IA. L'article souligne l'importance de développer des « compétences vertes » au sein des métiers de l'IA, en particulier dans des domaines tels que l'efficacité énergétique, les solutions climatiques et la gestion des ressources. Il présente les tendances de l'emploi liées à l'IA durable et met en évidence la nécessité de combiner des compétences techniques en IA avec une compréhension approfondie des enjeux de durabilité, afin de combler le fossé entre expertise technologique et objectifs environnementaux. En analysant ces évolutions, l'auteure souligne l'importance de formations ciblées et de perfectionnement des compétences pour préparer les travailleurs à ces transformations et leur permettre de mobiliser l'IA au service d'un avenir durable. L'IA apparaît par ailleurs comme un levier clé de l'essor de l'économie verte et peut contribuer de manière significative à l'atteinte des objectifs de durabilité. L'article insiste enfin sur la nécessité de normes claires pour garantir que le développement de l'IA reste aligné avec ces objectifs.

Nanjira Sambuli déplace l'attention vers les implications de l'IA pour la main-d'œuvre africaine. La jeunesse de la population du continent, conjuguée à la diffusion croissante des technologies d'IA, présente à la fois des opportunités et des défis. Sambuli avance que l'Afrique n'est pas confrontée à un déficit de compétences, mais plutôt à un problème lié aux emplois. Selon elle, le marché du travail requiert bien plus que des politiques de perfectionnement des compétences : il appelle une transformation systémique plus large, intégrant la création d'emplois formels et informels. Elle remet en question le discours dominant selon lequel le simple renforcement des compétences suffirait à résoudre les défis de l'emploi en Afrique, et plaide pour une réorientation des politiques publiques afin de lever les obstacles structurels à l'entrepreneuriat et à la croissance des entreprises. Sambuli appelle à une approche plus nuancée, intégrant l'IA aussi bien dans les secteurs formels qu'informels, afin qu'elle

contribue à améliorer la productivité et à créer des emplois durables et porteurs de sens pour une main-d'œuvre en forte croissance. Elle souligne que le risque d'une fracture liée à l'IA ne proviendra pas d'un manque de compétences, mais d'une mauvaise identification du problème par les politiques publiques et la gouvernance, qui n'ont pas su instaurer les conditions nécessaires à la création d'emplois et à la croissance économique.

Morgane Vidal, Anne du Crest et Mélanie Macé analysent quant à elles l'impact profond de l'IA sur les métiers et les compétences au sein de Veolia. L'article montre comment l'IA transforme le travail, non seulement par l'automatisation de certaines tâches, mais aussi en modifiant les modes de collaboration et d'interaction. Face à ces évolutions, Veolia a lancé une stratégie ambitieuse de formation visant à toucher 100 % des collaborateurs d'ici 2027, afin de leur fournir les compétences nécessaires à l'intégration de l'IA. L'article met également en lumière les défis associés à cette transformation, notamment la préservation des dynamiques collectives et les effets de l'IA sur le bien-être des salariés.

Il souligne l'importance d'une formation continue et d'un dialogue proactif avec les équipes pour accompagner ces changements, afin de garantir une intégration efficace de l'IA au sein des activités de Veolia tout en favorisant une culture de collaboration et de durabilité.

Les perspectives réunies dans cette section montrent que la préparation de la main-d'œuvre devient un levier fondamental pour permettre à l'IA de contribuer pleinement à la transition durable. L'ensemble des articles souligne la double exigence de compétences techniques en IA et d'expertise liée à la durabilité, en mettant en évidence la nécessité de faire évoluer conjointement les compétences vertes et les compétences en IA pour répondre à l'évolution des besoins des secteurs économiques. Les auteurs attirent également l'attention sur les différences régionales et sectorielles. Ces analyses convergent pour montrer qu'il ne s'agit pas uniquement de la pleine mobilisation du potentiel de l'IA, mais également de la mise en place de soutiens systémiques plus larges, afin de donner aux travailleurs les moyens d'utiliser l'IA de manière pertinente au service du développement durable.

Durabilité et IA

Les signaux de la main-d'œuvre issus de la double transition

Rosie Hood
LinkedIn

Cet article étudie la durabilité et l'intelligence artificielle (IA) en tant que double transition qui transforme en profondeur le monde du travail. Nous examinons le rôle de l'IA au service de l'économie verte dans le cadre de la transition écologique, notamment en améliorant l'efficacité énergétique, l'adaptation climatique et la gestion des ressources au sein des industries vertes. L'étude souligne également l'importance de former les travailleurs à une IA durable et de développer des compétences vertes, tant chez les professionnels de l'IA que dans l'ensemble de la main-d'œuvre.

En donnant la priorité à ces compétences, nous répondons au besoin d'une main-d'œuvre à la fois techniquement qualifiée et formée aux enjeux de durabilité. Tout au long de notre analyse, nous nous concentrerons sur le point de vue des travailleurs en étudiant la manière dont une formation ciblée et le perfectionnement des compétences sont essentiels pour assurer le lien entre ces deux transitions. Nous tenterons de dresser un panorama de la main-d'œuvre concernée et de proposer des pistes concrètes pour une utilisation durable de l'IA.



Introduction

Alors que le monde est confronté au changement climatique et à des progrès technologiques rapides, deux domaines émergents peuvent façonner l'économie de demain : la transition écologique et l'IA. Cette double transition transforme non seulement la manière dont nous produisons et utilisons l'énergie, mais elle redéfinit également les compétences et les rôles requis pour l'ensemble de la main-d'œuvre. À l'intersection de ces deux domaines se présentent à la fois un défi et une opportunité : comment garantir que l'innovation de l'IA, et que l'innovation menée grâce à l'IA, permettent, plutôt qu'elles n'entravent, un avenir plus durable ? En analysant le profil des travailleurs et le développement de leurs compétences dans différents pays à partir des données de plus de 1,3 milliard de membres de LinkedIn, nous examinons la relation qu'entretiennent l'IA et la transition écologique. Nous explorons la manière dont une formation ciblée et l'émergence de nouveaux outils permettent aux travailleurs de contribuer à une économie plus verte et plus résiliente.

Adoption de l'IA dans l'économie verte

Dans cette section, nous nous concentrons sur les façons dont l'IA peut être utilisée en soutien de l'économie verte. Nous examinons la croissance et la diffusion des compétences en IA parmi les travailleurs des services publics et de l'énergie décarbonée, deux secteurs cruciaux dans la transition écologique.

La taxonomie des compétences de LinkedIn distingue deux catégories de compétences en IA : les compétences en ingénierie IA et les compétences de base en IA. Les compétences en ingénierie IA regroupent les savoir-faire techniques nécessaires à la conception et au développement des systèmes d'IA, tandis que les compétences de base en IA portent sur la capacité à comprendre, utiliser et évaluer ces technologies de manière critique¹. Les compétences en ingénierie IA incluent notamment le traitement d'images, l'apprentissage automatique, la vision par ordinateur et les réseaux neuronaux, alors que les compétences de base en IA regroupent des usages d'outils comme ChatGPT, la conception de prompts, Midjourney ou les assistants de codage tels que GitHub Copilot et Microsoft Copilot.

Les compétences en ingénierie IA et les compétences de base en IA jouent un rôle clé dans l'économie verte en stimulant l'innovation et le développement d'infrastructures intelligentes. Par exemple, l'IA générative accélère la découverte de matériaux durables, tandis que des entreprises comme LineVision utilisent l'IA pour optimiser le débit des lignes électriques, améliorant ainsi l'efficacité du réseau. Ces exemples montrent la manière dont l'IA soutient la transition écologique dans des secteurs comme l'énergie, la construction et les infrastructures. Si l'adoption croissante des compétences en ingénierie IA et des compétences de base en IA permet aux travailleurs des industries vertes d'être plus productifs, efficaces et innovants, il est nécessaire de bien distinguer ces compétences.

Le tableau 1 présente les principales compétences en ingénierie IA et compétences de base en IA acquises par les professionnels des industries vertes à l'échelle mondiale², ainsi que les compétences en IA qui connaissent la croissance la plus rapide d'une année sur l'autre. Les compétences communes acquises par ces derniers qui relèvent de l'ingénierie IA comprennent l'IA, l'apprentissage automatique, l'apprentissage profond et l'IA générative. En termes de compétences de base en IA, les travailleurs des industries vertes se perfectionnent dans ChatGPT, la conception de prompts, les outils d'IA générative et Microsoft Copilot. Ces compétences étant également acquises par les travailleurs professionnels de l'IA, nous pouvons voir que les travailleurs se forment aux dernières innovations et aux technologies les plus récentes en matière d'IA.



Tableau 1 : Les compétences en IA les plus recherchées chez les jeunes travailleurs à l'échelle mondiale et celles qui connaissent la plus forte croissance (en termes de croissance annuelle en 2024).

Classement	Principales compétences en ingénierie IA	Principales compétences de base en IA	Compétences en IA connaissant la croissance la plus rapide (d'une année sur l'autre)
1	Intelligence artificielle (IA)	ChatGPT	IA responsable (+ 517 %)
2	Apprentissage automatique	Conception de prompts	LangChain I (+ 379 %)
3	Apprentissage profond	Outils d'IA générative	Modèles linguistiques à grande échelle (LLM) (+ 219 %)
4	IA générative	Microsoft Copilot	Conception de prompts I (+ 197 %)
5	Traitement du langage naturel (NLP)	Création de prompts pour l'IA	Développement de chatbots I (+ 171 %)
6	Vision par ordinateur	Google Gemini	ChatGPT I (+ 171 %)
7	TensorFlow	GPT-4	Algorithmes d'apprentissage automatique I (+ 165 %)
8	Modèles linguistiques à grande échelle (LLM)	Midjourney	IA générative I (+ 142 %)
9	PyTorch	GitHub Copilot	Apprentissage automatique appliqué I (+ 129 %)
10	Traitement d'images	Stable Diffusion	Intelligence artificielle (IA) I (+ 114 %)

Les compétences qui connaissent la croissance la plus rapide parmi les travailleurs sont l'usage responsable de l'IA (en hausse de 517 % en glissement annuel), LangChain (+ 379 %), l'utilisation des grands modèles linguistiques (+ 219 %), l'ingénierie rapide (+ 197 %), le développement de chatbots (+ 171 %) et ChatGPT (+ 171 %). Les professionnels des industries vertes se concentrent ainsi sur leur formation aux derniers progrès de l'IA, à la fois en matière de compétences de base en IA et de compétences en ingénierie IA nécessaires pour développer et utiliser ces modèles.

L'IA responsable est la compétence qui connaît la croissance la plus rapide parmi les professionnels des industries vertes, ce qui souligne à quel point ces derniers sont plus sensibles aux implications les plus larges de l'IA, non seulement du point de vue de l'énergie ou de l'empreinte carbone, mais aussi sur les plans éthique, sociétal et environnemental.

Lorsque l'on examine les compétences qui connaissent la croissance la plus rapide parmi les travailleurs formés à l'utilisation de l'IA de tous les secteurs (et pas seulement dans le secteur vert),

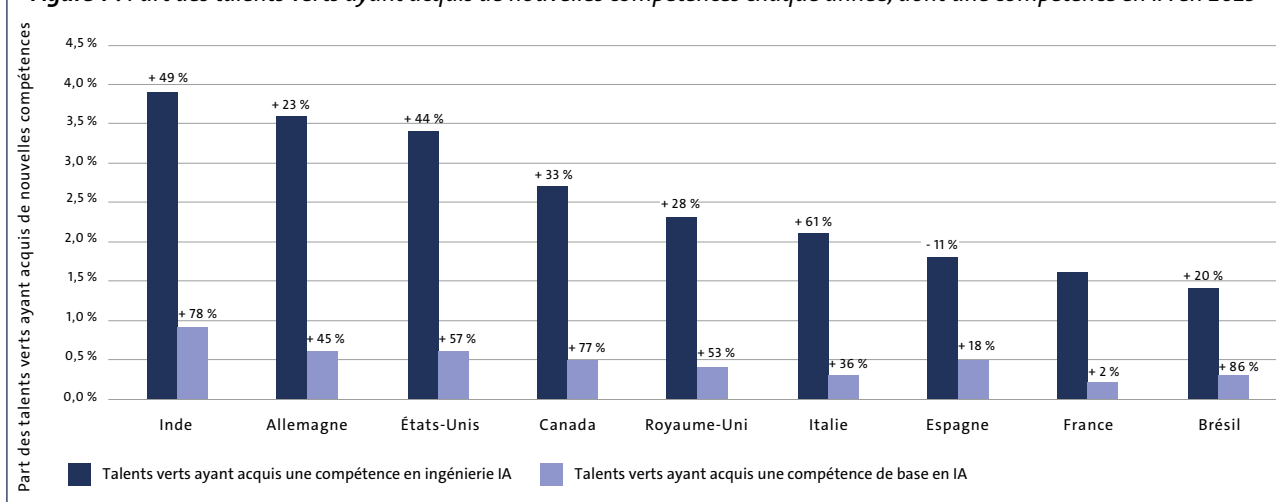
on constate une adoption rapide des agents IA, de la stratégie IA et de la productivité IA – des compétences qui font encore défaut chez les professionnels des industries vertes (voir Tableau 1).

Plusieurs raisons peuvent expliquer cet écart : le manque de formation aux dernières avancées de l'IA, le retard en maturité de l'ingénierie IA dans les secteurs verts, et le fait que les professionnels de ces secteurs sont encore en train de déterminer comment appliquer ces technologies à leurs besoins spécifiques.

Nous pouvons analyser les domaines dans lesquels les professionnels de ces industries concentrent leurs efforts de formation. La figure 1 montre ainsi ceux qui ont acquis une nouvelle compétence en 2025, et parmi ceux-ci, combien ont ajouté une compétence liée à

l'IA. Nous observons ainsi que la formation se concentre de plus en plus sur l'IA. Ce phénomène est particulièrement marqué en Inde, où 3,9 % des talents verts qui se sont perfectionnés en 2025 ont choisi le domaine de l'IA, soit une augmentation de 49 % par rapport à l'année précédente, suivie de près par l'Allemagne (3,6 %) et les États-Unis (3,4 %).

L'IA responsable est la compétence qui connaît la croissance la plus rapide parmi les professionnels des industries vertes

Figure 1 : Part des talents verts ayant acquis de nouvelles compétences chaque année, dont une compétence en IA en 2025

L'analyse se concentre sur les services publics et les énergies vertes, des secteurs clés pour la transition climatique où l'IA peut accélérer le développement de solutions durables. À partir des offres d'emploi publiées sur LinkedIn, l'étude montre une hausse de la demande de compétences en IA dans le secteur des services publics, qui comprend les entités fournissant de l'électricité, du gaz naturel, de la vapeur, de l'eau et des services d'assainissement. En 2024, 0,1 % des offres d'emploi dans le secteur des services publics aux États-Unis exigeaient des compétences en IA, soit une augmentation de 8 % par rapport à 2023 et de 83 % depuis 2022. Toutefois, malgré cette progression, la demande de compétences en IA dans ce secteur reste inférieure et croît moins rapidement que dans d'autres secteurs économiques.

En examinant l'offre de main-d'œuvre, on observe une nette progression du nombre de professionnels dotés de compétences en IA. À l'échelle mondiale, 2,2 % des professionnels des services publics possèdent des compétences en IA (+14 % d'augmentation annuelle). Par exemple, 2,1 % des travailleurs du service public possèdent des compétences en IA (+17 % depuis 2024) – ce qui est supérieur au secteur manufacturier (où 1,9 % des travailleurs possèdent des compétences en IA), au secteur pétrolier, gazier et minier (1,3 %) et au secteur de la construction (0,4 %). À titre de référence, cela constitue moins de la moitié de la part des talents en IA dans le secteur des technologies, de l'information et des médias aux États-Unis, qui représente 5,3 % du secteur. La figure 2 montre la proportion des talents en IA par pays dans plusieurs secteurs, notamment celui des services publics et celui des technologies, de l'information et des médias.

La proportion des travailleurs formés à l'IA dans les services publics varie selon les pays. Elle est la plus élevée aux Pays-Bas et au Luxembourg, où elle représente respectivement 4,0 % de chaque secteur des services publics, suivis de près par la France, où 3,5 % du secteur sont des talents en IA (*AI talent*). L'écart entre la concentration des talents en IA dans les services publics et dans

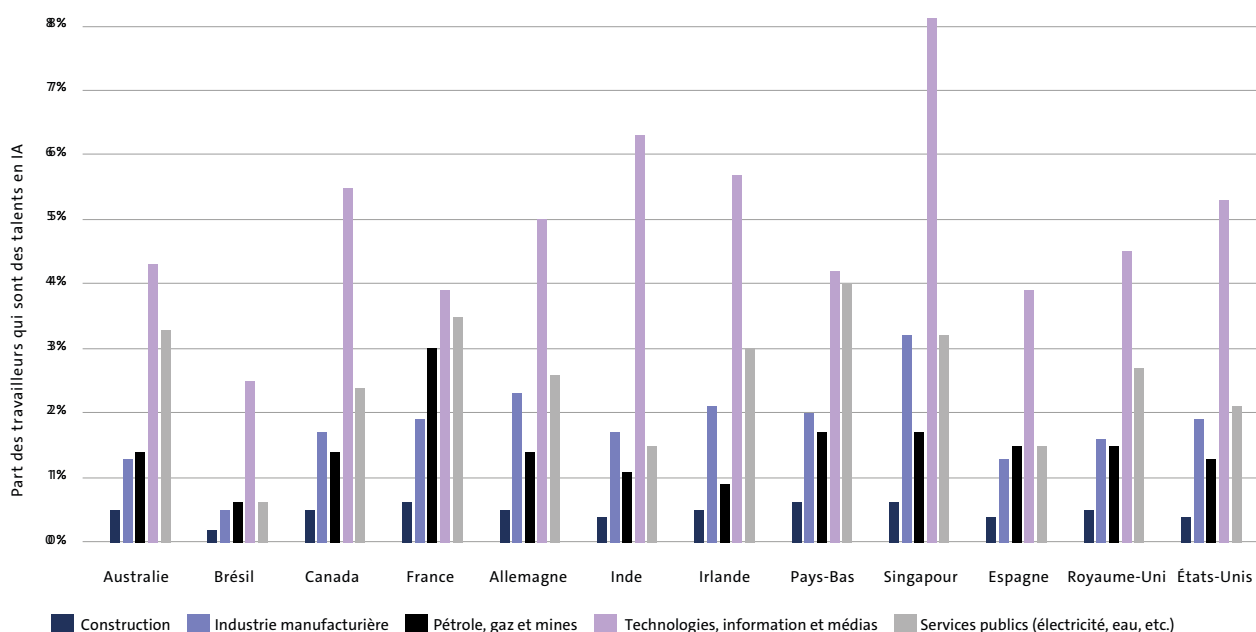
le secteur des technologies, de l'information et des médias dépend également des pays. Il est par exemple moins prononcé aux Pays-Bas, où 4,2 % des professionnels de la technologie sont des talents en IA, et en France (3,9 %).

Dans de nombreux pays, l'IA figure dans le top 50 des compétences les plus demandées dans le secteur des services publics, avec des classements particulièrement élevés en Autriche (n° 20) et à Singapour (n° 28). Cependant, seule Singapour a mentionné une autre compétence en IA, l'apprentissage automatique (n° 23), ce qui suggère que les compétences en IA ne sont pas encore perçues comme indispensables à l'échelle du secteur. Cependant, pour certaines professions spécialisées, les compétences en IA – notamment l'apprentissage automatique – occupent une place importante. Par exemple, l'apprentissage automatique est classé n° 16 pour les analystes énergétiques en Allemagne.

