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'IA[1]. 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.

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

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 décennie[2]. 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'efficacité[3], 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.

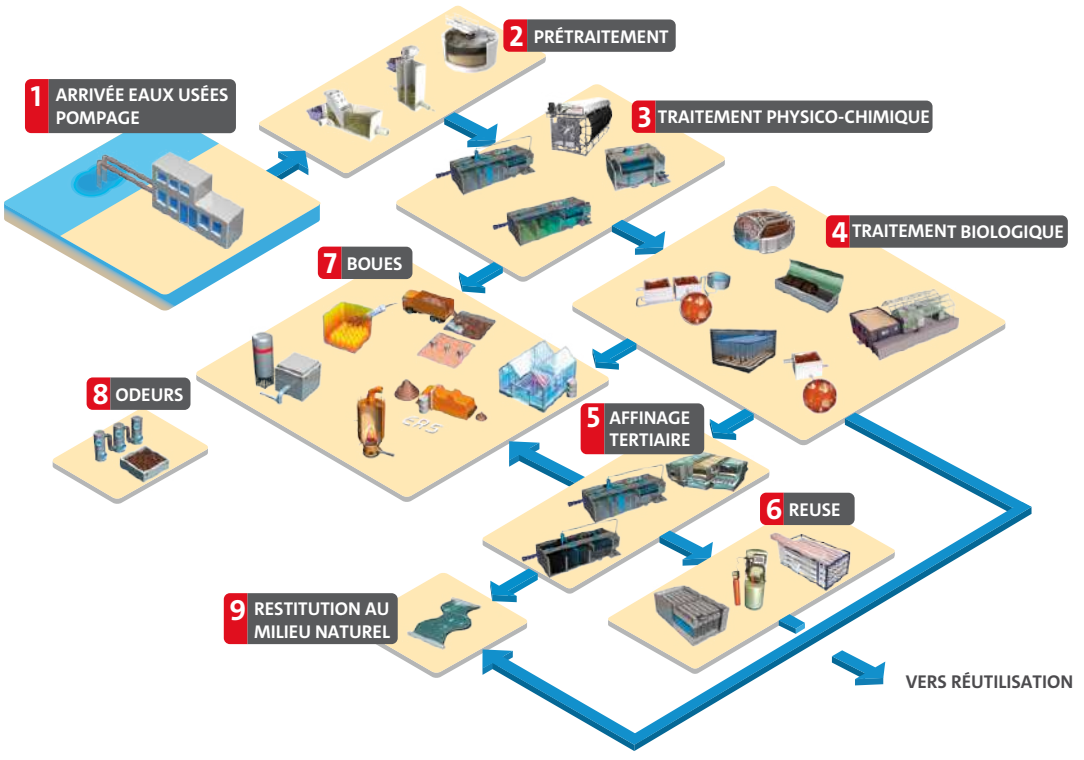
Ces leviers sont particulièrement pertinents dans le traitement des eaux usées, où les exigences de qualité sont strictes, les processus physiques complexes et la consommation d'énergie concentrée sur un nombre limité d'étapes clés.

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 installation[4]. 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.

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



Veolia × 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 200 usines Veolia fonctionnent avec la solution PureControl. Le système agrège des données à haute fréquence (généralement toutes les 15 minutes) provenant de plusieurs sources :

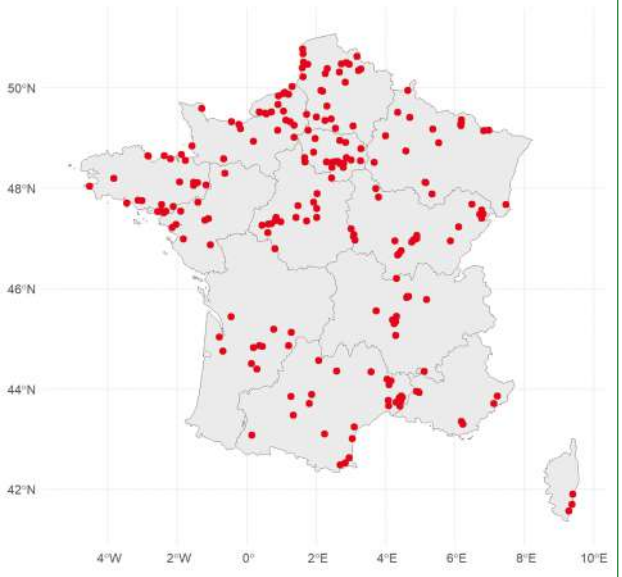
- **Capteurs internes :** débit d'eau, potentiel redox[5], temps d'aération, puissance électrique.
- **Analyses en laboratoire :** indicateurs réglementaires de qualité (par exemple, nitrate, ammonium).
- **Signaux externes :** prévisions météorologiques et conditions ambiantes (neige, pluie, humidité, 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*

