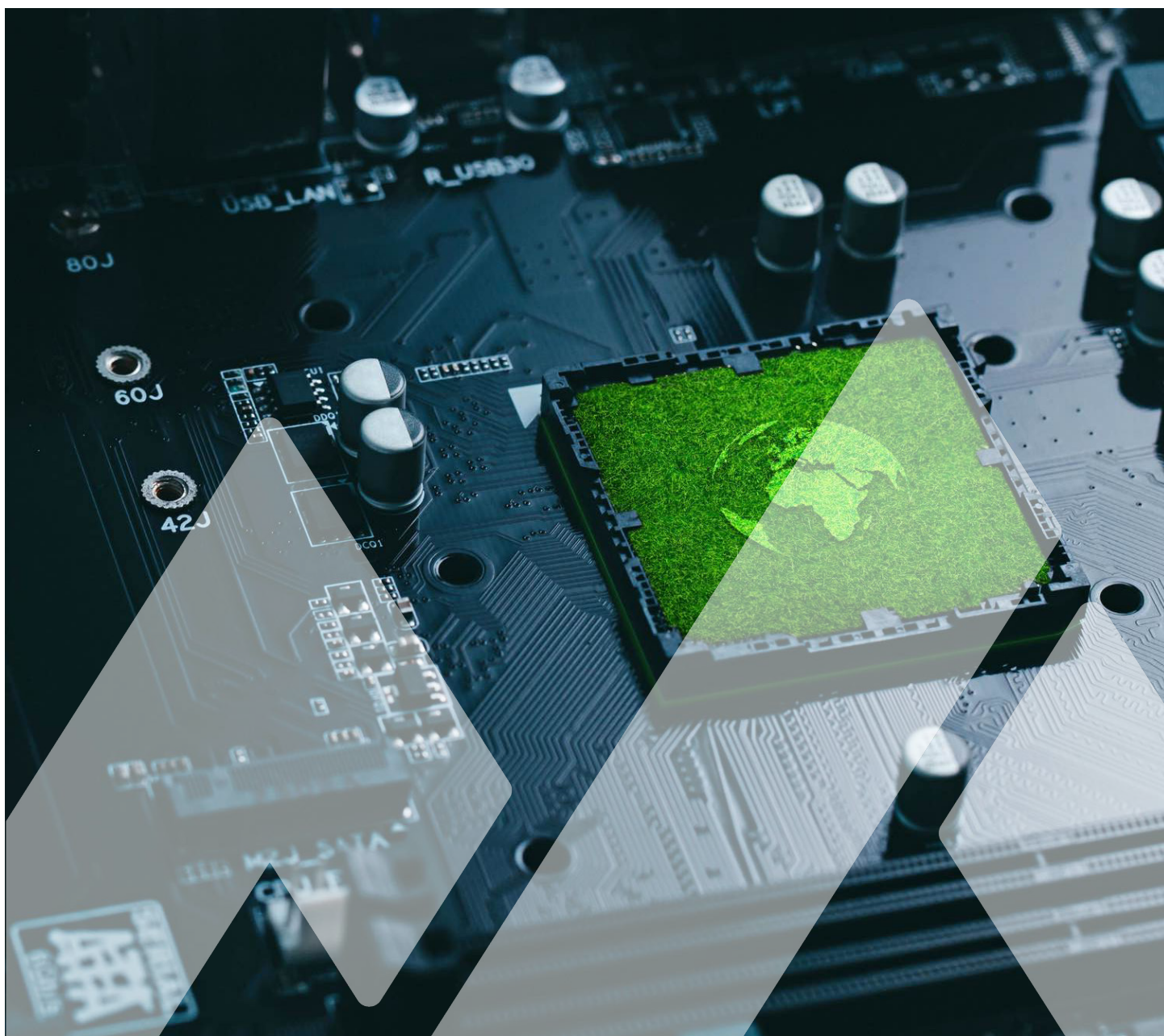




Accélérer l'essor des data centers avec des solutions bas carbone

Regards de la Chine et perspectives mondiales



Auteurs et Remerciements

Auteurs

Ting Li
Wei Li
Dengfeng Liao
Yujing Liu
Ziyi Liu
Guangxu Wang
Meng Wang
Hongyou Xu

Les auteurs sont présentés par ordre alphabétique. Tous les auteurs sont issus de RMI, sauf mention contraire.