On constate une augmentation remarquable de la demande de travailleurs dans le secteur énergétique dotés de compétences écologiques, notamment pour les postes de spécialistes de l'énergie, de gestionnaires de l'énergie et d'analystes énergétiques, en particulier dans les économies les plus avancées telles que le Royaume-Uni, la Belgique, la France et la Suède. En Belgique, par exemple, les postes de spécialistes de l'énergie ont presque doublé d'une année sur l'autre (hausse de 92 %), tandis que la demande en spécialistes de l'énergie au Royaume-Uni a augmenté de 65 %. Cette tendance reflète la transition vers les énergies renouvelables et le besoin d'expertise en efficacité énergétique, intégration des systèmes, décarbonation et gestion durable de l'énergie. En revanche, la demande et le développement des compétences en IA dans le secteur restent limités, car les applications de l'IA sont encore émergentes et leur coût de mise en œuvre élevé. Le rapport 2024 de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), intitulé *Energy and AI*³, souligne ainsi le double besoin du secteur en matière d'expertise opérationnelle et numérique.

En examinant l'offre de main-d'œuvre, on observe une nette progression du nombre de professionnels dotés de compétences en IA. À l'échelle mondiale, 2,2 % des professionnels des services publics possèdent des compétences en IA (+14 % d'augmentation annuelle)

Figure 2 : Concentration des talents en IA par pays et par secteur



L'IA durable et la main-d'œuvre

Cette section aborde l'usage durable de l'IA, visant à réduire son impact climatique, notamment lié à la consommation d'énergie des centres de données et à la construction d'infrastructures.

Bien que l'IA apporte des bénéfices en termes d'automatisation et de résolution de problèmes complexes, sa puissance croissante entraîne des besoins énergétiques et matériels élevés. Il est donc crucial de former les travailleurs, tout au long de la chaîne d'approvisionnement, à des compétences en IA durable, telles que la programmation écoénergétique, la gestion éthique des données et la maîtrise des systèmes informatiques durables.

Pour identifier la main-d'œuvre en IA verte⁴, l'étude considère les utilisateurs LinkedIn ayant ajouté au moins deux compétences en IA et travaillant (ou ayant travaillé) dans ce domaine¹. Les compétences ajoutées sont analysées selon la taxonomie LinkedIn, incluant durabilité, ESG (Environnement, Social, Gouvernance) et optimisation des processus. Le tableau 2 présente les principales compétences écologiques des talents en IA à l'échelle mondiale ainsi que celles qui connaissent la croissance la plus rapide d'une année sur l'autre.

Les professionnels de l'IA maîtrisent des compétences telles que *Lean Six Sigma*, durabilité, optimisation des processus, gestion du cycle de vie des produits et efficacité opérationnelle. Ces compétences montrent que leur expertise va au-delà de la technique, en intégrant des méthodes visant à réduire l'impact environnemental et à optimiser l'usage des ressources.



Tableau 2 : Les compétences vertes les plus recherchées par les talents en IA à l'échelle mondiale et les compétences vertes les plus en vogue parmi les talents en IA à l'échelle mondiale (selon la croissance annuelle en 2024)

Classement	Compétences vertes les plus recherchées	Compétences vertes à la croissance la plus rapide (d'une année sur l'autre)
1	<i>Lean Six Sigma</i> ⁵	Efficacité opérationnelle (+ 579 %)
2	Durabilité	Maintenance et réparation (+ 190 %)
3	Optimisation des processus (fabrication)	Réparation d'ordinateurs (+ 159 %)
4	Gestion du cycle de vie des produits	Gestion du cycle de vie des produits (+ 152 %)
5	Efficacité opérationnelle	Environnement, social et gouvernance (+ 151 %)
6	Énergies renouvelables	Optimisation des processus (fabrication) (+ 132 %)
7	Environnement, social et gouvernance (ESG)	Environnement, santé et sécurité (+ 103 %)
8	Maintenance et réparation	<i>Lean Six Sigma</i> (+ 85 %)
9	Développement durable	Maintenance informatique (+ 81 %)
10	Réparation d'ordinateurs	Responsabilité sociale des entreprises (+ 81 %)

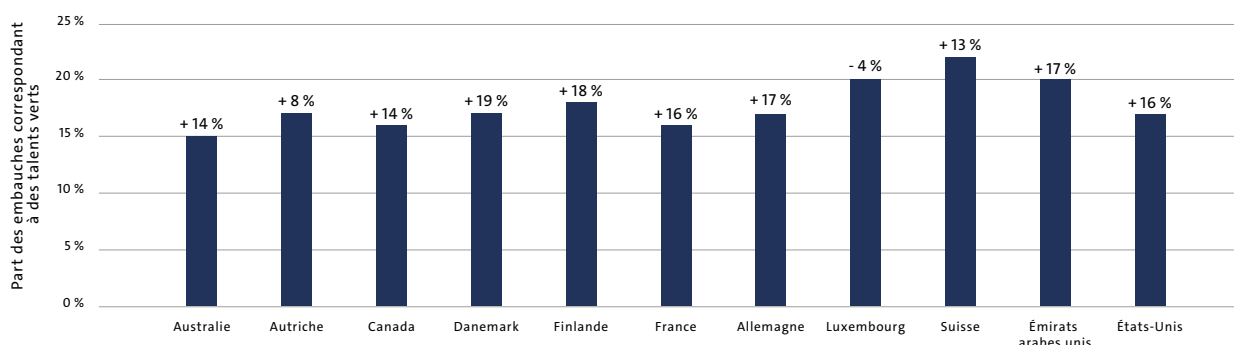
En 2024, les compétences vertes les plus rapidement acquises par les professionnels de l'IA concernent la prévention du gaspillage et la réparation. Comme indiqué dans le tableau 2, les croissances annuelles les plus marquantes sont : efficacité opérationnelle (+ 579 %), maintenance et réparation (+ 190 %), réparation d'ordinateurs (+ 159 %) et gestion du cycle de vie des produits (+ 152 %). L'adoption de compétences liées à la réparation et à la maintenance illustre un modèle d'utilisation des ressources qui s'inscrit dans une économie circulaire.

Les compétences liées à la politique environnementale, comme l'ESG (+ 151 %), l'environnement, la santé et la sécurité (+ 103 %) et la responsabilité sociale (+ 81 %), sont en forte croissance. Les professionnels de l'IA qui les possèdent peuvent favoriser l'innovation responsable, assurer la conformité aux exigences écologiques et contribuer à des solutions technologiques alignées sur la durabilité – renforçant ainsi leur valeur sur un marché de l'emploi en pleine évolution.

En nous concentrant sur le secteur technologique, qui concentre le plus grand nombre de spécialistes de l'IA (4,4 % au niveau mondial), nous observons comment l'industrie se verdit au fil du temps. Dans le secteur de la technologie, de l'information et des médias, qui regroupe le plus grand nombre de spécialistes de l'IA (4,4 % mondialement), la demande de talents verts a fortement augmenté entre 2023 et 2024 (selon le rapport mondial de LinkedIn sur les compétences vertes⁶) – avec une hausse de 60 % des emplois nécessitant des compétences vertes, portée par l'adoption croissante de l'IA et l'expansion des centres de données.

Nous analysons la part des embauches de travailleurs formés à la durabilité et aux compétences vertes dans le secteur de la technologie, de l'information et des médias, c'est-à-dire les membres LinkedIn qui ont explicitement ajouté au moins une compétence verte à leur profil et/ou qui occupent un emploi vert, et si cette part augmente d'année en année en 2025, afin de comprendre si le secteur se verdit (voir Figure 3). Aux États-Unis, la

Figure 3 : Part des embauches de talents verts dans le secteur de la technologie, de l'information et des médias en 2025 pour les parts les plus importantes par pays; annotée avec les données de croissance annuelle.



plus grande part des embauches de ces travailleurs se fait dans le secteur des services publics (36 % des embauches dans ce secteur au cours de l'année dernière concernaient des postes verts), mais ces derniers représentent toujours 17 % des embauches dans le secteur de la technologie, de l'information et des médias (+16 % d'une année sur l'autre). En Suisse, la proportion atteint 22 % (+13 % par rapport à l'année précédente).

L'IA durable inclut la construction et l'alimentation des centres de données, qui consomment beaucoup d'énergie et d'eau. Pour réduire leur impact environnemental, les compétences vertes deviennent essentielles pour les employés de ces centres, notamment la maintenance et la réparation, la maintenance préventive planifiée, la maintenance électrique et la mise hors service. Ces compétences figurent parmi les 50 plus recherchées pour les ingénieurs de centres de données dans plusieurs pays, avec une hausse notable de 31 % pour la maintenance et la réparation en 2024.

Comme l'essor des véhicules électriques, la croissance des centres de données exercera une pression sur les services publics, nécessitant de nouvelles infrastructures et stimulant la demande en énergie renouvelable. Cela favorisera l'emploi dans les domaines de la gestion de l'énergie, des compteurs intelligents, du stockage et de l'efficacité énergétique, sous l'encadrement de normes comme celles de la NERC aux États-Unis.

Les compétences vertes les plus recherchées reflètent la transition écologique des services publics et révèlent des différences nationales en matière de gestion des réseaux. Les États-Unis se démarquent par leurs compétences dans les domaines des marchés de l'énergie, du stockage et du photovoltaïque solaire. La demande de compétences en gestion des réseaux et en énergies renouvelables, notamment solaire et stockage à grande échelle, augmente également en 2025 en Australie, au Royaume-Uni, en Inde et au Canada, soulignant l'importance croissante de la flexibilité et de la résilience des réseaux.

En supposant qu'un centre de données soit entièrement alimenté par des énergies renouvelables, la principale source d'émissions réside dans le carbone libéré pendant la construction et incorporé dans les matériaux. Réduire leur impact climatique nécessite des innovations dans la science des matériaux, l'adoption de béton à faible teneur en carbone, d'acier recyclé et des conceptions de bâtiments plus économes. Sans progrès dans ces secteurs connexes, l'expansion des infrastructures numériques continuera de peser sur le climat malgré les avancées réalisées dans le domaine des énergies renouvelables.

Le secteur de la construction est en passe de bénéficier d'un afflux d'investissements liés au climat et occupe la deuxième place en termes de demande de travailleurs formés aux enjeux écologiques, où une offre d'emploi sur cinq (20,6 %) requiert des compétences vertes⁶. L'un des enjeux inclut la décarbonation de la fabrication de l'acier, du ciment ou du béton. La construction écologique, la durabilité, l'analyse du cycle de vie et la gestion environnementale sont devenues de plus en plus importantes, surtout dans les économies avancées comme les Pays-Bas et le Danemark, où la construction écologique et la durabilité font partie des objectifs les plus recherchés. En Allemagne, en Autriche et dans les pays nordiques, l'optimisation des processus et l'efficacité énergétique dans les secteurs de la construction et de la fabrication sont prioritaires.

Recommandations

En analysant l'offre de la main-d'œuvre à l'intersection de l'IA et de la durabilité, nous observons une double transition vers des technologies plus durables et une économie plus verte. Pour soutenir cette évolution, nous présentons des recommandations politiques afin de préparer les travailleurs à développer et à utiliser l'IA pour un avenir durable.

Former et établir des normes de durabilité pour le développement de l'IA : à mesure que l'IA progresse, la durabilité, l'optimisation des processus et l'efficacité opérationnelle permettent d'allier innovation technologique et responsabilité environnementale. Les travailleurs formés à l'IA acquièrent des compétences liées à l'économie circulaire, mais ils restent minoritaires. Les décideurs politiques et les entreprises devraient donc privilégier la formation et la mise en

place de normes de durabilité pour le développement de l'IA.

Promouvoir la formation au numérique et à l'IA dans les secteurs des services publics et de l'énergie verte : dans les services publics et l'énergie verte, l'adoption de l'IA progresse mais reste limitée. Il est essentiel de développer la formation à la culture numérique et à l'IA pour stimuler l'innovation, identifier des cas d'usage à fort impact et assurer une mise en œuvre efficace. Afin d'accélérer la transition du secteur, il faudrait intégrer ces formations au sein des entreprises, des cursus éducatifs et des certifications.

Développer les compétences en matière de durabilité parmi les travailleurs des centres de données : les travailleurs des centres de données se forment dans les domaines écologiques, tels que la maintenance, la réparation et la gestion de l'énergie, dans des pays comme l'Irlande, les Pays-Bas, les Émirats arabes unis et le Royaume-Uni. L'expansion des centres de données, combinée à



celle des véhicules électriques, accroît la demande en énergies renouvelables et en compétences liées à la gestion des réseaux, à l'efficacité énergétique et au stockage. Il est essentiel d'identifier et de soutenir ces compétences écologiques émergentes pour aligner la durabilité opérationnelle sur la croissance technologique et les capacités des centres de données.

Favoriser la collaboration tout au long de la chaîne d'approvisionnement et de valeur de l'IA : réduire l'empreinte carbone de l'IA nécessite une collaboration sur toute la chaîne de valeur : des industries en amont à faibles émissions (acier, ciment) aux secteurs en aval prolongeant la durée de vie des équipements (puces et serveurs). Cela implique une formation coordonnée de la main-d'œuvre, notamment en matériaux durables, conception circulaire et gestion du cycle de vie. Les décideurs politiques devraient encourager les partenariats intersectoriels et investir dans des programmes de formation permettant aux travailleurs de s'adapter à de nouveaux rôles dans un écosystème d'IA décarboné.

Conclusion

L'IA et la transition écologique transforment la main-d'œuvre mondiale en favorisant des profils hybrides combinant compétences numériques, IA et durabilité. Pour que l'IA soutienne la transition écologique et accélère l'économie verte, les enjeux environnementaux doivent être intégrés dès son développement. Des formations ciblées, le perfectionnement des compétences et des normes claires en matière de durabilité aideront les travailleurs à s'adapter aux nouvelles opportunités offertes par l'IA, les services publics et les centres de données, tout en contribuant à la réalisation des objectifs climatiques. Les décideurs politiques, les entreprises et les éducateurs pourront ainsi former une main-d'œuvre résiliente et tournée vers le futur, capable de maximiser le potentiel de l'IA pour un avenir durable.



À propos de l'auteure

Rosie Hood est responsable scientifique des données pour la région EMEA (*Europe Middle East & Africa*) de l'*Economic Graph Research Institute* de LinkedIn et directrice mondiale du programme *Data for Impact*, qui fournit aux gouvernements et aux partenaires multilatéraux les informations dont ils ont besoin pour prendre des décisions éclairées et investir dans des programmes créant des opportunités économiques pour la main-d'œuvre mondiale. Au sein de l'*Economic Graph Research Institute*, les recherches de Rosie se concentrent sur l'élaboration de nouveaux modèles statistiques sur les questions d'équité, l'IA, l'économie verte et le marché du travail.

Repenser les compétences, l'IA et l'avenir du travail en Afrique

Nanjira Sambuli

Fondation Carnegie pour la paix internationale

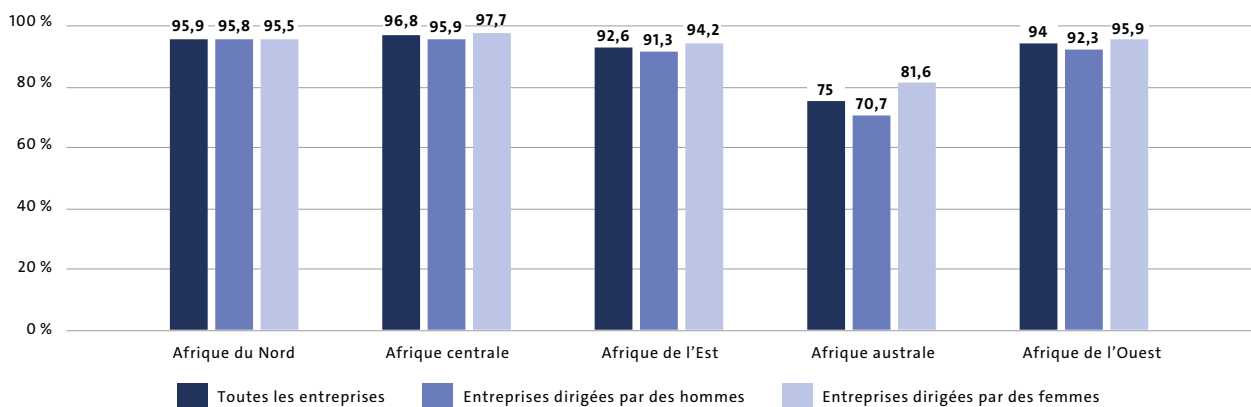
Enthousiasme et inquiétude animent les discussions au sujet de l'intelligence artificielle (IA) en Afrique. Si certains y voient une possibilité de créer de l'activité économique, d'autres craignent que son développement ne provoque une nouvelle fracture numérique, laissant les Africains à la traîne. Mais la dynamique actuelle et les aspirations futures convergent : la transformation numérique joue et jouera un rôle clé dans le développement socio-économique du continent. Les discussions politiques doivent être éclairées par des analyses contextuelles sur la manière dont la jeunesse africaine peut être mise à profit, sur le rôle de l'éducation formelle et informelle, sur la transmission des compétences et sur le type d'emplois accessibles à la majorité de la population. Cet article examine certains des récits dominants concernant la formation et l'emploi pour la main-d'œuvre africaine actuelle et future, afin de situer le rôle que l'IA peut jouer dans la réalisation des grands objectifs de politique publique et de développement du continent. L'IA semble pouvoir aider à tirer parti de la vigueur démographique du continent et à favoriser une croissance économique durable.



Introduction

L'Afrique est le continent le plus jeune au monde¹ et la population active devrait augmenter de 70 % (soit 450 millions de personnes) d'ici 2035². D'ici là, le développement et la diffusion rapides de l'IA devraient transformer la nature du travail. Toutefois, même si l'IA aura un impact majeur sur le marché du travail formel, il faut rappeler qu'en Afrique, huit travailleurs sur dix exercent un emploi informel³. Il s'agit d'activités économiques ni réglementées ni imposées par le gouvernement, et qui offrent une couverture sociale limitée. Et alors que 10 à 12 millions de jeunes entrent chaque année sur le marché du travail en Afrique, seuls environ 3 millions de nouveaux emplois sont créés dans le secteur formel⁴. Dans ce contexte, la question de savoir si, et de quelle manière, l'IA influencera l'avenir du travail pour cette main-d'œuvre africaine en pleine expansion constitue un enjeu politique majeur.

Figure 1 : Pourcentage d'entreprises informelles par rapport au nombre total d'entreprises, selon le sexe du propriétaire (%)



Source : OIT, Femmes et hommes dans l'économie informelle : une mise à jour statistique (2023)⁵.



Discours populaires sur les compétences, l'entrepreneuriat et l'emploi en Afrique

Les questions relatives aux compétences reviennent dans la plupart des discours sur le développement en Afrique. Elles sont généralement formulées en termes de manque et de besoin, ce qui donne lieu à des appels à l'action et à une multitude d'initiatives de formation. Cela peut s'expliquer par les difficultés persistantes que rencontre le continent à offrir une éducation formelle abordable et de qualité, alors que plus de 100 millions d'enfants sont exclus du système éducatif formel en Afrique⁶. L'éducation informelle, qui trouve ses racines dans les sociétés africaines indigènes, reste un levier essentiel de transmission des connaissances et offre une alternative importante, sans doute sous-estimée, à l'apprentissage scolaire. Le plus grand secteur d'emploi du continent est également informel, intégrant même la main-d'œuvre qualifiée, faute d'opportunités suffisantes dans le secteur formel. Les réalités difficiles et complexes entourant l'éducation sur le continent ont peut-être fait naître, chez certains, l'idée que les Africains seraient « insuffisamment qualifiés » – alors même qu'ils font preuve d'ingéniosité, d'innovation et de résilience, en particulier dans les économies informelles où la majorité évolue.

La dichotomie entre compétences « élevées » et « faibles », où les premières seraient associées à l'enseignement supérieur et les secondes au travail manuel, reflète des croyances et des discours anciens, mais de plus en plus critiqués, et qui ont de graves implications politiques⁷.