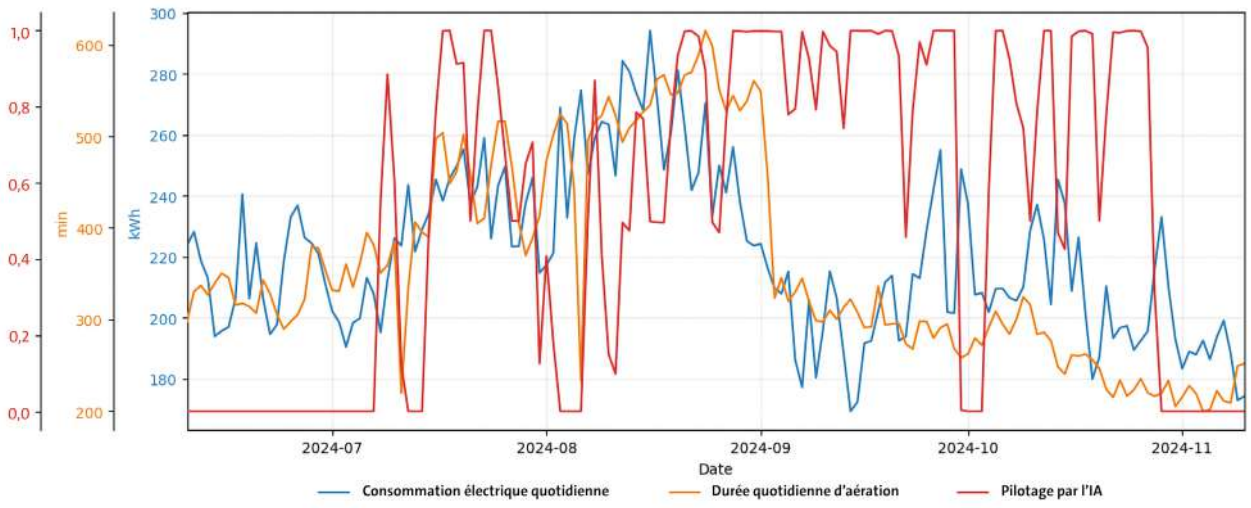


Évaluation de l'impact : méthodes et premières conclusions

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 CO_2e) 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 l'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 :

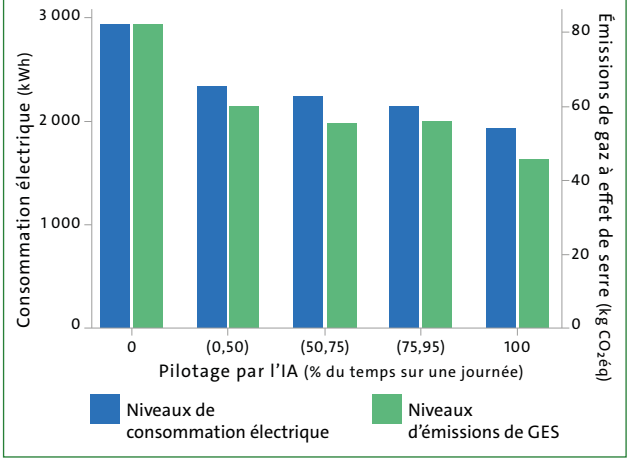
- **Énergie et émissions :** une réduction moyenne de près de 10 % de la consommation d'électricité et des émissions de GES associées est observée les jours où l'IA est pleinement active, par rapport aux jours où le procédé n'est pas piloté par l'IA. Ces résultats n'ont jusqu'à présent été établis que 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.

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.

PRECAUCIÓN
DIGESTIÓN DE LODOS Y
MANEJO BIOGÁS
AGUAS