Contacts

Yujing Liu, yujingliu@rmi.org
Wei Li, wli@rmi.org

Droits d'auteur et citation

Yujing Liu, Wei Li, Ziyi Liu, Meng Wang, Guangxu Wang et al., *Propulser la croissance des centres de données grâce à des solutions bas carbone : perspectives chinoises et éclairage mondial*, RMI, 2024, <https://rmi.org/insight/powering-the-data-center-boom-with-low-carbon-solutions>.

Chez RMI, la collaboration est au cœur de nos valeurs et nous nous engageons à accélérer la transition énergétique en partageant nos connaissances et expertises. Ainsi, nous invitons toutes les parties intéressées à consulter, partager et citer nos travaux sous la licence Creative Commons CC BY-SA 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

Toutes les images utilisées proviennent de iStock.com, sauf mention contraire.

Remerciements

Nous tenons à remercier sincèrement les experts suivants pour leurs avis et leurs contributions :

Shixing Ding, Southeast University
Zhaohao Ding, North China Electric Power University
Feng Guo, Chinese Institute of Electronics
Shiyan Hou, China Institute of Communications
Zeming Jiang, Unicompay Co., Ltd
Weibing Li, Unicompay Co., Ltd
Yao Meng, Institut de recherche sur l'Internet de l'énergie, Université Tsinghua
Wu Ouyang, Institut chinois des communications
Shuguang Qi, Institut chinois des communications, Académie chinoise des technologies de l'information et de la communication
Technologies de l'information et de la communication
Shuangquan Shao, Université des sciences et technologies de Huazhong
Jin Tang, SinoCarbon Innovation and Investment Co., Ltd.
Sicheng Tao, Unicompay Co., Ltd
Xinyue Wan, Institut chinois des communications
Yingya Zhou, Tencent Holdings Ltd.

Le contenu présenté dans ce rapport ne reflète pas nécessairement les opinions des experts mentionnés ci-dessus, de leurs institutions ou des soutiens du projet.



À propos de RMI

RMI est une organisation indépendante à but non lucratif, fondée en 1982 sous le nom de Rocky Mountain Institute, qui transforme les systèmes énergétiques mondiaux grâce à des solutions axées sur le marché afin de s'aligner sur un futur à 1,5°C et garantir à tous un avenir propre, prospère et décarboné. Nous sommes actifs dans les régions les plus stratégiques du globe et collaborons avec des entreprises, des décideurs, des communautés et des ONG pour repérer et amplifier les actions sur les systèmes énergétiques, visant à réduire la pollution climatique d'au moins 50 % d'ici 2030. RMI possède des bureaux à Basalt et Boulder (Colorado), à New York, Oakland (Californie), Washington D.C., Abuja (Nigeria) et Pékin (République populaire de Chine).

Sommaire

Décarboner les data centers dans l'action climatique mondiale.....	5
L'essor de la puissance de calcul entraîne une forte hausse de la consommation d'énergie des data centers et des émissions de carbone	5
Dissocier la croissance de la puissance informatique des émissions carbone, un choix indispensable	7
Défis structurels pour la décarbonation des data centers	9
La croissance des data centers dépasse celle des infrastructures énergétiques	9
Le potentiel d'efficacité énergétique des data centers reste largement inexploité	12
Le décalage temporel et géographique entre la demande informatique et l'énergie verte complique la décarbonation des data centers	15
Une coordination des politiques et des mécanismes de marché est essentielle pour accélérer la réduction du carbone dans les data centers.....	18
Itinéraires de transformation globale pour dissocier l'essor des data centers de la hausse des émissions	20
Prendre en compte plusieurs critères pour implanter et concevoir les centres de données	20
Optimiser l'efficacité énergétique dans les centres de données, qu'ils soient nouveaux ou existants.....	24
Garantir un usage de l'énergie sans carbone, évolutif et interactif avec le réseau dans les centres de données	28
Mobiliser politiques et mécanismes de marché pour accélérer la réduction du carbone dans les centres de données	33
Vers l'avenir : Pistes d'actions pour décarboner les centres de données..	35
Notes de fin.....	38