Les « formations aux compétences numériques » sont souvent recommandées et mises en œuvre pour transmettre des connaissances techniques, mais aussi stimuler la consommation, l'utilisation, la production et l'innovation via les technologies numériques. Les efforts dans ce domaine ciblent généralement des individus ou des groupes sociaux comme les femmes, les jeunes et d'autres communautés marginalisées, et sont adaptés aux différents niveaux d'éducation. Le renforcement des capacités, quant à lui, désigne la capacité des gouvernements et autres institutions formelles à adopter et à utiliser les nouvelles technologies. Dans ce cas, il s'agit de développer ou de réformer les politiques, les lois et les réglementations pour les adapter aux nouveaux enjeux numériques. Actuellement, l'entrepreneuriat est présenté comme la panacée de la création d'emplois et de la croissance économique en Afrique, en particulier à l'ère numérique.

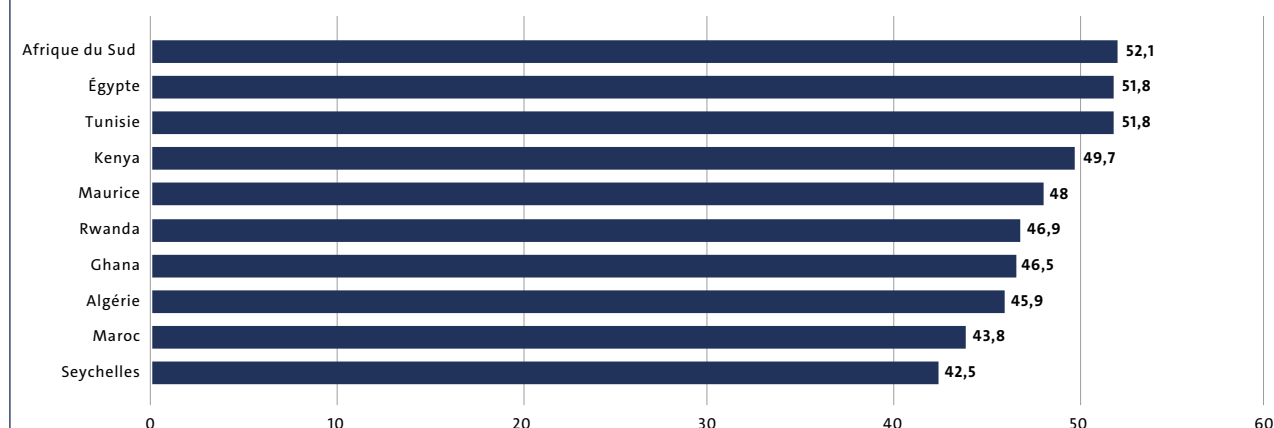
Les micro, petites et moyennes entreprises (MPME) représentent jusqu'à 90 % des entreprises africaines et constituent une source majeure d'emploi⁸. Les jeunes et les femmes, en particulier, sont encouragés à devenir entrepreneurs dans le domaine des MPME, vu comme une alternative à la recherche d'un emploi formel. Le numérique est désormais considéré comme l'une des voies majeures conduisant à la création d'entreprises, en réduisant les barrières à l'entrée et en créant de nouvelles niches de marché. Les initiatives de développement des compétences numériques destinées aux femmes et aux jeunes visent généralement à renforcer leur capacité à concevoir et à développer des innovations rentables (*bankable*) qui répondent aux enjeux sociaux et environnementaux actuels. L'entrepreneuriat social a pris de l'importance. Il est vu comme un levier politique pour créer des emplois et promouvoir l'inclusion, tant au sein de l'Afrique que dans l'économie mondiale⁹, en combinant le meilleur des technologies numériques et des objectifs de développement durable sur le continent¹⁰.

Aperçu de la dynamique de l'offre et de la demande en matière de compétences en IA en Afrique

Le développement des compétences est fondamental pour concrétiser le potentiel numérique, largement vanté, de l'économie numérique africaine. Pour y parvenir, les appels en faveur de la formation, du perfectionnement et de la reconversion des Africains se font de plus en plus pressants dans les milieux publics, privés, philanthropiques et auprès des investisseurs¹¹.

Il est également recommandé de développer les « capacités en matière d'IA » aux niveaux national, régional et continental. Plusieurs mesures sont mises en place en ce sens : la garantie d'accès à une offre de formations et de moyens d'apprentissage tout au long de la vie, l'élargissement de l'accès aux infrastructures, aux outils et aux ressources numériques et d'IA, l'application de politiques publiques qui soutiennent le développement et l'utilisation d'une IA centrée sur l'humain¹². Cela se reflète dans l'*AI Talent Readiness Index* (Indice de compétences en IA) développé par Qhala, un cabinet de conseil panafricain spécialisé dans le numérique. Cet indice évalue la « capacité des pays africains à développer, requalifier et déployer les talents en IA » et mesure cette capacité à travers les compétences numériques, les données et les infrastructures, ainsi que la préparation des gouvernements.

Figure 2 : Graphique des 10 premiers pays au classement général de l'AI Talent Readiness Index for Africa de Qhala (2025)



Source : Qhala et Qubit Hub (2025)¹³.

Il n'existe pas de définition universelle des « compétences en IA », mais différents acteurs ont défini des niveaux et des indicateurs pour les évaluer. Dans son rapport *AI Sprinters*, Google définit trois niveaux de compétence (« maîtrise de l'IA ») pour une main-d'œuvre prête à utiliser l'IA, à savoir : les *AI Learners* (Apprenants en IA), qui possèdent des connaissances de base en IA ; les *AI Implementers* (Programmeurs IA), capables de tirer parti des outils d'IA et de

les adapter dans leur travail ; et les *AI Innovators* (Innovateurs IA), qui disposent d'une expertise technique approfondie et peuvent influencer l'évolution de la technologie. L'indice de compétences en IA de Qhala, quant à lui, propose un ensemble plus complet d'indicateurs pour évaluer les compétences numériques dans le contexte d'un pays.

Ces indicateurs sont le taux d'alphabétisation des adultes, le nombre de travailleurs ayant suivi des études supérieures, les compétences en technologies de l'information et de la communication (TIC), les compétences numériques dans le système éducatif (du primaire à l'enseignement supérieur), la proportion de femmes diplômées dans les domaines des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques (STEM), le pourcentage de la population active travaillant dans l'économie de plateformes (*gig economy*), le nombre de développeurs de logiciels professionnels par million d'habitants et le nombre d'institutions d'enseignement supérieur proposant des formations en IA ou en apprentissage automatique¹⁵.

À mesure que la diffusion de l'IA, et en particulier de l'IA générative, gagne du terrain, les appels en faveur des « compétences en IA » se font de plus en plus pressants. Pour certains milieux, elles sont considérées comme faisant simplement partie des *STEM*, des capacités de recherche et développement (R&D) et du développement des compétences numériques¹⁶. Pour d'autres, les compétences en IA exigent des changements spécifiques. Le codage, par exemple, est promu comme une « compétence de base à l'ère numérique ». En conséquence, de nombreuses initiatives en matière de compétences numériques sur le continent au cours des deux dernières décennies ont mis l'accent sur ce point. Cependant, avec le passage de l'IA générative à l'IA agentive, nous avons besoin de « compétences de préparation à l'IA » plus nuancées, exigeant une réorganisation structurelle au-delà du simple développement de compétences individuelles¹⁷.

La formation est-elle suffisante ?

D'ici 2030, la moitié des nouveaux entrants sur le marché du travail mondial sera constituée de jeunes africains, ce qui nécessitera la création de 15 millions de nouveaux emplois par an¹⁸. Face à ce défi, la mise en place d'une politique de formation ne résoudra pas en soi le manque d'emplois permettant de mettre ces compétences en pratique. Et la qualité de ces emplois compte tout autant que leur quantité. Puisque l'IA est sur le point de bouleverser les emplois du secteur formel, il est impératif que les parties prenantes africaines examinent en profondeur ce que ce changement annonce. Et cela, non seulement pour la création d'emplois, mais aussi en termes de politiques publiques, pour permettre aux entreprises de se développer de manière durable et de générer des emplois. Certains secteurs, comme l'agriculture, qui mobilisent une grande partie de la main-d'œuvre du continent, pourraient être réorganisés pour accroître leur productivité et exploiter l'IA dans les domaines où elle est utile. Mais pour cela, il faut s'attaquer aux contraintes structurelles qui empêchent la croissance et le maintien des secteurs agricoles dynamiques, notamment en améliorant les chaînes de création de valeur. L'Afrique doit envisager à la fois le développement des secteurs traditionnels et l'adoption des technologies émergentes comme l'IA. Si les compétences et les outils liés à l'IA sont importants, les routes, l'électricité, la connexion Internet omniprésente et d'autres infrastructures le sont tout autant, ainsi que les réformes politiques, réglementaires et législatives permettant à l'entrepreneuriat de prospérer dans les secteurs formels comme informels.

Il est donc essentiel de reformuler la question des compétences – de l'analogique à l'IA – dans le contexte sociopolitique, économique et culturel de l'Afrique. S'il est vrai qu'il existe un manque de formation dans le domaine de l'IA, on ne peut pas réduire l'ensemble du paysage des compétences et des talents sur le continent à ce seul critère. Il existe une grande diversité de compétences, telles des connaissances culturelles et contextuelles approfondies, qui sont également déterminantes pour guider l'utilisation des outils d'IA les plus avancés et qui ne figurent pas (encore) dans les corpus généraux servant à entraîner les modèles actuels. Enfin, il est crucial de repenser notre approche

du développement des compétences : faut-il considérer que ce sont les emplois qui créent les compétences, ou que ce sont les compétences qui créent les emplois ?

L'IA, le présent et l'avenir du travail en Afrique : mise au point sur l'économie informelle

Plus de 80 % des emplois en Afrique sont informels, ce qui représente le taux le plus élevé au monde¹⁹. Si le secteur informel est une source majeure de revenus et d'emplois pour les personnes considérées comme « peu qualifiées », c'est aussi là que de nombreux jeunes demandeurs d'emploi du continent trouvent leur place, y compris ceux qui ont fait des études supérieures, en raison des opportunités limitées dans le secteur formel. Les femmes y sont « disproportionnellement surreprésentées » dans les économies informelles africaines²⁰, en partie à cause de normes de genre défavorables et de lois discriminatoires, qui limitent leur accès à l'éducation et aux opportunités dans le secteur formel.

Comme l'ont récemment souligné, à juste titre, les organisations internationales, les discours politiques autour du travail informel en Afrique doivent faire l'objet d'un changement de paradigme. Plutôt que de rejeter et de percevoir ce type de travail comme une menace à contrôler ou à éliminer, il faut soutenir et financer ce secteur pour garantir une transformation économique structurelle et inclusive²¹.

Cette démarche est nécessaire pour évaluer les impacts de l'IA sur le travail d'aujourd'hui et de demain sur un continent où la majorité des emplois relèvent du secteur informel – échappant ainsi aux cadres habituels des analyses sur les technologies numériques et émergentes. Il faut repenser les compétences nécessaires, leur valeur sur le marché du travail, les perspectives d'opportunités et les possibles interventions des pouvoirs publics. Il est également important de mesurer les compétences numériques en Afrique tout en intégrant celles déjà employées dans le secteur de l'IA. Par exemple, des milliers de jeunes Africains travaillant dans des conditions difficiles ont contribué au succès de modèles d'IA générative²², et cela bien qu'ils soient méconnus des grands acteurs technologiques et soumis à des conditions de travail précaires, sous prétexte de ne pas perturber le marché du travail²³.

L'un des arguments avancés est que, plutôt que dans des emplois à temps plein du secteur formel, l'avenir du travail en Afrique résidera dans des entités hybrides, au sein desquelles les individus occuperont plusieurs emplois²⁴. C'est déjà le cas, en partie grâce aux progrès

de la numérisation. Les employeurs sont incités à recruter des spécialistes de manière ponctuelle, plutôt que des employés à temps plein, ce qui améliorerait l'accès au travail des femmes, des jeunes, des personnes handicapées et des groupes marginalisés²⁵. En réponse à cette situation, le rôle de l'IA serait, idéalement, de soutenir un travail décent et productif, formel ou informel. Les outils d'IA générative, par exemple, peuvent améliorer le développement de certains outils commerciaux, comme l'analyse prédictive, la comptabilité, l'automatisation du service client et des communications. Cette aide précieuse pourrait favoriser le passage des entreprises du modèle informel au modèle formel, et leur permettre de se concentrer sur le développement de leurs offres et leurs propositions de valeur uniques. Les compétences nécessaires à l'utilisation de ces outils relèveraient de la catégorie « compétences de base en IA », avec l'avantage de pouvoir facilement personnaliser ces outils, de tirer parti de la reconnaissance vocale et de les utiliser dans plusieurs langues.

Il est également important de garder à l'esprit que si le secteur informel est considéré comme un « secteur à faible productivité », son dynamisme tient au fait qu'il crée des emplois qui ne

L'IA peut-elle transformer le concept « d'informalité comme tremplin », soit en contribuant à la formalisation, soit en tant qu'« environnement expérimental peu coûteux » pour les entrepreneurs, soit pour le modifier radicalement ?



peuvent pas être facilement automatisés. Mais même pour ceux qui peuvent l'être, le secteur informel maintient la dimension relationnelle, essentielle aux relations sociales et économiques africaines, que les machines ne peuvent reproduire ni remplacer. En outre, il existe des formes uniques de connaissances et de savoir-faire qui sont propres à la nature informelle du travail et qui ne sont peut-être pas encore facilement accessibles aux modèles d'IA susceptibles de remplacer ces emplois et ces travailleurs. Dans un tel paradigme, déterminer si et comment l'IA peut améliorer la productivité dans ces secteurs d'activité, plutôt que de les remplacer complètement, sera un facteur déterminant pour le succès de toute intervention numérique ou basée sur l'IA. Les efforts déployés ces dernières années pour numériser certains secteurs et les chaînes de valeur ont assurément mis en évidence la résilience du secteur informel et la nécessité de mieux le comprendre avant de tenter de le renforcer numériquement. Par exemple, bien que les technologies financières et l'inclusion financière numérique aient gagné en popularité sur le continent, les agents – des « microentrepreneurs » intégrés dans des communautés financièrement défavorisées qui sont autorisés à faciliter des transactions (habituellement effectuées hors ligne) pour le compte des prestataires de services²⁶ – restent un moteur essentiel de la fidélisation clients, que ce soit pour les systèmes de paiement mobile²⁷ ou les services bancaires²⁸. De même, dans le domaine du e-commerce, la nature « informelle » des relations de travail et du travail en lui-même a obligé les start-ups opérant sur le continent à faire appel à des agents qui guident les nouveaux acheteurs – qu'il s'agisse de ceux qui sont sceptiques à l'égard des transactions en ligne ou de ceux qui ne disposent pas d'appareils connectés à Internet pour effectuer des achats, en particulier dans les zones rurales²⁹. En d'autres termes, les structures sociales qui soutiennent les secteurs informels en Afrique³⁰ – y compris la manière dont la productivité est organisée³¹ – nécessitent une étude approfondie. Une meilleure compréhension est essentielle pour orienter les innovations en IA et les stratégies de gouvernance dans ce secteur clé de l'économie africaine.

Plutôt que d'avancer des affirmations générales sur le potentiel disruptif de l'IA, nous devrions nous demander, avec humilité et curiosité, ce que l'IA peut apporter au secteur informel africain. L'IA, conformément au changement de discours politique proposé, pourrait-elle aider « l'informalité à servir de tremplin » vers la formalisation²⁴, ou constituer un environnement expérimental à faible coût pour les entrepreneurs³², voire le révolutionner complètement ? Comment les gains d'efficacité et de productivité que l'IA est censée offrir peuvent-ils devenir pertinents et impactants dans ces paradigmes de travail ? L'IA peut-elle favoriser des protections sociales et juridiques (salaire minimum, espaces de travail sûrs) pour les travailleurs du secteur informel et améliorer ainsi leurs conditions de vie ? Comment ces travailleurs seront-ils associés aux discussions et aux réflexions sur le rôle de l'IA ? Il faudra nécessairement mettre en place des politiques avec les personnes et les entreprises de ce secteur, plutôt que de les créer pour elles.

S'il existe un risque de fracture numérique en Afrique, où les Africains seraient laissés pour compte, ce ne sera pas parce qu'ils ne sont pas compétents, mais parce que les politiques publiques ont mal diagnostiqué le problème



Conclusion

Étant donné le rôle clé du secteur informel sur le marché du travail africain, il est important d'examiner l'impact de l'IA, qui ne suit pas forcément les idées reçues sur la formation et l'avenir du travail. Les initiatives de formation et les réformes éducatives ne représentent qu'une partie de l'équation – et de nombreuses initiatives numériques et liées à l'IA existent déjà dans ce domaine. Cependant, l'autre partie, tout aussi déterminante, concerne l'accès à des emplois de qualité et réellement porteurs, qui mérite une réflexion approfondie et une réorientation des politiques publiques. Redoubler d'efforts pour former les Africains, sans s'attaquer de manière substantielle aux obstacles à la création et au maintien d'entreprises (qu'elles utilisent l'IA ou pas) et d'emplois, relève d'un mirage politique qui sape les ambitions de développement locales, régionales et continentales. Malgré les appels encourageant les jeunes Africains à se lancer dans l'entrepreneuriat, des défis importants demeurent – en matière de politiques publiques, de gouvernance, de réglementation et de dynamiques socioculturelles – et limitent les possibilités de croissance et de durabilité. Le fait que la plupart des travailleurs africains – même ceux qui sont hautement qualifiés et diplômés – finissent par travailler dans le secteur informel révèle que le continent ne souffre pas d'un problème de compétences, mais d'un problème d'emplois. Réformer les mécanismes de création d'emplois et de développement des entreprises ouvrira la voie pour que l'IA puisse déployer son plein potentiel, que ce soit dans le secteur formel ou informel. S'il existe un risque de fracture numérique lié à l'IA, qui laisserait les Africains à la traîne, ce ne sera pas parce qu'ils ne sont pas qualifiés, mais parce que les politiques publiques et la gouvernance auront mal diagnostiqué la nature du problème.

À propos de l'auteure

Nanjira Sambuli est chercheuse, analyste politique et stratège. Elle étudie la numérisation et ses conséquences sous le prisme de l'inégalité des sexes. Elle est aussi spécialiste de l'adoption des ICT (*Information and Communication Technology*) par les responsables politiques et dans les domaines de la diplomatie, des médias, de l'entrepreneuriat et de la culture. Ses recherches portent essentiellement sur le continent africain.

Nanjira est chercheuse non résidente (et anciennement membre) du programme Technologie et affaires internationales de la Fondation Carnegie pour la paix internationale, et membre du Ford Global Fellowship. Elle siège au sein de plusieurs comités consultatifs et a dirigé les démarches en faveur de l'égalité numérique au sein de la World Wide Web Foundation, ainsi que la recherche sur l'innovation technologique à l'iHub de Nairobi.

Former à l'intelligence artificielle chez Veolia

Défis et stratégie

Anne Du Crest
Veolia

Mélanie Macé
Veolia

Morgane Vidal
Renault (ex Veolia)

Cet article analyse les effets de l'intelligence artificielle (IA) sur les métiers, les compétences et l'organisation du travail chez Veolia, dans un contexte de transformations rapides des entreprises. Une étude prospective met en évidence trois dynamiques majeures : l'évolution des pratiques professionnelles, l'automatisation accélérée des fonctions supports et la mutation progressive des environnements industriels.

Face à ces mutations, Veolia a engagé une stratégie ambitieuse de formation visant 100 % des collaborateurs à l'horizon 2027. Celle-ci repose sur un déploiement progressif, un réseau de champions et une gouvernance renforcée. L'approche articule acculturation, responsabilisation et adoption de cas d'usage concrets. Elle vise à mettre l'IA au service de la performance collective et de la transformation écologique.

Introduction

L'ampleur des répercussions, effectives ou attendues, de l'IA sur les organisations, les métiers et les compétences est aujourd'hui particulièrement forte. Plus de 85 % des entreprises s'attendent à une transformation profonde de leurs processus d'ici 2030¹, et près de 30 % des heures de travail pourraient être automatisées dans les cinq prochaines années². Conséquence directe : au moins 60 % des employés devront être formés à l'IA d'ici 2030¹.

Face aux interrogations apparues dès 2024 au sein des directions des ressources humaines, des collaborateurs et des partenaires sociaux, Veolia a cherché à d'une part mieux comprendre les impacts de l'IA sur les métiers et les compétences puis de lancer une ambitieuse stratégie de formation.

L'impact de l'IA sur les métiers et les compétences chez Veolia

Une étude prospective a été conduite, croisant analyses quantitatives et qualitatives externes et regards d'experts internes pour disposer d'une analyse factuelle et mesurer les conséquences de l'IA. Cette démarche visait ainsi à définir une position claire sur l'impact de l'IA sur les métiers et les compétences, à établir des clés de compréhension communes et à poser des orientations pour préparer l'accompagnement des collaborateurs. Trois grands constats en sont ressortis.

Le premier est que l'IA impacte non seulement les métiers, mais aussi les façons de travailler, d'interagir et d'évoluer au sein de l'entreprise.

Le deuxième est l'évolution particulièrement rapide des fonctions supports, autant sur le marché qu'au sein du Groupe, où les études externes montrent un potentiel d'automatisation élevé à court-moyen terme.

Le troisième concerne la manière dont l'IA redéfinit progressivement les environnements industriels et les modes de collaboration associés.

La Transformation des façons de travailler avec l'IA

Dans chaque métier, l'IA transforme certaines tâches : certaines sont augmentées, d'autres automatisées, d'autres encore apparaissent ou demeurent identiques. C'est la combinaison de ces évolutions qui permet de caractériser le niveau d'exposition d'un métier à l'IA et les besoins d'accompagnement associés.

Au-delà de l'impact sur les tâches individuelles, l'enjeu réside désormais dans la capacité à générer de la performance collective en intégrant ces évolutions dans des processus de bout en bout. Cette dynamique, accélérée par l'IA agentic, modifie en profondeur les rôles et l'organisation du travail. C'est cette transformation qu'il faut préparer aujourd'hui en dépassant l'expérimentation de cas d'usages isolés et en repensant les processus de l'entreprise.

L'IA bouleverse le rapport traditionnel à la connaissance et à l'expertise. En particulier, la transmission des savoirs entre profils seniors et juniors est remise en question. Désormais, les profils juniors se tournent spontanément vers l'IA pour trouver des réponses à leurs interrogations – avant de solliciter un



interlocuteur humain plus expérimenté. Parallèlement, les seniors délèguent de plus en plus leurs tâches basiques à l'IA, privant ainsi les juniors des opportunités d'apprentissage « sur le tas » qui constituaient traditionnellement leur principale voie de formation. Ces nouveaux usages peuvent non seulement accentuer certaines fractures générationnelles, mais ils remettent aussi en cause la façon dont est conçue la formation des profils juniors.

Plus largement, toutes les interactions basées sur le partage d'expertise sont susceptibles de se transformer : si l'IA nous apporte les réponses dont nous avons besoin immédiatement, pourquoi prendre le temps de demander à notre collègue expert d'un autre département ? Ou même au sein de notre propre équipe ? C'est donc toute la dynamique de collaboration au sein de l'espace de travail (et dans la société) qui est amenée à évoluer.

Ces évolutions reconfigurent également le management au quotidien et confrontent les managers à de nouveaux défis : encadrer les usages de l'IA pour garantir la conformité et le contrôle qualité des tâches réalisées, prévenir les dérives et risques liés à l'IA (notamment en matière de santé mentale), mais aussi maintenir une dynamique collective de collaboration. En d'autres termes, l'on pourrait dire que l'intelligence n'est pas artificielle mais collective avant tout.

L'impact sur les fonctions supports

Les fonctions supports présentent un potentiel d'automatisation très élevé : plus de 65 % des tâches des métiers de l'IT, de la finance et des services clients pourraient fortement évoluer à court ou moyen terme³. Au sein du Groupe, la diffusion rapide de Veolia Secure GPT dès 2023 a permis l'expérimentation accélérée de nombreux cas d'usage. En parallèle, les cas d'application de l'IA les plus fréquents sur le marché commencent à être intégrés dans les solutions SaaS du marché, déjà déployées à large échelle sur les fonctions support. Cela va donc permettre une diffusion rapide de ces cas d'usage. L'enjeu d'accompagnement sur ces métiers est donc avant tout de former rapidement les collaborateurs aux bons usages de l'IA, en renforçant la culture de la donnée, mais aussi en sensibilisant aux limites de l'IA. Ces fondamentaux sont essentiels pour nous permettre de préparer la transition³, qui constituera, demain, le futur du travail.

Focus – Mesurer l'impact de l'IA sur les métiers

Dans le cadre des travaux prospectifs menés par Veolia, trois paramètres ont été particulièrement utilisés pour mesurer l'impact de l'IA sur les différents métiers :

- 1) Le niveau d'impact de l'IA sur la famille de métiers (*AI exposure*) en termes de potentiel d'augmentation et d'automatisation des tâches d'un métier. Cette définition du niveau d'impact s'appuie sur les travaux du World Economic Forum.
- 2) Le potentiel de création de valeur de ces transformations en termes de performance, de croissance et sur le plan humain ;
- 3) Enfin, le rythme des transformations attendues : rapide (dans l'année), moyen (à horizon 2027) ou lent (à horizon 2030)

La façon dont l'IA redessine l'éco-système industriel

L'IA redessine le monde industriel : cela se perçoit déjà dans les industries ayant mené les vagues précédentes de digitalisation et ayant déployé des infrastructures de données et d'IoT industriel à large échelle comme l'automobile, l'aéronautique, ou encore l'industrie pharmaceutique, etc. L'ajout de la couche IA conversationnelle et IA agentique s'appuie directement sur ces fondamentaux digitaux.

Veolia, comme la plupart des entreprises du secteur de l'énergie et des utilities, a bien sûr commencé cette transformation des opérations et déployé des premiers cas d'usage de l'IA appliqués aux opérations. Ces cas d'application concernent autant de nouveaux services créateurs de valeur pour les clients que des bénéfices directs pour les « opérateurs augmentés » : prévention des risques de sécurité, amélioration des conditions de travail, accès facilité à de nouvelles opportunités de carrière grâce à l'assistance pour des tâches de rédaction ou de traduction, etc.

Si le potentiel de l'IA dans les opérations et la volonté de Veolia de se positionner comme un leader dans ce domaine ne font aucun doute, la transformation sera plus progressive dans les fonctions supports, car elle requiert des moyens financiers et humains importants. Ces investissements sont en cours : mise en place des infrastructures data et digitales, capture et mise en qualité des données, évolution des modèles économiques et contractuels, etc.

L'accompagnement humain doit se faire tout au long de ces évolutions pour préparer les opérateurs. Cela passe par l'accompagnement à la prise en main d'outils professionnels digitaux pour certains, le renforcement des fondamentaux en matière de données et de cybersécurité, la sensibilisation à l'IA conversationnelle et la prise en main progressive des cas d'usage concrets.

La formation à l'IA : genèse et déploiement

La formation des collaborateurs à l'IA constitue un enjeu majeur pour un Groupe comme Veolia, qui emploie plus de 215 000 personnes à travers le monde, et s'inscrit ainsi au cœur du programme stratégique GreenUp 2024-2027, qui vise notamment à faire de l'IA un moteur pour accélérer la transformation écologique. D'ici 2027, l'ambition du Groupe est donc de sensibiliser 100 % des collaborateurs à l'IA générative. Cette ambition comprend

bien sûr la formation des « collaborateurs connectés » (ayant un accès digital) mais aussi celle des « cols bleus » plus éloignés aujourd'hui du digital et dont les métiers seront également impactés par l'IA générative demain.

La genèse du programme

L'élément déclencheur a été l'essor fulgurant de l'IA générative dans l'espace public, notamment via la démocratisation accélérée de l'outil conversationnel ChatGPT. Face aux risques réels posés notamment par la diffusion non contrôlée de données sensibles sur des plateformes telles que ChatGPT, l'objectif premier a été alors de prévenir les risques et d'encadrer les pratiques, en posant les bases, dans un laps de temps contraint, d'un référentiel commun à tous les collaborateurs, clarifiant et encadrant les usages de l'IA autorisés dans le cadre professionnel. C'est dans ce contexte qu'a été lancé en septembre 2023, sous l'impulsion d'Estelle Brachlianoff un agent conversationnel interne, Veolia Secure GPT.

Le défi majeur a été majeur : comment faire prendre conscience à la fois des risques mais aussi du potentiel de l'IA générative pour chacun, dans un contexte où les usages, les évolutions technologiques et réglementaires, ainsi que la stratégie de Veolia n'étaient pas clairement définis ?

L'enjeu consistait à susciter envie et curiosité tout en posant un cadre malgré un contexte flou et en évolution permanente.

Afin d'embarquer les collaborateurs dans cette transformation de grande ampleur, un format agile a été retenu : un atelier de sensibilisation présentiel, adaptable aux contextes géographiques et métiers, et facilement actualisable. Ce choix volontairement « simple », à contre-courant des formats e-learning plus fréquents pour la diffusion de règles communes à grande échelle, a permis de maintenir une réactivité essentielle dans ce contexte.

*L'enjeu est de préserver
l'intelligence du geste,
d'intégrer les aspects
environnementaux, et
d'adopter un usage centré
sur le bénéfice en matière de
transformation écologique*

La Mobilisation des équipes à travers un réseau structuré de champions

Un réseau de « champions IA » a été constitué dans chaque Business Unit sur la base du volontariat. Ces ambassadeurs ont été formés en priorité et sont chargés de tester les outils, diffuser les bonnes pratiques et animer la dynamique autour de l'IA. C'est un point central de l'approche de Veolia : l'échelon des champions joue en effet un rôle essentiel dans la stratégie d'acculturation et de formation à l'IA, et a fait l'objet, par la suite, d'une réflexion dédiée pour en affiner le rôle et la gouvernance.

Après un premier pilote mené en France et au siège, la formation a été étendue à l'ensemble des BU, en distanciel et en trois langues (français, anglais, espagnol). À partir de juin 2024, les modules d'acculturation ont été déployés directement dans les BU par les champions.

L'année 2024 a ainsi permis de mobiliser plus de 400 champions et de sensibiliser 13 000 collaborateurs.

Plusieurs évolutions ont été mises en place pour faire face aux grands défis de ce type d'approche :

- **Actualiser en continu.** En six mois, 30 % des contenus étaient déjà obsolètes. une actualisation continue a été mise en place, avec une nouvelle vague de formation plus approfondie début 2025, puis une nouvelle vague fin 2025.
- **Combiner cohérence globale et pertinence locale.** Les formations doivent être adaptées aux enjeux locaux et parler aux métiers, au-delà d'être disponibles dans la langue de chacun. La gouvernance a été renforcée à cet égard en s'appuyant sur le programme interne *AI for GreenUp*, coordonnant (Technologies de l'Information), Ressources Humaines, métiers et innovation. le rôle des champions a été officialisé et encadré avec une nomination par la hiérarchie, tout en clarifiant les rôles respectifs de l'équipe centrale, des acteurs locaux, DRH et « *AI Strategy Leaders* ». Cette démarche a permis de passer d'une première communauté de 400 champions en 2024 à plus de 1 000 champions en 2025.
- **Promouvoir une approche responsable de l'IA, en accord avec la raison d'être de Veolia.** Dans le parcours pour les champions, ce sujet a fait l'objet d'un module dédié, pour sensibiliser à l'usage des technologies de l'IA de manière éthique et transparente au service du progrès humain tout en préservant les ressources. L'enjeu est de préserver l'intelligence du geste, d'intégrer les

aspects environnementaux, et d'adopter un usage centré sur le bénéfice en matière de transformation écologique. L'AI Act européen fixe un cadre d'action sur lequel s'appuyer, en incitant à former toute personne utilisant l'IA dans son travail, y compris sur ces aspects. Par ailleurs Veolia est signataire de l'AI Pledge, et membre de la « *Coalition for sustainable AI* ».

Les prochaines étapes et les priorités de la stratégie formation

Il s'agit désormais d'accélérer encore l'acculturation, avec des cibles claires : former les 500 dirigeants et sensibiliser 50 000 collaborateurs. un e-learning est disponible en 12 langues, ce qui permet, après la première vague en ateliers de porter un message structuré et identique largement.

Au-delà de la sensibilisation, l'adoption de cas d'usage concrets doit se structurer, permettant de gagner en efficacité individuelle et collective. En 2024, plusieurs cas d'usage métiers ont été identifiés et priorisés qui sont déployés en 2025.

La formation se positionne en support des différents métiers pour accompagner la diffusion et l'adoption de ces cas d'usage. Par exemple, dans le cadre de la formation au prompt engineering mise en place par la Veolia Academy, une librairie d'une centaine d'exercices, organisés par famille métier, a été construite et mise à disposition des champions, pour que chacun puisse animer des formations dans son métier, avec des cas adaptés.

Conclusion

Loin de se limiter à un simple chantier d'acculturation, l'approche en matière de formation à l'IA articule une vision systémique qui combine sécurité des usages, adoption de cas d'usage concrets au service de la performance individuelle et collective, et accompagnement des mutations métiers, à tous les niveaux du Groupe. Pour être à la hauteur de l'ambition du groupe, la stratégie de formation et d'acculturation s'appuie sur plusieurs partis-pris : l'approche par un réseau de champions, des itérations continues entre expérimentation et déploiement, une coordination transverse globale et locale favorisant le « *copy & adapt* » au sein de chaque communauté métier et entre les différents métiers.

In fine, l'objectif est d'accompagner progressivement chaque zone et chaque métier dans ce processus de redéfinition profonde des rôles et compétences. Cela est indispensable pour mettre l'IA au service de la transformation écologique, et construire un modèle industriel plus efficace, plus durable, et humainement soutenable.

À propos des auteures

Anne Du Crest est Directrice *Learning* Groupe chez Veolia, où elle dirige la Veolia Academy, l'organisme de formation et de développement du Groupe, dont l'objectif est de soutenir le développement des compétences de plus de 220 000 collaborateurs à travers le monde. À ce titre, elle est responsable de l'élaboration et de la mise en œuvre de stratégies de formation favorisant le développement professionnel et le renforcement des capacités organisationnelles du Groupe.

Mélanie Macé est Directrice du programme *AI for GreenUp* chez Veolia, une initiative stratégique lancée pour la période 2024-2027 visant à déployer l'intelligence artificielle au sein du Groupe afin de soutenir sa mission de décarbonation, de dépollution et de régénération des ressources. Son rôle consiste à coordonner les actions de l'ensemble des départements et des zones géographiques pour faire avancer les principaux axes du programme : la définition d'une stratégie IA ambitieuse et responsable, la création de valeur business tangible et la conduite de la transformation par l'acculturation et le développement des compétences.

Morgane Vidal est Directrice *Learning* chez Groupe Renault. Elle a occupé le poste de Directrice *Learning* Groupe chez Suez, puis chez Veolia de 2019 à mi-2025, et est responsable de l'acculturation des collaborateurs du Groupe à l'intelligence artificielle depuis 2023. Elle dispose de plus de 20 ans d'expérience dans des projets de transformation, les ressources humaines digitales, le conseil et la formation, au sein de diverses entreprises, notamment SIA Partners, Talentsoft, Accenture, Suez et Veolia. Morgane Vidal est diplômée de l'ESSEC Business School.





Références et notes

I : INVESTIR DANS L'IA POUR ACCÉLÉRER LES SOLUTIONS DE DURABILITÉ

Article 1 : IA et changement climatique

Comment l'IA peut-elle contribuer aux objectifs d'efficacité énergétique dans l'industrie?

- 1 Un nouveau sondage de l'AIPI révèle un soutien massif en faveur d'une limitation de l'utilisation des données publiques par l'IA, et met en évidence les inquiétudes liées à la suppression d'emplois et à la consommation d'énergie par l'IA, <https://theaipi.org/poll-biden-ai-executive-order-10-30-7-2-4-2-2-2/>
- 2 Le scénario de l'AIE prévoit que la consommation électrique des centres de données passera de 1,5 % à 2-4,4 % de la demande mondiale totale d'électricité d'ici 2035.
- 3 Voir par exemple: McKinsey (2024), Digital twins: The next frontier of factory optimization, <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization>
- 4 Selon l'AIE, le traitement secondaire représente environ 50 % de la consommation électrique des stations d'épuration.
- 5 Le « niveau redox » fait référence à la richesse ou à la pauvreté globale en électrons d'une espèce chimique, indiquant son degré d'oxydation ou de réduction. Le niveau redox est un indicateur important car il montre la quantité d'oxygène disponible, ce qui indique si les conditions sont favorables aux micro-organismes qui nettoient l'eau.