La décarbonation des centres de données au cœur des actions climatiques mondiales

L'expansion de la puissance informatique entraîne une hausse importante de la consommation énergétique et des émissions carbone des centres de données

À mesure que la transformation numérique et intelligente mondiale s'accélère, la demande en puissance de calcul connaît une croissance fulgurante. D'après les données d'International Data Corporation, la part moyenne de l'économie numérique dans le produit intérieur brut (PIB) des 15 principales économies mondiales est passée de 44,1 % en 2017 à 50,2 % en 2022, et devrait atteindre 54,0 % d'ici 2026, dépassant les 40 000 milliards de dollars.^{i,ii} Des régions économiques majeures comme la Chine, les États-Unis et l'Union européenne ont adopté des politiques stratégiques pour accélérer le développement de la puissance de calcul, la numérisation et l'intelligence artificielle (IA). Selon les estimations de la China Academy of Information and Communications Technology (CAICT), la capacité mondiale de calcul des dispositifs informatiques a atteint 1 369 EFLOPS en 2023,^{iv} avec une croissance annuelle de près de 50 % pendant deux années consécutives. Il est également prévu que ce taux de croissance dépasse les 50 % au cours des cinq prochaines années.²

Les centres de données, véritables piliers de la puissance de calcul, évoluent rapidement : de simples fournisseurs de calcul général, ils passent à l'informatique intelligente. Au cours des vingt dernières années, le marché mondial des data centers a affiché une croissance annuelle moyenne supérieure à 20 %, franchissant trois grandes étapes : les centres de données privés et locaux, les data centers cloud et les centres dédiés à l'intelligence artificielle.³ En Chine aussi, le marché des data centers connaît une progression rapide. Fin 2023, plus de 8,1 millions de baies standards étaient déployées à travers le pays, pour une capacité totale de calcul atteignant 230 EFLOPS. Sur les cinq dernières années, le taux de croissance annuel moyen avoisinait 30 %, et la puissance de calcul intelligente a atteint 70 EFLOPS — soit une augmentation de plus de 70 % par rapport à l'année précédente.⁴

La croissance exponentielle de la puissance de calcul a entraîné une forte augmentation de la consommation énergétique des data centers, ce qui se traduit par une hausse des émissions de carbone pour l'ensemble du secteur. En 2022, les centres de données mondiaux ont consommé environ 460 térawattheures (TWh) d'électricité, soit près de 1,7 % de la consommation électrique mondiale, avec des émissions de carbone associées estimées à 220 millions de tonnes (voir l'Exhibit 1).^v Selon la rapidité du déploiement des data centers, les progrès en efficacité énergétique et les tendances technologiques telles que l'IA et la blockchain, on estime qu'entre 2022 et 2026, la consommation électrique des data centers pourrait augmenter de 8 % à 23 % par an.

i La puissance de calcul désigne la capacité des serveurs de centres de données à traiter des données et à produire des résultats. C'est un indicateur global permettant d'évaluer les performances informatiques d'un data center. Elle englobe la puissance de calcul générale, la super-informatique et la puissance de calcul intelligente.

ii Les 15 économies concernées sont les États-Unis, la Chine, le Japon, l'Allemagne, l'Inde, le Royaume-Uni, la France, le Canada, l'Italie, le Brésil, la Corée du Sud, l'Australie, l'Irlande, Singapour et l'Afrique du Sud (classées selon leur PIB de 2022).