Article 2 : L'écosystème intelligent

Comment nous préparons l'avenir des services environnementaux grâce à l'IA

- 1 InsightAce Analytic. (n.d.). *AI in environmental sustainability market: Current scenario analysis report*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.insightaceanalytic.com/report/ai-in-environmental-sustainability-market/2753>
- 2 EIN Presswire. (n.d.). *AI in environmental sustainability market estimated to reach US\$49.272 billion by 2030 at a CAGR of 14.58%*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.einpresswire.com/article/820419587/ai-in-environmental-sustainability-market-estimated-to-reach-us-49-272-billion-by-2030-at-a-cagr-of-14-58>
- 3 openPR. (n.d.). *AI in environmental protection market: Rising demand and growth*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.openpr.com/news/4073629/ai-in-environmental-protection-market-rising-demand-and-growth>
- 4 Future Data Stats. (n.d.). *AI in environmental sustainability market size & industry growth 2030*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.futuredatastats.com/artificial-intelligence-in-environmental-sustainability-market>
- 5 World Economic Forum. (2025). *AI's role in the climate transition and how it can drive growth*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.weforum.org/stories/2025/01/artificial-intelligence-climate-transition-drive-growth/>
- 6 Water Technologies. (n.d.). *GreenUp strategic program 2024–2027*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.veoliawatertechnologies.com/en/greenup>
- 7 Veolia. (n.d.). *GreenUp: Veolia's 2027 strategic program*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.veolia.com/en/veolia-group/veolia-2024-2027-strategic-program-green-up>
- 8 Veolia. (n.d.). *GreenUp: Veolia unveils its new strategic program 2024–2027*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.veolia.com/en/our-media/news/greenup-veolia-unveils-its-new-strategic-program-2024-2027>
- 9 Veolia North America. (n.d.). *Sustainability at Veolia North America*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.veolianorthamerica.com/sustainability>
- 10 Global Recycling. (n.d.). *Veolia and Mistral AI join forces*. Retrieved July 3, 2025, from <https://global-recycling.info/archives/10224>
- 11 Veolia. (n.d.). *Veolia and Mistral AI join forces to revolutionize resource efficiency*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.veolia.com/en/our-media/press-releases/veolia-and-mistral-ai-join-forces-revolutionize-resource-efficiency>
- 12 EnergyNews. (n.d.). *Veolia relies on Mistral AI's AI to optimize its industrial plants*. Retrieved July 3, 2025, from <https://energynews.pro/en/veolia-relies-on-mistral-ais-ai-to-optimize-its-industrial-plants/>
- 13 AquaEnergy Expo Magazine. (n.d.). *Veolia and Mistral AI join forces to revolutionize resource efficiency management with generative AI and accelerate the ecological transformation*. Retrieved July 3, 2025, from <https://mg.aquaenergyexpo.com/veolia-and-mistral-ai-join-forces-to-revolutionize-resource-efficiency-management-with-generative-ai-and-accelerate-the-ecological-transformation/>
- 14 Veolia. (n.d.). *Generative AI at the heart of the ecological transformation: Veolia pushes the boundaries of innovation*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.veolia.com/en/our-media/news/generative-ai-heart-ecological-transformation-veolia-pushes-boundaries-innovation>
- 15 American Water Works Association. (n.d.). *Digital twins*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.awwa.org/resource/digital-twins/>
- 16 Zhang, X., Li, Y., & Wang, J. (2024). *Digital twins for wastewater treatment: A technical review*. Engineering, 28, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.04.012>
- 17 SDG Knowledge Hub. (n.d.). *Paris summit launches coalition for sustainable AI*. Retrieved July 3, 2025, from <https://sdg.iisd.org/news/paris-summit-launches-coalition-for-sustainable-ai/>
- 18 Coalition for Sustainable AI. (n.d.). *Coalition for sustainable AI*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.sustainableaicoalition.org/>
- 19 AI Magazine. (n.d.). *Revealed: New coalition for sustainable AI member companies*. Retrieved July 3, 2025, from <https://aimagazine.com/articles/which-companies-are-in-the-coalition-for-sustainable-ai>
- 20 Coalition for Digital Environmental Sustainability. (n.d.). *CODES – Coalition for Digital Environmental Sustainability*. Retrieved July 3, 2025, from <https://www.codes.global/resources/launch-of-the-sustainable-ai-coalition>



Article 3 : Tirer parti de l'IA pour décarboner le secteur de l'énergie Opportunités, défis et recommandations

- 1 Clarke, L., Wei, Y.-M., De La Vega Navarro, A., Garg, A., Hahmann, A. N., Khennas, S., Azevedo, I. M. L., Löschel, A., Singh, A. K., Steg, L., Strbac, G., & Wada, K. (2023). Energy systems. In IPCC, *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 613–746). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.008>
- 2 International Energy Agency. (2024a). *Global methane tracker 2024*. <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024>
- 3 International Energy Agency. (2025). *Energy and AI*. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- 4 Ferdaus, M. M., Dam, T., Anavatti, S., & Das, S. (2024). Digital technologies for a net-zero energy future: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114681. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114681>
- 5 Chen, F., Sun, L., Jiang, B., Huo, X., Pan, X., Feng, C., & Zhang, Z. (2025). A review of AI applications in unconventional oil and gas exploration and development. *Energies*, 18(2), 391. <https://doi.org/10.3390/en18020391>
- 6 Alatalo, J., Heilimo, E., Rantonen, M., Väänänen, O., & Sipilä, T. (2025). Reducing emissions using artificial intelligence in the energy sector: A scoping review. *Applied Sciences*, 15(2), 999. <https://doi.org/10.3390/app15020999>
- 7 Paletta, Q., Terrén-Serrano, G., Nie, Y., Li, B., Bieker, J., Zhang, W., Dubus, L., Dev, S., & Feng, C. (2023). Advances in solar forecasting: Computer vision with deep learning. *Advances in Applied Energy*, 11, 100150. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100150>
- 8 Gijón, A., Pujana-Goitia, A., Perea, E., Molina-Solana, M., & Gómez-Romero, J. (2023). Prediction of wind turbines power with physics-informed neural networks and evidential uncertainty quantification. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.14675>
- 9 Osorio, J. D., Florio, M. D., Hovsopian, R., Chrysostomidis, C., & Karniadakis, G. E. (2025). Physics-informed machine learning for solar-thermal power systems. *Energy Conversion and Management*, 327, 119542. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119542>
- 10 Ashraf, W. M., & Dua, V. (2023). Artificial intelligence-driven smart operation of large industrial complexes supporting the net-zero goal: Coal power plants. *Digital Chemical Engineering*, 8, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100119>
- 11 International Energy Agency. (2024b). *World energy outlook 2024*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- 12 Chen, Y., Gong, W., Obrecht, C., & Kuznik, F. (2025). A review of machine learning techniques for building electrical energy consumption prediction. *Energy and AI*, 21, 100518. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100518>
- 13 Bae, H.-J., Park, J.-S., Choi, J., & Kwon, H.-Y. (2025). Learning model combined with data clustering and dimensionality reduction for short-term electricity load forecasting. *Scientific Reports*, 15(1), 3575. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86982-0>
- 14 Wang, Z., & Hong, T. (2020). Reinforcement learning for building controls: The opportunities and challenges. *Applied Energy*, 269, 115036. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115036>
- 15 Pan, S. J., & Yang, Q. (2010). A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(10), 1345–1359. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2009.191>
- 16 Palensky, P., & Dietrich, D. (2011). Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(3), 381–388. <https://doi.org/10.1109/TII.2011.2158841>
- 17 Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction*. MIT Press.
- 18 Madani, S., Pineau, P.-O., Charlin, L., & Desage, Y. (2025). Towards sustainable energy use: Reinforcement learning for demand response in commercial buildings. *Energy and Buildings*, 342, 115721. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115721>
- 19 Uplight. (2024). *Uplight – Clean energy solutions for a decarbonized grid*. <https://uplight.com/>
- 20 Johnson, L., Randhawa, S., Tyagi, P., & Walia, V. (2022, November 16). *Unlocking sustainable power using Stem's AI-driven clean energy platform on AWS*. <https://aws.amazon.com/blogs/industries/unlocking-sustainable-power-using-stems-ai-driven-clean-energy-platform-on-aws/>
- 21 Dang, T. L. P., Sadreddin, A., & Ahuja, S. (2024). Readily available technologies in low-resource communities: A review and synthesis. *Information Technology for Development*, 30(1), 132–172. <https://doi.org/10.1080/02681102.2023.2288843>
- 22 Carter, L., Cantrell, C., & Dapeng, L. (2020). Exploring the intersection of the digital divide and artificial intelligence: A hermeneutic literature review. *AIIS Transactions on Human-Computer Interaction*, 12(4), 253–275. <https://doi.org/10.17705/1thci.00138>
- 23 Lythreitis, S., Singh, S. K., & El-Kassar, A.-N. (2022). The digital divide: A review and future research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 175, 121359. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121359>
- 24 Mikalef, P., Conboy, K., Lundström, J. E., & Popović, A. (2022). Thinking responsibly about responsible AI and the “dark side” of AI. *European Journal of Information Systems*, 31(3), 257–268. <https://doi.org/10.1080/0960085X.2022.2026621>
- 25 Ahuja, S., Chan, Y. E., & Krishnamurthy, R. (2023). Responsible innovation with digital platforms: Cases in India and Canada. *Information Systems Journal*, 33(1), 76–129. <https://doi.org/10.1111/isj.12378>
- 26 Future Earth, The Earth League, & World Climate Research Programme. (2023). *10 new insights in climate science 2023/2024*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10251586>
- 27 Kaack, L. H., Donti, P. L., Strubell, E., Kamiya, G., Creutzig, F., & Rolnick, D. (2022). Aligning artificial intelligence with climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 12(6), 518–527. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01377-7>
- 28 Ene, K. (2024). What role does AI play in improving Africa's energy access? *Oxford Policy Management*. <https://www.opml.co.uk/insights/what-role-does-ai-play-improving-africas-energy-access>
- 29 Transitions Research. (2025). *Can AI light up India's energy shift? A pragmatic look at India's AI and energy transitions*. <https://transitionsresearch.org/article/can-ai-light-up-indias-energy-shift-a-pragmatic-look-at-indias-ai-and-energy-transitions>

- 30 Darwin, S., & Chesbrough, H. (2017). *Prototyping a scalable smart village to simultaneously create sustainable development and enterprise growth opportunities*. Berkeley-Haas Case Series, University of California, Berkeley. <https://doi.org/10.4135/9781526430786>
- 31 Markazi, D., Hossain, K., Stillman, L., Wolske, M., Anwar, M., Carbone, K., De Moor, A., Farinosi, M., Rega, I., Sarriça, M., & Berrio Zapata, C. (2024). A community informatics research network vision statement. *Journal of Community Informatics*, 20(2). <https://doi.org/10.15353/joci.v20i2.5639>
- 32 Vinson, N. (2025). *The AI landscape in Canada: A critical moment for First Nations*. First Nations Technology Council. <https://www.technologycouncil.ca/news/the-ai-landscape-in-canada-a-critical-moment-for-first-nations/>
- 33 Dignum, V. (2019). *Responsible artificial intelligence: How to develop and use AI in a responsible way*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30371-6>
- 34 Peters, D., Vold, K., Robinson, D., & Calvo, R. A. (2020). Responsible AI – Two frameworks for ethical design practice. *IEEE Transactions on Technology and Society*, 1(1), 34–47. <https://doi.org/10.1109/TTS.2020.2974991>
- 35 Patel, J., Wang, P., Ahuja, S., Giddens, L., & Young, A. (2025). Fostering a responsible information systems research ecosystem. *Communications of the Association for Information Systems*, 57(1). <https://aisel.aisnet.org/cais/vol57/iss1/4>
- 36 CODES. (2022). *Action plan for a sustainable planet in the digital age*. <https://www.unep.org/resources/report/action-plan-sustainable-planet-digital-age>
- 37 Sustainability in the Digital Age. (2020). *Digital disruptions for sustainability agenda (D²S agenda): Research, innovation, action*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5645147>

Article 4 : L'IA au service de la gestion énergétique des bâtiments

Défis et opportunités

- 1 International Energy Agency. (2023). *Energy efficiency 2023*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
- 2 Santamouris, M., & Vasilakopoulou, K. (2021). Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation. *E-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002>
- 3 ASHRAE. (2022). *Standard 90.1-2022 – Energy standard for sites and buildings except low-rise residential buildings*. Retrieved July 17, 2025, from <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-90-1>
- 4 International Energy Agency. (2025). *Energy and AI*. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- 5 Babiarz, B., Krawczyk, D. A., Siuta-Olcha, A., Manuel, C. D., Jaworski, A., Barnat, E., Cholewa, T., et al. (2024). Energy efficiency in buildings: Toward climate neutrality. *Energies*, 17(18), 4680. <https://doi.org/10.3390/en17184680>
- 6 Abuimara, T., Hobson, B. W., Gunay, B., O'Brien, W., & Kane, M. (2021). Current state and future challenges in building management: Practitioner interviews and a literature review. *Journal of Building Engineering*, 41, 102803. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102803>
- 7 Digitemie, W. N., & Ekemezie, I. O. (2024). A comprehensive review of building energy management systems (BEMS) for improved efficiency. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(3), 829–841. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.3.0746>
- 8 Shen, W., Newsham, G., & Gunay, B. (2017). Leveraging existing occupancy-related data for optimal control of commercial office buildings: A review. *Advanced Engineering Informatics*, 33, 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.12.008>
- 9 Yang, X., Maiti, A., Jiang, J., & Kist, A. (2022). Forecasting and monitoring smart buildings with the Internet of Things, digital twins and blockchain. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 298, 213–224. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82529-4_21
- 10 Olabiyi, W., Akinyele, D., & Joel, E. (2025). *The evolution of AI: From rule-based systems to data-driven intelligence*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/evolution-ai-from-rule-based-systems-agentic-divan-dave--rmp9f/>
- 11 Mariano-Hernández, D., Hernández-Callejo, L., Zorita-Lamadrid, A., Duque-Pérez, O., & Santos García, F. (2021). A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis. *Journal of Building Engineering*, 33, 101692. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101692>
- 12 Amer, H. N., Dahlan, N. Y., Azmi, A. M., Latip, M. F. A., Onn, M. S., & Tumian, A. (2023). Solar power prediction based on artificial neural network guided by feature selection for large-scale solar photovoltaic plant. *Energy Reports*, 9, 262–266. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.141>
- 13 Song, H., Liu, C., Amani, A. M., Gu, M., Jalili, M., Meegahapola, L., Yu, X., & Dickeson, G. (2024). Smart optimization in battery energy storage systems: An overview. *Energy and AI*, 17, 100378. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100378>
- 14 Lumenalta. (2024, November 13). *How AI improves HVAC design and energy efficiency: Optimizing HVAC performance with AI*. <https://lumenalta.com/insights/how-ai-models-are-enhancing-hvac-design-and-performance>
- 15 Seyedolhosseini, A., Masoumi, N., Modarressi, M., & Karimian, N. (2020). Daylight adaptive smart indoor lighting control method using artificial neural networks. *Journal of Building Engineering*, 29, 101141. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101141>
- 16 European Commission. (2023). *Energy efficiency directive (EU/2023/1791)*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en
- 17 European Commission. (2023). *DIGITAL Europe programme*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/digital-europe-programme>
- 18 Building and Construction Authority. (2022). *Green Mark incentive schemes*. <https://www1.bca.gov.sg/buildsg/sustainability/green-mark-incentive-schemes>
- 19 Government of Korea. (2021). *Government announces Korean New Deal 2.0, an upgrade to properly reflect changes*. <https://english.moef.go.kr/pc/selectTbPressCenterDtl.do?boardCd=N0001&seq=5173>
- 20 U.S. Department of Energy. (2023, September 22). *Inflation Reduction Act of 2022*. <https://www.energy.gov/lpo/inflation-reduction-act-2022>



- 21 Federal Office for Information Security. (2023, February 1). *IT-Grundschutz-Kompendium (Edition 2023)*. https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/IT-GS-Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2023.html
- 22 Australian Government, Department of Home Affairs. (2023, February 27). *2023–2030 Australian cyber security strategy*. <https://www.homeaffairs.gov.au/about-us/our-portfolios/cyber-security/strategy/2023-2030-australian-cyber-security-strategy>
- 23 Agrawal, R., De Tommasi, L., Lyons, P., Zaroni, S., Papagiannis, G. K., Karakosta, C., Papapostolou, A., *et al.* (2023). Challenges and opportunities for improving energy efficiency in SMEs: Learnings from seven European projects. *Energy Efficiency*, 16(3). <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10090-z>
- 24 PLP Architecture. (n.d.). *Creating the world's greenest and smartest building*. Retrieved July 16, 2025, from <https://plparchitecture.com/creating-the-worlds-greenest-and-smartest-building/>
- 25 BRE Group. (2025). *The Edge Amsterdam*. <https://breeam.com/web/bre-group/case-studies/the-edge-amsterdam>
- 26 Resync. (2025, March 27). *15% energy savings at SCG HQ2 with Resync's AI-driven HVAC solution*. <https://www.resynctech.com/15-energy-savings-at-scg-hq2-with-resyncs-ai-driven-hvac-solution>
- 27 Mehra, V., & Hasegawa, R. (2023, October 4). *Using demand response to reduce data center power consumption*. Google Cloud Blog. <https://cloud.google.com/blog/products/infrastructure/using-demand-response-to-reduce-data-center-power-consumption>
- 28 Lazarevich, K. (2018, April 24). *How AI makes the Empire State Building smart*. IoT Evolution World. <https://www.iotevolutionworld.com/iot/articles/437918-how-ai-makes-empire-state-building-smart.htm>
- 29 Dillenseger, R. (2017, April 18). *Energy-smart buildings: Use IoT to reduce your electric bill*. Microsoft Industry Blogs. <https://www.microsoft.com/en-us/industry/blog/manufacturing-and-mobility/2017/04/18/energy-smart-buildings-use-iot-reduce-electric-bill>
- 30 Subhan, F. (2025, May 29). *The new blueprint: Leading green, automated construction in a digitally conscious world*. Medium. https://medium.com/%40info_20700/the-new-blueprint-leading-green-automated-construction-in-a-digitally-conscious-world-dfdc00225c6f
- 31 Stiffler, L. (2021, June 10). *Seattle tech co. breaks ground on world's first "net zero energy" high-rise apartment building*. GeekWire. <https://www.geekwire.com/2021/seattle-tech-co-breaks-ground-worlds-first-net-zero-energy-high-rise-apartment-building>

Article 5 : Les matériaux : un fondement essentiel de la transition vers la durabilité Accélérer la découverte de matériaux durables

- 1 Chemical & Engineering News. (2023). *The industrialization of the Haber–Bosch process*. <https://cen.acs.org/food/agriculture/The-industrialization-Haber-Bosch-process/101/i26>
- 2 International Energy Agency. (2023). *Global CO₂ emissions by sector, 2019–2022* [Data set]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-by-sector-2019-2022>
- 3 Chemical & Engineering News. (2019). *Industrial ammonia production emits more CO₂ than any other chemical-making reaction*. <https://cen.acs.org/environment/green-chemistry/Industrial-ammonia-production-emits-CO2/97/i24>
- 4 Karali, N., Khanna, N., & Shah, N. (2024). *Climate impact of primary plastic production*. Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://escholarship.org/uc/item/12s624vf>
- 5 Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- 6 International Energy Agency. (2025a). *Demand and supply measures for the steel and cement transition*. <https://www.iea.org/reports/demand-and-supply-measures-for-the-steel-and-cement-transition>
- 7 World Health Organization. (2021). *Children and digital dumpsites: E-waste exposure and child health*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240024557>
- 8 McKinsey & Company. (2022). *Keeping the semiconductor industry on the path to net zero*. <https://www.mckinsey.com/industries/semiconductors/our-insights/keeping-the-semiconductor-industry-on-the-path-to-net-zero>
- 9 Park, H., Yan, X., Zhu, R., Huerta, E. A., Chaudhuri, S., Cooper, D., Foster, I., & Tajkhorshid, E. (2024). A generative artificial intelligence framework based on a molecular diffusion model for the design of metal-organic frameworks for carbon capture. *Communications Chemistry*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s42004-023-01090-2>
- 10 Abramson, J., Adler, J., Dunger, J., Evans, R., Green, T., Pritzel, A., ... Jumper, J. M. (2024). Accurate structure prediction of biomolecular interactions with AlphaFold 3. *Nature*, 630(8016), 493–500. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07487-w>
- 11 International Energy Agency. (2025b). *Energy and AI*. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- 12 Chen, C., Nguyen, D. T., Lee, S. J., Baker, N. A., Karakoti, A. S., Lauw, L., ... Troyer, M. (2024). Accelerating computational materials discovery with machine learning and cloud high-performance computing. *Journal of the American Chemical Society*, 146(29), 20009–20018. <https://doi.org/10.1021/jacs.4c03849>
- 13 Ge, X., Goodwin, R. T., Yu, H., Romero, P., Abdelrahman, O., Sudhakar, A., ... Varshney, L. R. (2022). Accelerated design and deployment of low-carbon concrete for data centers. *Proceedings of the ACM SIGCAS/SIGCHI Conference on Computing and Sustainable Societies (COMPASS)*, 340–352. <https://doi.org/10.1145/3530190.3534817>
- 14 Lin, M.-Y., Severson, K., Grandgeorge, P., & Roumeli, E. (2025). Closed-loop optimization using machine learning for the accelerated design of sustainable cements incorporating algal biomatter. *Matter*. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2025.102267>
- 15 European Environment Agency. (2020). *Biodegradable and compostable plastics – Challenges and opportunities*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/biodegradable-and-compostable-plastics>
- 16 Monclús, L., Arp, H. P. H., Groh, K. J., Faltynkova, A., Løseth, M. E., Muncke, J., ... Wagner, M. (2025). Mapping the chemical complexity of plastics. *Nature*, 643(8071), 349–355. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09184-8>

- 17 Rosenboom, J.-G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7(2), 117–137. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- 18 Zhang, Z., Biswal, A. K., Nandi, A., Frost, K., Smith, J. A., Nguyen, B. H., ... Iyer, V. (2024). Recyclable vitrimer-based printed circuit boards for sustainable electronics. *Nature Sustainability*, 7(5), 616–627. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01333-7>
- 19 Zheng, Y., Thakolkaran, P., Biswal, A. K., Smith, J. A., Lu, Z., ... Vashisth, A. (2025). AI-guided inverse design and discovery of recyclable vitrimeric polymers. *Advanced Science*, 12(6). <https://doi.org/10.1002/adv.202411385>
- 20 Merchant, A., Batzner, S., Schoenholz, S. S., Aykol, M., Cheon, G., & Cubuk, E. D. (2023). Scaling deep learning for materials discovery. *Nature*, 624(7990), 80–85. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06735-9>
- 21 Zeni, C., Pinsler, R., Zügner, D., Fowler, A., Horton, M., ... Xie, T. (2025). A generative model for inorganic materials design. *Nature*, 639(8055), 624–632. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08628-5>
- 22 Kirkpatrick, J., McMorrow, B., Turban, D. H. P., ... Cohen, A. J. (2021). Pushing the frontiers of density functionals by solving the fractional electron problem. *Science*, 374(6573), 1385–1389. <https://doi.org/10.1126/science.abj6511>
- 23 Luise, G., Huang, C.-W., Vogels, T., ... Gori-Giorgi, P. (2025). *Accurate and scalable exchange-correlation with deep learning* (arXiv preprint). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.14665>
- 24 Chmiela, S., Sauceda, H. E., Müller, K.-R., & Tkatchenko, A. (2018). Towards exact molecular dynamics simulations with machine-learned force fields. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06169-2>
- 25 Yang, H., Hu, C., Zhou, Y., ... Lu, Z. (2024). *MatterSim: A deep learning atomistic model across elements, temperatures and pressures* (arXiv preprint). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.04967>
- 26 The Materials Project. (n.d.). *The Materials Project*. <https://next-gen.materialsproject.org/>
- 27 Open Catalyst Project. (n.d.). *Open Catalyst Project*. <https://opencatalystproject.org/>
- 28 MIT Technology Review. (2024). *The race to find new materials with AI needs more data*. <https://www.technologyreview.com/2024/10/18/1105880/the-race-to-find-new-materials-with-ai-needs-more-data-meta-is-giving-massive-amounts-away-for-free/>
- 29 Kovachki, N., Liu, B., Sun, X., Zhou, H., Bhattacharya, K., Ortiz, M., & Stuart, A. (2022). Multiscale modeling of materials. *Mechanics of Materials*, 165, 104156. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.104156>
- 30 Hultman, L., Mazur, S., Ankarcrona, C., ... Berggren, M. (2024). Advanced materials provide solutions towards a sustainable world. *Nature Materials*, 23(2), 160–161. <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01778-9>
- 31 Li, B., Mellou, K., Zhang, B., Pathuri, J., & Menache, I. (2023). *Large language models for supply chain optimization* (arXiv preprint). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.03875>
- 32 Zhong, S., Aseniero, B. A., Groom, A. I., ... Benjamin, D. (2025). Towards interactive AI-assisted material selection for sustainable building design. *Companion Proceedings of the ACM Designing Interactive Systems Conference*, 567–573. <https://doi.org/10.1145/3715668.3736354>
- 33 Boiko, D. A., MacKnight, R., Kline, B., & Gomes, G. (2023). Autonomous chemical research with large language models. *Nature*, 624(7992), 570–578. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06792-0>
- 34 Gottweis, J., Weng, W.-H., Daryin, A., ... Natarajan, V. (2025). *Towards an AI co-scientist* (arXiv preprint). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.18864>
- 35 Microsoft Discovery. (2025). *Transforming R&D with agentic AI: Introducing Microsoft Discovery*. <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/transforming-rd-with-agentic-ai-introducing-microsoft-discovery/>
- 36 Alissa, H., Nick, T., Raniwala, A., ... Frieze, M. (2025). Using life cycle assessment to drive innovation for sustainable cool clouds. *Nature*, 641(8062), 331–338. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08832-3>
- 37 Pyzer-Knapp, E. O., Pitera, J. W., Staar, P. W. J., ... Curioni, A. (2022). Accelerating materials discovery using artificial intelligence, high performance computing and robotics. *npj Computational Materials*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41524-022-00765-z>
- 38 Delgado-Licona, F., Alsaïari, A., Dickerson, H., ... Abolhasani, M. (2025). Flow-driven data intensification to accelerate autonomous inorganic materials discovery. *Nature Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1038/s44286-025-00249-z>
- 39 Szymanski, N. J., Rendy, B., Fei, Y., ... Ceder, G. (2023). An autonomous laboratory for the accelerated synthesis of novel materials. *Nature*, 624(7990), 86–91. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06734-w>
- 40 Dai, T., Vijayakrishnan, S., Szczypiński, F. T., ... Cooper, A. I. (2024). Autonomous mobile robots for exploratory synthetic chemistry. *Nature*, 635(8040), 890–897. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08173-7>
- 41 Wang, C., Kim, Y.-J., Vriza, A., ... Xu, J. (2025). Autonomous platform for solution processing of electronic polymers. *Nature Communications*, 16(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55655-3>

II : DÉVELOPPER DES INFRASTRUCTURES NUMÉRIQUES ET DE DONNÉES POUR UNE IA DURABLE

Article 1 : Enjeux des données pour les applications d'IA environnementale

- 1 Olawade, D. B., Wada, O. Z., Ige, A. O., Egbewole, B. I., Olojo, A., & Oladapo, B. I. (2024). Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions. *Hygiene and Environmental Health Advances*, 12, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.heha.2024.100114>
- 2 Hino, M., Benami, E., & Brooks, N. (2018). Machine learning for environmental monitoring. *Nature Sustainability*, 1, 583–588. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0142-9>



- 3 Pollock, L. J., Kitzes, J., Beery, S., *et al.* (2025). Harnessing artificial intelligence to fill global shortfalls in biodiversity knowledge. *Nature Reviews Biodiversity*, 1, 166–182. <https://doi.org/10.1038/s44358-025-00022-3>
- 4 Miller, T., Durlík, I., Kostecka, E., Kozłowska, P., Łobodzińska, A., Sokołowska, S., & Nowy, A. (2025). Integrating artificial intelligence agents with the Internet of Things for enhanced environmental monitoring: Applications in water quality and climate data. *Electronics*, 14(4), 696. <https://doi.org/10.3390/electronics14040696>
- 5 Nearing, G., Cohen, D., Dube, V., *et al.* (2024). Global prediction of extreme floods in ungauged watersheds. *Nature*, 627, 559–563. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07145-1>
- 6 Dryad. (n.d.). *Revolutionizing wildfire prevention*. Accessed on October 15, 2025. <https://www.dryad.net/post/revolutionizing-wildfire-prevention>
- 7 United Nations Environment Programme. (n.d.). *Global environmental data strategy (GEDS)*. Accessed on October 15, 2025. <https://www.unep.org/topics/digital-transformations/global-environmental-data-strategy-geds>
- 8 Radwan, G. S. (2025). *Briefing on the global environmental data strategy*. United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/45360/GEDS-CPR-April-18.pdf>
- 9 Novartis. (n.d.). *The power of transparency*. Accessed on October 30, 2025. <https://live.novartis.com/en/article/the-power-of-transparency>
- 10 PRISM Sustainability Directory. (n.d.). *Environmental data interoperability standards*. Accessed on July 30, 2025. <https://prism.sustainability-directory.com/area/environmental-data-interoperability-standards/>
- 11 Fraisl, D., *et al.* (2025). Leveraging the collaborative power of AI and citizen science for sustainable development. *Nature Sustainability*, 8, 125–132. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01489-2>
- 12 Walker, D. M., *et al.* (2023). Perspectives on challenges and opportunities for interoperability: Findings from key informant interviews with stakeholders in Ohio. *JMIR Medical Informatics*. <https://doi.org/10.2196/43848>
- 13 PRISM Sustainability Directory. (n.d.). *Community data ownership in climate interventions*. Accessed on July 30, 2025. <https://prism.sustainability-directory.com/scenario/community-data-ownership-in-climate-interventions/>
- 14 Pujol Priego, L., & Wareham, J. (2024). Data commoning in the life sciences. *MIS Quarterly*, 48(2), 491–520. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2023/17439>
- 15 Open Targets. (n.d.). *Open Targets platform*. Accessed on November 4, 2025. <https://www.opentargets.org/>
- 16 Data Science Center ETH Zurich. (n.d.). *Enhancing environmental data interoperability across the ETH Domain*. Accessed on July 31, 2025. <https://www.datascience.ch/articles/enhancing-environmental-data-interoperability-across-the-eth-domain>
- 17 Biodiversity Information Standards (TDWG). (n.d.). *Darwin Core*. Accessed on October 25, 2025. <https://dwc.tdwg.org/>
- 18 United Nations Development Programme. (n.d.). *Use case 3: Real-time monitoring of the environment*. Accessed on June 4, 2025. <https://www.smartertogether.earth/how-collective-intelligence-is-used-for-the-sdgs/use-case-3>
- 19 Innovation, Science and Economic Development Canada. (n.d.). *Towards a national digital platform for biodiversity conservation: Data repository and artificial intelligence-enabled analytics*. Accessed on July 29, 2025. <https://ised-isde.canada.ca/site/science/en/office-chief-science-advisor/science-advice-support-canadas-national-biodiversity-strategy/data-ai-biodiversity-report>
- 20 European Commission. (n.d.). *The Digital Europe Programme*. Accessed on November 4, 2025. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/digital-programme>
- 21 Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., *et al.* (2016). The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3, 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- 22 Crystal-Ornelas, R., Varadharajan, C., O’Ryan, D., *et al.* (2022). Enabling FAIR data in Earth and environmental science with community-centric (meta)data reporting formats. *Scientific Data*, 9, 700. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01606-w>
- 23 Bank. (n.d.). *Global trends in AI governance*. Accessed on June 4, 2025. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099120224205026271/pdf/P1786161ad76ca0ae1ba3b1558ca4ff88ba.pdf>
- 24 Patel, K. (2024). Ethical reflections on data-centric AI: Balancing benefits and risks. *International Journal of Artificial Intelligence Research and Development*, 2(1), 1–17. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4993089>
- 25 European Union. (n.d.). *The EU Artificial Intelligence Act*. Accessed on November 4, 2025. <https://artificialintelligenceact.eu/>
- 26 Coalition for Sustainable Artificial Intelligence. (n.d.). *Coalition for Sustainable Artificial Intelligence*. Accessed on October 30, 2025. <https://www.sustainableaicoalition.org/>
- 27 Modhvadia, R., & Reid, O. F. (2024). *Participatory and inclusive data stewardship: A landscape review*. Ada Lovelace Institute. <https://www.adalovelaceinstitute.org/report/participatory-inclusive-data-stewardship/>
- 28 Elmes, A., Alemohammad, H., *et al.* (2020). Accounting for training data error in machine learning applied to Earth observations. *Remote Sensing*, 12(6), 1034. <https://doi.org/10.3390/rs12061034>
- 29 Alation. (n.d.). *Creating a culture of data curation for AI success*. Accessed on November 1, 2025. <https://www.alation.com/blog/culture-data-curation-ai-success/>
- 30 SpatioTemporal Asset Catalog. (n.d.). *STAC specification*. Accessed on October 10, 2020. <https://stacspec.org/>
- 31 Mergen, A., Çetin-Kılıç, N., & Özbilgin, M. F. (2025). Artificial intelligence and bias towards marginalised groups: Theoretical roots and challenges. In *AI and diversity in a datafied world of work: Will the future of work be inclusive?* (Vol. 12, pp. 17–38). Emerald Publishing.
- 32 Visan, A. I., & Negut, I. (2024). Integrating artificial intelligence for drug discovery in the context of revolutionizing drug delivery. *Life (Basel)*, 14(2), 233. <https://doi.org/10.3390/life14020233>

Article 2 : Infrastructure de données Comment développer les services environnementaux basés sur l'IA

- 1 Jones, J., Harris, E., Febriansah, Y., Adiwijaya, A., & Nuril Hikam, I. (2024). AI for sustainable development: Applications in natural resource management, agriculture, and waste management. *International Transactions on Artificial Intelligence (ITALIC)*, 2(2), 143–149. <https://doi.org/10.33050/italic.v2i2.549>
- 2 Sheth, A. (2025). The future of AI in environmental services: What to expect by 2030. *Syndelltech*. <https://syndelltech.com/future-of-ai-environmental-services/>
- 3 Rueda, V., Young, M. H., Faust, K., Rateb, A., & Leibowicz, B. D. (2022). System dynamics modeling in local water management: Assessing strategies for the City of Boerne, Texas. *Water (Switzerland)*, 14(22), 3682. <https://doi.org/10.3390/w14223682>
- 4 Chisom, O. N., Biu, P. W., Umoh, A. A., Obaedo, B. O., Adegbite, A. O., & Abatan, A. (2024). Reviewing the role of AI in environmental monitoring and conservation: A data-driven revolution for our planet. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(1). <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.2720>
- 5 Boukas, I., Burtin, E., Sutera, A., Gemine, Q., Pevee, B., & Ernst, D. (2024). Exploiting the flexibility potential of water distribution networks: A pilot project in Belgium. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 15(1), 394–404. <https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3272469>
- 6 Rathi, S., & Gola, V. K. (2024). Innovative components of smart cities with a special focus on water distribution systems: Challenges and opportunities: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1326(1), 012146. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012146>
- 7 Mutri, M. A., Saputra, A. R. A., Alinursafa, I., Ahmed, A. N., Yafouz, A., & El-Shafie, A. (2024). Smart system for water quality monitoring utilizing long-range-based Internet of Things. *Applied Water Science*, 14(4). <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02128-z>
- 8 Chen, Z., Amani, A. M., Yu, X., & Jalili, M. (2023). Control and optimisation of power grids using smart meter data: A review. *Sensors*, 23(4), 2118. <https://doi.org/10.3390/s23042118>
- 9 Eisele, J., Gerlach, A., Maeder, M., & Marburg, S. (2023). Convolutional neural network with data augmentation for object classification in automotive ultrasonic sensing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 153(4). <https://doi.org/10.1121/10.0017922>
- 10 Gamboa, V. S., Kinast, É. J., & Pires, M. (2023). System for performance evaluation and calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring. *Atmospheric Pollution Research*, 14(2), 101645. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101645>
- 11 Khan, M. A. R., Rouf, M. A., Sultana, N., & Akter, M. S. (2025). Development of a fog computing-based real-time flood prediction and early warning system. *Journal of Sustainable Development and Policy*, 1(1), 144–169. <https://doi.org/10.63125/6y0qwr92>
- 12 Rafiq, H., Manandhar, P., Rodriguez-Ubinas, E., Barbosa, J. D., & Qureshi, O. A. (2023). Analysis of residential electricity consumption patterns utilizing smart-meter data: Dubai as a case study. *Energy and Buildings*, 291, 113103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113103>
- 13 Okoli, N. J., & Kabaso, B. (2024). Building a smart water city: IoT smart water technologies, applications, and future directions. *Water (Switzerland)*, 16(4), 557. <https://doi.org/10.3390/w16040557>
- 14 John, J., David, R., Raj, A., Karimi, M., Nazari, R., Muni, R., & Yanamala, R. (2025). Artificial intelligence for smart cities: A comprehensive review across six pillars and global case studies. *IEEE Access*, 13, 1–32. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3401234>
- 15 Farah, E., & Shahrour, I. (2024). Use of data-driven methods for water leak detection and consumption analysis at microscale and macroscale. *Water (Switzerland)*, 16(17), 1–14. <https://doi.org/10.3390/w16172530>
- 16 Jayakumar, D., Bouhoula, A., & Al-Zubari, W. K. (2024). Unlocking the potential of artificial intelligence for sustainable water management: Focusing operational applications. *Water (Switzerland)*, 16(22). <https://doi.org/10.3390/w16223328>
- 17 Chhipi-Shrestha, G., Mian, H. R., Mohammadiun, S., Rodriguez, M., Hewage, K., & Sadiq, R. (2023). Digital water: Artificial intelligence and soft computing applications for drinking water quality assessment. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(5). <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02477-4>
- 18 Bonney, M. (2025). AI in water management: Six ways artificial intelligence can help solve problems across the water sector. *Environmental Finance Center Network*. <https://efcnetwork.org/ai-in-water-management/>
- 19 Zhou, S. W., Guo, S. S., Xu, W. X., Du, B. G., Liang, J. Y., Wang, L., & Li, Y. B. (2024). Digital twin-based pump station dynamic scheduling for energy-saving optimization in water supply system. *Water Resources Management*, 38(8). <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03791-2>
- 20 Feng, F., Liu, Z., Shi, G., & Mo, Y. (2024). An effective digital twin modeling method for infrastructure: Application to smart pumping stations. *Buildings*, 14(4), 863. <https://doi.org/10.3390/buildings14040863>
- 21 Radvilė, E., & Urbonas, R. (2025). Digital transformation in energy systems: A comprehensive review of AI, IoT, blockchain, and decentralised energy models. *Energetika*, 71(1), 1–22. <https://doi.org/10.6001/energetika.2025.71.1>
- 22 Afsari, F., & Ahmadi Jirdehi, M. (2024). Smart grid optimization considering decentralized power distribution and demand side management. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 18(8). <https://doi.org/10.1049/gtd2.13150>
- 23 Miller, R. (2023). The role of machine learning and artificial intelligence in strategic management. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4392353>
- 24 Barros, E. B. C., Souza, W. O., Costa, D. G., Filho, G. P. R., Figueiredo, G. B., & Peixoto, M. L. M. (2025). Energy management in smart grids: An edge-cloud continuum approach with deep Q-learning. *Future Generation Computer Systems*, 165, 107599. <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.107599>
- 25 Rajaperumal, T. A., & Columbus, C. C. (2025). Transforming the electrical grid: The role of AI in advancing smart, sustainable, and secure energy systems. *Energy Informatics*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00461-w>
- 26 Hamdan, A., Panda, S., Jain, M. S., Raj, V., & Mathew, S. (2025). Assessing municipal solid waste in Indian smart cities: A path towards waste-to-energy. *Heliyon*, 11(6), e42770. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42770>
- 27 Hussain, D. I., Elomri, D. A., Kerbach, D. L., & Omri, D. A. El. (2024). Smart city solutions: Comparative analysis of waste management models in IoT-enabled environments using multiagent simulation. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105247>