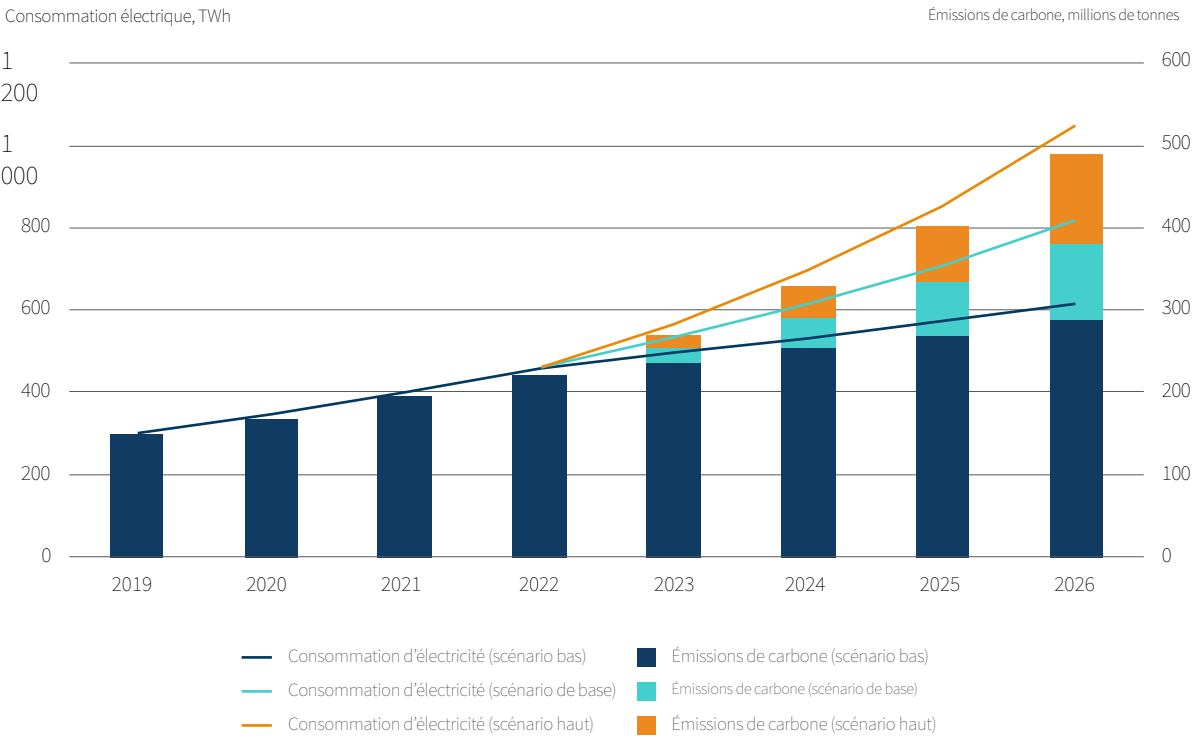
iii Calcul basé sur le cumul annuel des livraisons de serveurs depuis 2017, multiplié par la puissance de calcul moyenne des serveurs de chaque année concernée.

iv L'unité de mesure courante est l'opération en virgule flottante par seconde (FLOPS, 1 EFLOPS = 10^{18} FLOPS). Plus cette valeur est élevée, plus la capacité de calcul globale est importante. On estime qu'1 EFLOPS équivaut à la puissance de calcul d'environ 5 supercalculateurs Tianhe-2A, 500 000 processeurs de serveurs standards ou 2 millions d'ordinateurs portables classiques. Source : [Plan d'action pour le développement de haute qualité des infrastructures de puissance de calcul](#) du ministère chinois de l'Industrie et des Technologies de l'Information.

v Les émissions de carbone pour 2019–2023 sont calculées en multipliant la consommation annuelle d'électricité par le facteur d'émissions moyen du réseau mondial publié chaque année par [EMBER](#). Les facteurs d'émissions pour 2024–2030 sont extrapolés en appliquant une variation annuelle de -0,9 %.