- 28 Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Hamza, E. H., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(4), 1959–1989. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01604-3>
- 29 Yao, Y., Weng, J., He, C., Gong, C., & Xiao, P. (2024). AI-powered strategies for optimizing waste management in smart cities in Beijing. *World Journal of Innovation and Modern Technology*, 7(5), 22–29. [https://doi.org/10.53469/wjimt.2024.07\(05\).02](https://doi.org/10.53469/wjimt.2024.07(05).02)
- 30 Isalm, M. S. (2024). AI for sustainable development: Addressing environmental and social challenges. *Journal of Artificial Intelligence General Science (JAIGS)*, 3(1), 97–105. <https://doi.org/10.60087/jaigs.v3i1.70>
- 31 Richards, C. E., Tzachor, A., Avin, S., & Fenner, R. (2023). Rewards, risks and responsible deployment of artificial intelligence in water systems. *Nature Water*, 1(5). <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00069-6>
- 32 Liu, X., Fan, K., Huang, X., Ge, J., Liu, Y., & Kang, H. (2024). Recent advances in artificial intelligence boosting materials design for electrochemical energy storage. *Chemical Engineering Journal*, 490, 151625. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151625>
- 33 Bragatto, T., Ghoreishi, M., Santori, F., Geri, A., Maccioni, M., Jabari, M., & Almughary, H. M. (2025). Moving towards electrified waste management fleet: State of the art and future trends. *Energies*, 18(8), 1992. <https://doi.org/10.3390/en18081992>
- 34 De Vito, S., Del Giudice, A., D'Elia, G., Esposito, E., Fattoruso, G., Ferlito, S., Formisano, F., Loffredo, G., Massera, E., D'Auria, P., & Di Francia, G. (2024). Future low-cost urban air quality monitoring networks: Insights from the EU's AirHeritage Project. *Sensors*, 24(15), 4829. <https://doi.org/10.3390/s24154829>
- 35 Ali, J., Kumar Singh, S., Jiang, W., Alenezi, A. M., Islam, M., Ibrahim Daradkeh, Y., & Mehmood, A. (2025). A deep dive into cybersecurity solutions for AI-driven IoT-enabled smart cities in advanced communication networks. *Computer Communications*, 229, 108000. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2024.108000>
- 36 Lakhout, A. (2025). Revolutionizing urban solid waste management with AI and IoT: A review of smart solutions for waste collection, sorting, and recycling. *Results in Engineering*, 25, 104018. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104018>
- 37 Saberikamarposhti, M., Kamyab, H., Krishnan, S., Yusuf, M., Rezania, S., Chelliapan, S., & Khorami, M. (2024). A comprehensive review of AI-enhanced smart grid integration for hydrogen energy: Advances, challenges, and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 67, 1009–1025. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.129>
- 38 Ojadi, J. O., Owulade, O. A., Odionu, C. S., & Onukwulu, E. C. (2025). AI-driven optimization of water usage and waste management in smart cities for environmental sustainability. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10(3), 4284–4306. <https://doi.org/10.47191/etj/v10i03.36>
- 39 Bibri, S. E., Huang, J., Jagatheesaperumal, S. K., & Krogstie, J. (2024). The synergistic interplay of artificial intelligence and digital twin in environmentally planning sustainable smart cities: A comprehensive systematic review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 20, 100433. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2024.100433>
- 40 Tahrour, F., Djeflal, F., & L. B. (2021). IoT and AI for real-time water monitoring and leak detection. *Journal of Renewable Energies*, 24, 179–187. <https://doi.org/10.54966/jreen.v24i1.879>
- 41 Deepak, B. L., Sabin, T. T., Darshana, A., Vindya, L., Suma Manjunath, N., Mallikarjunaswamy, S., Shilpa, M., & Rekha, V. (2024). Artificial intelligence-driven power management system for enhanced efficiency in smart grids. In *IEEE International Conference on Recent Advances in Science and Engineering Technology* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/ICRASET63057.2024.10895109>
- 42 Chatterjee, K., Raju, M., Bala, B., Nikitha, U., Prabhas, G., Ahmad, N., Qahmash, A., Ghribi, W., Lemos, B., & Mallik, S. (2025). Indoor air wellness: A predictive model for pollution control using advanced AI techniques. *IEEE Access*, 13, 42099–42115. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3547808>
- 43 Li, Y. (2025). AI-enhanced digital twins for energy efficiency and carbon footprint reduction in smart city infrastructure. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 118, 42–47. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/118/2025.20569>

III : RÉDUIRE L'USAGE DES RESSOURCES, ÉLARGIR L'ACCÈS À L'ÉLECTRICITÉ DÉCARBONÉE ET SOUTENIR LES COMMUNAUTÉS LOCALES

Article 1 : Comprendre la consommation énergétique de l'IA

- 1 Masanet, E., Lei, N., & Koomey, J. (2024). To better assess, monitor, and project AI's growing electricity demand, energy analysts need a data revolution. *Joule*, 8(9), 2427–2436. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.07.018>
- 2 Kamiya, G., & Coroamă, V. C. (2025). *Data centre energy use: Critical review of models and results*. International Energy Agency. March 31.
- 3 Stern, N., Romani, M., Pierfederici, R., Braun, M., Barraclough, D., Lingeswaran, S., Weirich-Benet, E., & Niemann, N. (2025). Green and intelligent: The role of AI in the climate transition. *npj Climate Action*, 4(1), 56. <https://doi.org/10.1038/s44168-025-00252-3>
- 4 International Energy Agency. (2025). *World Energy Outlook special report: Energy and AI*. Paris, France: IEA/OECD. April. Accessed on July 3, 2025. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- 5 Innovation for Cool Earth Forum. (2025). *Sustainable data centers roadmap*. October. Accessed on July 3, 2025.
- 6 Wadud, Z., MacKenzie, D., & Leiby, P. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.001>
- 7 Creutzig, F., Roy, J., Devine-Wright, P., Díaz-José, J., Geels, F. W., Grubler, A., Maïzi, N., Masanet, E., Mulugetta, Y., Onyige, C. D., Perkins, P. E., Sanches-Pereira, A., & Weber, E. U. (2022). Demand, services and social aspects of mitigation. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change* (Working Group III). Cambridge University Press.
- 8 Wilson, C., & Amanta, F. (2025). *Mapping AI risks for climate*. May 28. Accessed on July 3, 2025.
- 9 Malmodin, J., Lövehagen, N., Bergmark, P., & Lundén, D. (2024). ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome. *Telecommunications Policy*, 48(3), 102701. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2023.102701>
- 10 International Energy Agency. (2024). *World Energy Outlook 2024*. Paris, France: IEA/OECD. October.

- 11 Luers, A., Koomey, J., Masanet, E., Gaffney, O., Creutzig, F., Lavista Ferres, J., & Horvitz, E. (2024). Will AI accelerate or delay the race to net-zero emissions? *Nature*, 628, 718–720. <https://doi.org/10.1038/d41586-024-01137-x>
- 12 Koebler, J. (2024). Goldman Sachs: AI is overhyped, wildly expensive, and unreliable. *404 Media*. July 12. Accessed on July 3, 2025. <https://www.404media.co/goldman-sachs-ai-is-overhyped-wildly-expensive-and-unreliable/>
- 13 Nathan, A., Grimberg, J., & Rhodes, A. (2024). *Gen AI: Too much spend, too little benefit?* Goldman Sachs. June 25. Accessed on July 3, 2025. <https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/gs-research/gen-ai-too-much-spend-too-little-benefit/report.pdf>
- 14 Zhou, L., Schellaert, W., Martínez-Plumed, F., Moros-Daval, Y., Ferri, C., & Hernández-Orallo, J. (2024). Larger and more instructable language models become less reliable. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07930-y>
- 15 Liu, A., et al. (2025). *DeepSeek-V3 technical report*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2412.19437>
- 16 Koomey, J. G., Berard, S., Sanchez, M., & Wong, H. (2011). Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing. *IEEE Annals of the History of Computing*, 33(3), 46–54. <https://doi.org/10.1109/MAHC.2010.28>
- 17 Forbes, D. N. (2024). Can innovation curb AI's hunger for power? *Wall Street Journal*. July 24. Accessed on July 3, 2025.
- 18 Koomey, J. (2008). Worldwide electricity used in data centers. *Environmental Research Letters*, 3, 034008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/3/034008>
- 19 Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), 984. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>
- 20 Kaplan, J., McCandlish, S., Henighan, T., Brown, T. B., Chess, B., Child, R., Gray, S., Radford, A., Wu, J., & Amodei, D. (2020). *Scaling laws for neural language models*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08361>
- 21 Sartor, S., & Thompson, N. (2024). *Neural scaling laws for embodied AI*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.14005>
- 22 Patterson, D., Gonzalez, J., Hölzle, U., Le, Q., Liang, C., Munguia, L. M., Rothchild, D., So, D. R., Texier, M., & Dean, J. (2022). The carbon footprint of machine learning training will plateau, then shrink. *Computer*, 55(7), 18–28. <https://doi.org/10.1109/MC.2022.3148714>
- 23 Epoch AI. (2023). *Artificial intelligence: Performance on knowledge tests vs. training computation*. Accessed on July 3, 2025. <https://ourworldindata.org/grapher/ai-performance-knowledge-tests-vs-training-computation>
- 24 Moore, G. E. (1975). Progress in digital integrated electronics. *IEDM Technical Digest*. April 19, 11–13.
- 25 Dennard, R. H., Gaensslen, F. H., Yu, H.-N., Rideout, V. L., Bassous, E., & Leblanc, A. R. (1974). Design of ion-implanted MOSFETs with very small physical dimensions. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 9(5), 256–268.
- 26 Bohr, M. (2007). A 30 year retrospective on Dennard's MOSFET scaling paper. *IEEE SSCS Newsletter*, 12(1), 11–13.
- 27 Koomey, J., & Naffziger, S. (2016). Energy efficiency of computing: What's next? *Electronic Design*. November 28. Accessed on July 3, 2025.
- 28 Leiserson, C. E., Thompson, N. C., Emer, J. S., Kuszmaul, B. C., Lampson, B. W., Sanchez, D., & Schardl, T. B. (2020). There's plenty of room at the top. *Science*, 368(6495), eaam9744. <https://doi.org/10.1126/science.aam9744>
- 29 Koomey, J. G., Matthews, H. S., & Williams, E. (2013). Smart everything: Will intelligent systems reduce resource use? *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 311–343. <https://doi.org/10.1146/annurev-enviro-021512-110549>
- 30 York, Richard, and Julius Alexander McGee. 2016. "Understanding the Jevons paradox." *Environmental Sociology*. vol. 2, no. 1. 2016/01/02. pp. 77-87. <https://doi.org/10.1080/23251042.2015.1106060>
- 31 Lei, N., & Masanet, E. (2022). Climate- and technology-specific PUE and WUE estimations for U.S. data centers. *Resources, Conservation & Recycling*, 182, 106323. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106323>
- 32 Shehabi, A., Smith, S. J., Hubbard, A., Newkirk, A., Lei, N., Siddik, M. A., Holecek, B., Koomey, J. G., Masanet, E. R., & Sartor, D. A. (2024). *2024 United States data center energy usage report* (LBNL-2001637). Lawrence Berkeley National Laboratory. December 19. Accessed on July 3, 2025.
- 33 Lei, N., Ganeshalingam, M., Masanet, E., Smith, S., & Shehabi, A. (2025). Shedding light on U.S. small and midsize data centers. *Energy and Buildings*, 339, 115734. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115734>
- 34 London Economics International. (2025). *Uncertainty and upward bias are inherent in data center electricity demand projections*. July 7. Accessed on July 3, 2025.
- 35 European Commission. (2024). *Commission adopts EU-wide scheme for rating sustainability of data centres*. March 15. Accessed on July 3, 2025. https://energy.ec.europa.eu/news/commission-adopts-eu-wide-scheme-rating-sustainability-data-centres-2024-03-15_en
- 36 Martin, E., & Peskoe, A. (2025). *Extracting profits from the public*. Harvard Law School, Environmental & Energy Law Program. March. Accessed on July 3, 2025.
- 37 North American Electric Reliability Corporation. (2025). *Characteristics and risks of emerging large loads*. July. Accessed on July 3, 2025.
- 38 Koomey, J., Schmidt, Z., & Das, T. (2025). *Electricity demand growth and data centers: A guide for the perplexed*. Bipartisan Policy Center. February. Accessed on July 3, 2025.
- 39 Ghanadan, R., & Koomey, J. (2005). Using energy scenarios to explore alternative energy pathways in California. *Energy Policy*, 33(9), 1117–1142. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.11.011>
- 40 Schwartz, P. (1996). *The art of the long view*. New York, NY: Doubleday.
- 41 Ertel, C., & Solomon, L. K. (2014). *Moments of impact*. New York, NY: Simon & Schuster.
- 42 Koomey, J. (2017). *Turning numbers into knowledge* (3rd ed.). El Dorado Hills, CA: Analytics Press.



Article 2 : IA et eau Vers un avenir numérique durable

- 1 Boadu, V., El-Zahab, S., & Zayed, T. (2025). Enhancing automated acoustic leak detection in a water distribution network using ensemble machine learning. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 151(3). <https://doi.org/10.1061/jwrmd5.wreng-6578>
- 2 Makropoulos, C. K., Natsis, K., Liu, S., Mittas, K., & Butler, D. (2008). Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management. *Environmental Modelling & Software*, 23(12), 1448–1460. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.04.010>
- 3 Wu, H., Zhang, J., & Yang, F. (2021). Farooq, Z. (2024). Optimizing water filtration through machine learning based water quality indexing. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 13(8), 1583–1587. <https://doi.org/10.21275/sr24826150426>
- 4 Ye, Z., Yin, S., Cao, Y., & Wang, Y. (2024). AI-driven optimization of agricultural water management for enhanced sustainability. *Scientific Reports*, 14, Article 76915. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76915-8>
- 5 Liao, M., & Barros, A. P. (2023). Toward optimal rainfall for flood prediction in headwater basins: Orographic QPE error modeling using machine learning. *Water Resources Research*, 59(11).
- 6 International Energy Agency. (2025, April). *Energy and AI*. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- 7 Shehabi, A., Newkirk, A., Smith, S. J., Hubbard, A., Lei, N., Siddik, M. A. B., Holecek, B., Koomey, J., Masanet, E., & Sartor, D. (2024). *2024 United States data center energy usage report*. Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://doi.org/10.71468/P1WC7Q>
- 8 Goldman Sachs. (n.d.). *AI to drive 165% increase in data center power demand by 2030*. <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/ai-to-drive-165-increase-in-data-center-power-demand-by-2030>
- 9 Li, P., Yang, J., Islam, M. A., & Ren, S. (2025, June 17). Making AI less “thirsty”: Uncovering and addressing the secret water footprint of AI models. *Communications of the ACM*. <https://cacm.acm.org/sustainability-and-computing/making-ai-less-thirsty/>
- 10 Casas, C. D. L., & Steinwinder, T. (2019, December 30). Data center water: Complexity with hyperscale. *Water Technology*. <https://www.watertechnonline.com/process-water/article/14074115/data-center-water-complexity-with-hyperscale>
- 11 <https://thedatacenteraccord.org/accord>
- 12 Dieter, C. A., Maupin, M. A., Caldwell, R. R., Harris, M. A., Ivahnenko, T. I., Lovelace, J. K., Barber, N. L., & Linsey, K. S. (2018). *Estimated use of water in the United States in 2015* (U.S. Geological Survey Circular 1441). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/publication/cir1441>
- 13 Quinn, S. (2024, October). Arizona’s semiconductor boom sparks environmental concerns. *InBusiness Phoenix*. <https://inbusinessphx.com/technology-innovation/arizonas-semiconductor-boom-sparks-environmental-concerns>
- 14 Mytton, D. (2021, February 15). Data centre water consumption. *Nature Water*. <https://www.nature.com/articles/s41545-021-00101-w>
- 15 Fujs, T., & Kashiwase, H. (2023, August 23). Strains on freshwater resources: The impact of food production on water consumption. *World Bank Blogs*. <https://blogs.worldbank.org/en/opendata/strains-freshwater-resources-impact-food-production-water-consumption>
- 16 Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401–415. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8>
- 17 Mogavero, T. (2020, April 16). Clothed in conservation: Fashion & water. *Sustainable Campus (Florida State University)*. <https://sustainablecampus.fsu.edu/blog/clothed-conservation-fashion-water>
- 18 De Oliveira Bredariol, T. (2023, March 23). Clean energy can help to ease the water crisis. *International Energy Agency*. <https://www.iea.org/commentaries/clean-energy-can-help-to-ease-the-water-crisis>
- 19 Siddik, M. A. B., Shehabi, A., & Marston, L. T. (2021). *The environmental footprint of data centers in the United States* [Manuscript]. VTechWorks Repository. <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/109747>
- 20 IEEE Spectrum. (n.d.). *The real story on AI water usage at data centers*.
- 21 OregonLive. (2022, December). Google’s water use is soaring in The Dalles, records show. <https://www.oregonlive.com/silicon-forest/2022/12/googles-water-use-is-soaring-in-the-dalles-records-show-with-two-more-data-centers-to-come.html>
- 22 https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-10/documents/corrected_sixth_drinking_water_infrastructure_needs_survey_and_assessment.pdf
- 23 Bluefield Research. (2025, July 16). Water losses cost U.S. utilities US\$6.4 billion annually. <https://www.bluefieldresearch.com/ns/water-losses-cost-u-s-utilities-us6-4-billion-annually/>
- 24 Bizo, D., Ascierto, R., Lawrence, A., & Davis, J. (2021). *Uptime Institute global data center survey 2021*. Uptime Institute. https://uptimeinstitute.com/uptime_assets/4d10650a2a92c06a10e2c70e320498710fed2ef3b402aa82fe7946fae3887055-2021-data-center-industry-survey.pdf
- 25 Data Center Watch. (n.d.). *\$64 billion of data center projects have been blocked or delayed amid local opposition*. <https://www.datacenterwatch.org/report>
- 26 Sri-Saravanapavaan, R., Medina, J., Lopez, L., & Ghosh, R. (2025, March 21). *Water management challenges will loom large amid surging computing demand*. Moody’s.
- 27 Mayeen, S. (2023, November 16). S&P Global Market Intelligence Outlook for 2024 projects heightened water stress and growing scrutiny for businesses. *S&P Global Market Intelligence*. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/media-center/press-release/sp-global-market-intelligence-outlook-for-2024-projects-heightened-water-stress-and-growing-scrutiny-for-businesses>
- 28 Sbarra, A., & Williams, L. (2024, May 30). *Uptime Institute cooling systems survey 2024: Direct liquid cooling*. Uptime Intelligence. <https://intelligence.uptimeinstitute.com/resource/uptime-institute-cooling-systems-survey-2024-direct-liquid-cooling>

- 29 Bray, B., & Rebarber, F. (2023, May 20). Liquid cooling in the artificial intelligence landscape: Time to gear up. *Data Center Dynamics*. <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions-data-center-dcd-industry-views-comment/liquid-cooling-in-the-artificial-intelligence-landscape-time-to-gear-up/>
- 30 Microsoft. (n.d.). *Sustainable by design: Next-generation datacenters consume zero water for cooling*. Microsoft Cloud Blog.
- 31 ECS. (2024, August 27). The science behind immersion cooling: Enhancing data center performance and profitability. <https://www.equuscs.com/science-behind-immersion-cooling/>
- 32 International Energy Agency 4E. (2016, June). *United States data center energy usage report*. <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2016/06/05j - LBNL - US Data Centres Energy USe.pdf>
- 33 Energy Star. (n.d.). *Raise the temperature*. https://www.energystar.gov/products/data_center_equipment/5-simple-ways-avoid-energy-waste-your-data-center/raise-temperature
- 34 Han, S., Liu, X., Mao, H., Pu, J., Pedram, A., Horowitz, M., & Dally, W. J. (2016). Deep compression and EIE: Efficient inference engine on compressed deep neural network. In *2016 IEEE Hot Chips 28 Symposium (HCS)*. <https://doi.org/10.1109/hotchips.2016.7936226>
- 35 Cherney, M. A. (2024, November 19). Microsoft launches two data center infrastructure chips to speed AI applications | Reuters. <https://www.reuters.com/technology/artificial-intelligence/microsoft-launches-two-data-center-infrastructure-chips-speed-ai-applications-2024-11-19/>
- 36 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2025). *Implications of artificial intelligence-related data center electricity use and emissions: Proceedings of a workshop*. The National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/catalog/29101/implications-of-artificial-intelligence-related-data-center-electricity-use-and-emissions>
- 37 Cai, Ximing et al (2025). Circular Economy for Sustainable Water Management. <https://cee.illinois.edu/news/circular-economy-for-sustainable-water-management>

IV : RENFORCER LES POLITIQUES PUBLIQUES ET LA GOUVERNANCE DE L'IA AU SERVICE DE LA DURABILITÉ

Article 1 : Gouverner la double transition pour un avenir compatible avec la planète

- 1 OpenAI. (2022, November 30). *Introducing ChatGPT*. <https://openai.com/index/chatgpt/>
- 2 Dignum, V. (2025). *Beyond the AI race: Why global governance is the greatest innovation*. AI Policy Exchange Forum (AIPEX). <https://doi.org/10.63439/LNQA3726>
- 3 Maslej, N., Fattorini, L., Perrault, R., et al. (2025). *The AI Index 2025 annual report*. AI Index Steering Committee, Institute for Human-Centered AI, Stanford University. <https://hai.stanford.edu/ai-index>
- 4 World Economic Forum. (2025). *The global risks report 2025*. <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2025/digest/>
- 5 International Energy Agency. (2025). *Energy and AI*. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- 6 Ji, J., Qiu, T., Chen, B., et al. (2023). *AI alignment: A comprehensive survey*. arXiv (Computer Science). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.19852>
- 7 Le règlement européen sur l'IA (AI Act) déploie une approche fondée sur les risques afin de protéger les citoyens contre un large éventail de risques, allant de « minimes » à « inacceptables ».
- 8 On peut citer comme exemples les réseaux internationaux (par exemple, le Global Civil Society Organisations and Academic Network on AI Ethics and Policy de l'UNESCO), les ONG (par exemple, AlgorithmWatch) et les appels et mouvements collectifs (par exemple, l'institut Future of Life).
- 9 European Parliament. (2002). *Directive 2002/58/EC on privacy and electronic communications*. <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/data-protection-in-the-electronic-communications-sector.html>
- 10 United States Congress. (2000). *Public Law 106–229*. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-106publ229/pdf/PLAW-106publ229.pdf>
- 11 À titre d'exemple, des chimies de batteries prometteuses peuvent réduire considérablement la dépendance au lithium : <https://www.bbc.com/news/technology-67912033>
- 12 European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, & Mazzucato, M. (2018). *Mission-oriented research & innovation in the European Union: A problem-solving approach to fuel innovation-led growth*. Publications Office. <https://doi.org/10.2777/360325>
- 13 Soares, N., & Fallenstein, B. (2014). *Aligning superintelligence with human interests: A technical research agenda* (Technical Report No. 8). Machine Intelligence Research Institute. [https://intelligence.org/files/obsolete/TechnicalAgenda\[old\].pdf](https://intelligence.org/files/obsolete/TechnicalAgenda[old].pdf)
- 14 Gaffney, O., Luers, A., Carrero-Martinez, F., et al. (2025). The Earth alignment principle for artificial intelligence. *Nature Sustainability*, 8, 467–469. <https://doi.org/10.1038/s41893-025-01536-6>
- 15 L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a récemment publié un rapport complet sur la relation bidirectionnelle entre l'IA et l'énergie : <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- 16 Le rapport annuel d'impact AI for Good (2024) de l'Union internationale des télécommunications (UIT) identifie le secteur de l'énergie comme l'un des principaux bénéficiaires de l'intelligence artificielle
- 17 La divergence des projections conduit les estimations industrielles et académiques à appeler à un renforcement de la transparence et de l'évaluation des usages énergétiques de l'IA. Pour plus de contexte, voir Epoch AI
- 18 Xiao, T., Nerini, F. F., Matthews, H. D., et al. (2025). *Artificial intelligence for sustainable energy and climate mitigation*. *Nature Sustainability*. <https://doi.org/10.1038/s41893-025-XXXXX>
- 19 Galaz, V., & Schwenius, M. (Eds.). (2025). *AI for a planet under pressure*. Stockholm Resilience Centre & Potsdam Institute for Climate Impact Research. <http://arxiv.org/abs/2510.24373>



- 20 Gassert, F., Gawel, E., et al. (2025). *AI for nature: How AI can democratize and scale action for nature*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/research/ai-nature-how-ai-can-democratize-and-scale-action-nature>
- 21 The study of the published literature on AI for sustainability science (ref. 19 and 20) reports
- 22 Sous l'égide de l'UIT, de l'UNESCO et de l'Anatel, l'institut aura pour mission d'assurer un déploiement plus large et plus ouvert des ressources en matière d'IA dans les pays en développement (<https://www.itu.int/initiatives/green-digital-action/events/cop30/cop30-announcement-artificial-intelligence-climate-institute/>).
- 23 Microsoft AI Economy Institute. AI Diffusion report. (Novembre 2025).
- 24 L'équipe SUREAL de l'Université de Zurich a développé et mis à disposition des outils fondés sur l'IA visant à améliorer la transparence des rapports d'entreprise et des documents de politique publique : <https://sureal.ai/>
- 25 Sustainable Views. (2024). *Green premium challenges in industrial production*. <https://sustainableviews.com/>
- 26 Boucher, S., Hallin, C. A., & Paulson, L. (2023). *The Routledge handbook of collective intelligence for democracy and governance* (1st ed.). Routledge.

Article 2 : Gouvernance des données pour l'intelligence artificielle dans la lutte contre le changement climatique

- 1 Global Partnership on Artificial Intelligence, Climate Change AI, & Centre for AI & Climate. (2021). *Climate change & AI: Recommendations for government*. November.
- 2 Rolnick, D., Donti, P. L., Kaack, L. H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., Ross, A. S., Milojevic-Dupont, N., Jaques, N., Waldman-Brown, A., Luccioni, A. S., Maharaj, T., Sherwin, E. D., Mukkavilli, S. K., Kording, K. P., Gomes, C. P., Ng, A. Y., Hassabis, D., Platt, J. C., Creutzig, F., Chayes, J., & Bengio, Y. (2022). *Tackling climate change with machine learning*. *ACM Computing Surveys*, 55(2), Article 42. <https://doi.org/10.1145/3485128>
- 3 McCormick, C., & Friedmann, J. (2024). *How AI can help mitigate climate change and drive business efficiency*. Carbon Direct. <https://www.carbon-direct.com/insights/how-ai-can-help-mitigate-climate-change-and-drive-business-efficiency>
- 4 Google. (2025). *Environmental report 2025*.
- 5 Climate Change AI. (2025). *Data gaps (beta)*. Retrieved August 17, 2025, from <https://www.climatechange.ai/dev/datagaps>
- 6 Masterson, V. (2024, February 12). *9 ways AI is helping tackle climate change*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/>
- 7 Sen, R., Rattan, J., & Kante, R. (2025). *Responsible AI and data governance: What you need to know*. PwC. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.pwc.com/us/en/tech-effect/ai-analytics/responsible-ai-data-governance.html>
- 8 Data Foundation. (2025). *Climate data collaborative*. Retrieved August 23, 2025, from <https://datafoundation.org/pages/Climate-Data-Collaborative>
- 9 Dataiku. (2025). *Data & AI governance: What it is and how to do it right*. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.dataiku.com/stories/detail/ai-governance/>
- 10 Juhro, S. M., Robinson, I., Rahadyan, H., & Lim, C. (2024). *Advancing climate action through enhanced data governance: A case of Indonesia*. Paper presented at the IFC Workshop *Addressing climate change data needs: The global debate and central banks' contribution*, May 6–7, 2024.
- 11 Informatica. (2025). *AI governance: What it is and why it matters*. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.informatica.com/resources/articles/ai-governance-explained.html>
- 12 Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., & Rummukainen, M. (2013). Evaluation of climate models. In T. F. Stocker et al. (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis* (pp. 741–866). Cambridge University Press.
- 13 International Telecommunication Union. (2023). *Measuring digital development: Facts and figures 2023*. ITU.
- 14 Iida, K. (2022, June 13). *Data promises to support climate action: Is it a double-edged sword?* Oxford Insights. <https://oxfordinsights.com/insights/data-promises-to-support-climate-action-is-it-a-double-edged-sword/>
- 15 International Energy Agency. (2025). *Energy and AI: World Energy Outlook special report*. IEA.
- 16 UNESCO. (2025). *Data governance in the digital age*. Retrieved August 24, 2025, from <https://www.unesco.org/en/data-governance-digital-age>
- 17 Peixoto, T. C., Kaiser, K., & Teixeira, B. (2023, November 30). *Leveraging data and artificial intelligence for climate-smart decision-making in government*. World Bank. <https://blogs.worldbank.org/en/governance/leveraging-data-and-artificial-intelligence-climate-smart-decision-making-government>
- 18 U.S. Federal Government. (2025). *Data.gov: Climate*. Retrieved November 25, 2025, from <https://data.gov/climate/1/>
- 19 National Centers for Environmental Information. (2025). *Climate data records*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Retrieved August 24, 2025, from <https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-data-records>
- 20 World Bank. (2025). *Climate change knowledge portal*. Retrieved August 24, 2025, from <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>
- 21 OS-Climate. (2025). *Open source breakthrough for climate-aligned investing*. Retrieved August 24, 2025, from <https://os-climate.org/>
- 22 Hardinges, J. (2018, July 10). *What is a data trust?* Open Data Institute. <https://theodi.org/insights/explainers/what-is-a-data-trust/>
- 23 Climate Action Data Trust. (2025). *Connecting carbon markets through open data*. Retrieved August 24, 2025, from <https://climateactiondata.org/>
- 24 Verhulst, S. G. (2024). *The need for climate data stewardship: 10 tensions and reflections regarding climate data governance*. *Data & Policy*, 6, e52. <https://doi.org/10.1017/dap.2024.16>
- 25 ClimateAi. (2025). *ClimateAi success stories*. Retrieved August 24, 2025, from <https://climate.ai/case-studies/>

V : RENFORCER LES COMPÉTENCES POUR MOBILISER L'IA AU SERVICE DE LA DURABILITÉ

Article 1 : Durabilité et IA

Les signaux de la main-d'œuvre issus de la double transition

- 1 Hood, A., et al. (2025). *AI data partnerships: LinkedIn methodology*. LinkedIn Economic Graph.
- 2 Afin de créer des indicateurs mondiaux, nous avons analysé les données provenant d'Argentine, d'Australie, d'Autriche, de Belgique, du Brésil, du Canada, du Chili, de Colombie, du Costa Rica, de Tchéquie, du Danemark, d'Égypte, de Finlande, de France, d'Allemagne, de Grèce, d'Inde, d'Indonésie, d'Irlande, d'Italie, du Luxembourg, de Malaisie, du Mexique, des Pays-Bas, de Nouvelle-Zélande, de Norvège, du Pakistan, du Pérou, des Philippines, de Pologne, du Portugal, de Roumanie, d'Arabie saoudite, de Singapour, d'Afrique du Sud, d'Espagne, de Suède, de Suisse, de Thaïlande, des Émirats arabes unis, du Royaume-Uni, des États-Unis et du Vietnam.
- 3 International Energy Agency. (2025). *Energy and AI*.
- 4 La méthodologie verte de LinkedIn est détaillée dans notre Global Green Skills Report 2024.
- 5 A methodology for process improvement.
- 6 LinkedIn. (2024). *Global green skills report 2024*. LinkedIn Economic Graph.

Article 2 : Repenser les compétences, l'IA et l'avenir du travail en Afrique

- 1 Walsh, D., & Morales, H. R. (2023, October 28). *The world is becoming more African*. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/interactive/2023/10/28/world/africa/africa-youth-population.html>
- 2 World Bank. (n.d.). *Creating jobs for Africa's growing population*. Retrieved June 9, 2025, from <https://www.worldbank.org/en/topic/competitiveness/publication/creating-jobs-for-africas-growing-population>
- 3 International Labour Organization. (2020, December 31). *The transition from the informal to the formal economy in Africa*. <https://www.ilo.org/publications/transition-informal-formal-economy-africa-0>
- 4 African Development Bank Group. (2019, April 18). *What is the Jobs for Youth in Africa strategy?* <https://www.afdb.org/en/topics-and-sectors/initiatives-partnerships/jobs-for-youth-in-africa/what-is-the-jobs-for-youth-in-africa-strategy>
- 5 Adapted from ILO (2023). Women and men in the informal economy: A statistical update, <https://www.ilo.org/publications/women-and-men-informal-economy-statistical-update>.
- 6 Duarte, C. (2024, May 8). *The duality of the education challenge in Africa: Historical imperatives and 21st-century necessities*. *Africa Renewal*. <https://africarenewal.un.org/en/magazine/duality-education-challenge-africa-historical-imperatives-and-21st-century-necessities>
- 7 Cepla, Z., & Dempster, H. (2021, June 23). *There's no such thing as a "low"-skill worker*. Center for Global Development. <https://www.cgdev.org/blog/theres-no-such-thing-low-skill-worker>
- 8 African Union. (n.d.). *The African Union annual small and medium enterprises forum*. Retrieved July 10, 2025, from <https://au.int/es/node/41891>
- 9 Moloi-Motsepe, P., Nwuneli, N. O., & Bonnici, F. (2023, January 19). *How social entrepreneurs can drive an inclusive "Africa's century"*. *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/stories/2023/01/davos23-social-entrepreneurs-inclusive-africa/>
- 10 Lock, H. (2022, July 29). *Can social entrepreneurs make Africa's digital boom more inclusive?* Devex. <https://www.devex.com/news/sponsored/can-social-entrepreneurs-make-africa-s-digital-boom-more-inclusive-103651>
- 11 Le développement des compétences (skilling) implique généralement la transmission de compétences de base en IA et en numérique ; le perfectionnement des compétences (upskilling) renvoie à l'acquisition de compétences supplémentaires ; et la reconversion professionnelle (reskilling) consiste à transmettre un ensemble entièrement nouveau de compétences à la main-d'œuvre actuelle et future.
- 12 International Labour Organization. (2024, November 29). *Mind the AI divide*. <https://www.ilo.org/publications/mind-ai-divide>
- 13 Qhala & Qubit Hub. (2025). *AI talent readiness index for Africa*. <https://qbit.africa/publications/ai-talent-readiness-index>
- 14 Bhatia, K. (2024, April 3). *Our new report on AI's opportunity for developing countries*. Google. <https://blog.google/outreach-initiatives/public-policy/google-ai-developing-countries-growth/>
- 15 AI Talent Readiness Index. (n.d.). *Overall performance*. Retrieved July 10, 2025, from <https://talentindex.ai/overall-performance>
- 16 Manyika, J. (2025, April 3). *Turning AI's opportunity into reality for Africa*. Google. <https://blog.google/intl/en-africa/company-news/technology/turning-ais-opportunity-into-reality-for-africa/>
- 17 Schutters, L. (2025, June 27). *Africa has an AI skills problem that is forcing a youth empowerment rethink*. SAP Africa News Center. <https://news.sap.com/africa/2025/06/africa-has-an-ai-skills-problem-that-is-forcing-a-youth-empowerment-rethink/>
- 18 International Monetary Fund. (2024, October). *Regional economic outlook for Sub-Saharan Africa: Reforms amid great expectations*. <https://www.imf.org/en/Publications/REO/SSA/Issues/2024/10/25/regional-economic-outlook-for-sub-saharan-africa-october-2024>
- 19 International Labour Organization. (2018, April 30). *More than 60 per cent of the world's employed population are in the informal economy*. <https://www.ilo.org/resource/news/more-60-cent-world%E2%80%99s-employed-population-are-informal-economy>
- 20 International Monetary Fund. (2021). The close relationship between informality and gender gaps in Sub-Saharan Africa. In *The global informal workforce*. <https://www.elibrary.imf.org/display/book/9781513575919/ch008.xml>
- 21 International Labour Organization. (2022, April 25). *Concept note: Informal economy in Africa – Which way forward? Making policy responsive, inclusive and sustainable*. <https://www.ilo.org/resource/concept-note-informal-economy-africa-which-way-forward-making-policy>



- 22 Perrigo, B. (2023, January 15). *OpenAI used Kenyan workers on less than \$2 per hour: Exclusive*. *TIME*. <https://time.com/6247678/openai-chatgpt-kenya-workers/>
- 23 Lee, D. (2018, November 3). *Why Big Tech pays poor Kenyans to teach self-driving cars*. *BBC News*. <https://www.bbc.com/news/technology-46055595>
- 24 Ng'weno, A., & Porteous, D. (2018, October 15). *Let's be real: The informal sector and the gig economy are the future, and the present, of work in Africa*. Center for Global Development. <https://www.cgdev.org/publication/lets-be-real-informal-sector-and-gig-economy-are-future-and-present-work-africa>
- 25 African Centre for Technology Studies. (2024). *Application of artificial intelligence in the informal sector in Africa*. <https://acts-net.org/wp-content/uploads/APPLICATION-OF-AI-IN-INFORMAL-SECTOR-IN-AFRICA.pdf>
- 26 Ajene, E. (2021, August 16). *How offline agent networks are driving Africa's digital development* [Substack newsletter]. Afridigest. <https://afridigest.substack.com/p/how-offline-agent-networks-are-driving>
- 27 Johnen, C., Parlasca, M., & Mußhoff, O. (2023). *Mobile money adoption in Kenya: The role of mobile money agents*. *Technological Forecasting and Social Change*, 191, 122503. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122503>
- 28 Ironsi, T. (2023, October 5). *The evolution of agency banking in Africa*. The Paystack Blog. <https://paystack.com/blog/operations/agency-banking-africa>
- 29 Kajilwa, G. (2025, January 22). *E-commerce now bets on rural areas to grow market*. *The Standard*. <https://www.standardmedia.co.ke/business/enterprise/article/2001510111/e-commerce-now-bets-on-rural-areas-to-grow-market>
- 30 Bothello, J., & Weiss, T. (2024). *Strengthening Africa's urban informal economies*. *Stanford Social Innovation Review*, 23(1), 46–55. <https://doi.org/10.48558/NMVN-GM10>
- 31 Weiss, T. (2024, March 24). *Why do identical informal businesses set up side by side? It's a survival tactic – Kenya study*. *The Conversation*. <http://theconversation.com/why-do-identical-informal-businesses-set-up-side-by-side-its-a-survival-tactic-kenya-study-225582>
- 32 Bennett, J., & Estrin, S. (2007, July). *Informality as a stepping stone: Entrepreneurial entry in a developing economy*. IZA Institute of Labor Economics. <https://www.iza.org/publications/dp/2950/informality-as-a-stepping-stone-entrepreneurial-entry-in-a-developing-economy>
-

Article 3 : Former à l'intelligence artificielle chez Veolia Défis et stratégie

- 1 World Economic Forum. (2025). *Future of Jobs Report*
- 2 McKinsey Global institute. (2024). *A new Future of Work, the raise to deploy AI and raise skills in Europe and beyond*
- 3 World Economic Forum. (2024). *Future of Work report*

Rédacteur en chef: Nicolas Renard, Directeur Exécutif, Institut Veolia

Directrice de la publication: Dinah Louda, Présidente, Institut Veolia et Amy Luers, Directrice Science et Innovation durables, Microsoft.

Organisme émetteur:

La revue est publiée par l'Institut Veolia EISSN: 1867-8521 et Microsoft.

Contact:

institut.ve@veolia.com

©Auteur(s):

Les auteurs conservent la titularité des droits d'auteur mais autorisent le public à copier, distribuer, transmettre et adapter leurs travaux à condition que leur nom soit cité comme il se doit.

©2026 Microsoft Corporation et l'Institut Veolia.

Les auteurs contributeurs conservent les droits d'auteur sur leur article. Tous les contenus peuvent être copiés et utilisés à condition d'être correctement cités. Le présent document est fourni «en l'état». Les informations et opinions exprimées dans ce document, y compris les URL et autres références à des sites Internet, sont susceptibles d'être modifiées sans préavis. Vous assumez l'entière responsabilité de l'utilisation de ces informations.

Le logo et la marque Microsoft sont la propriété de Microsoft Corporation. Le logo et la marque Veolia sont la propriété de Veolia. Tous droits réservés. Sauf mention contraire, toute référence à des noms commerciaux, produits, services ou liens hypertextes vers des tiers ne constitue ni n'implique une approbation, un parrainage ou une recommandation de la part de Microsoft ou de l'Institut Veolia.

Conception: À toute fin utile ©Studio graphique Archipel&Co avec Carole Sadi-Billaux et Wee Pin Ng.

Réalisation: À toute fin utile ©Studio graphique Archipel&Co avec Carole Sadi-Billaux et Wee Pin Ng.

Imprimé en France

avec des encres à base végétale par un prestataire labellisé Imprim'vert sur du papier traité sans chlore, certifié FSC, produit issu de forêts bien gérées et d'autres sources maîtrisées.

Crédits photos:

Photothèque Microsoft, photothèque Veolia, iStock, Shutterstock, X, différents crédits mentionnés dans les légendes des visuels, DR.



Institut Veolia
30, rue Madeleine Vionnet - 93300 Aubervilliers, France
www.institut.veolia.org

Microsoft
One Microsoft Way, Redmond, WA 98052, United States
www.microsoft.com