620 à 1 050 TWh d'ici 2026,⁵ soit des émissions de carbone comprises entre 290 et 490 millions de tonnes. En se projetant à 2030, la consommation mondiale d'électricité des data centers devrait encore augmenter pour atteindre 750 à 2 300 TWh, avec des émissions annuelles associées d'environ 340 à 1 040 millions de tonnes, représentant 0,9 % à 2,8 % des émissions mondiales de carbone sur la base du niveau de 2023.⁶

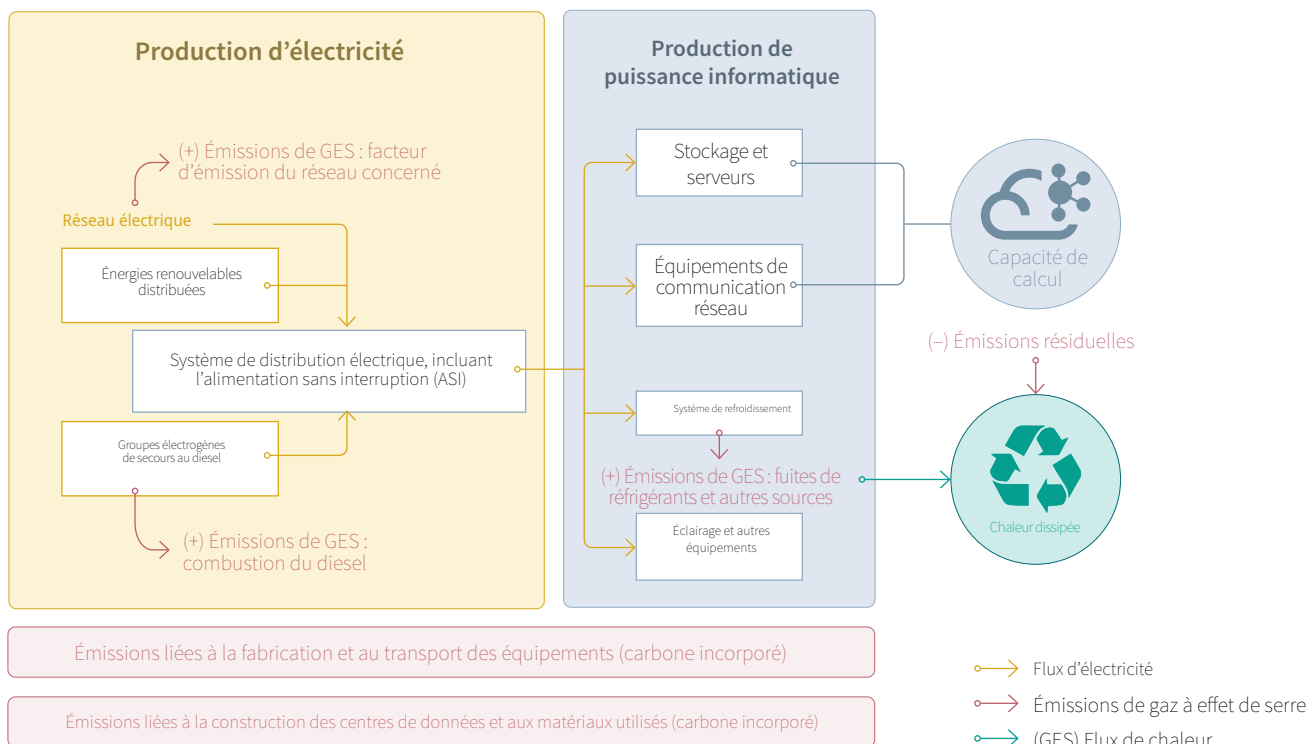
Figure 1 Consommation mondiale d'électricité des data centers et émissions de carbone associées



Infographie RMI. Source : Agence internationale de l'énergie (AIE), EMBER, analyse RMI

Outre les émissions indirectes liées à l'électricité provenant du réseau, les émissions de gaz à effet de serre (GES) générées par les activités des data centers doivent également inclure celles des groupes électrogènes diesel de secours, les fuites de réfrigérants ainsi que d'autres sources (voir Figure 2). De plus, dans une approche cycle de vie, il faut tenir compte des émissions liées à la fabrication du matériel et à la construction des centres de données, ce qui alourdit encore l'empreinte carbone du calcul informatique.

Illustration 2 Flux d'énergie et émissions liés à la puissance informatique



Graphique RMI. Source : analyse RMI

Dissocier la croissance de la puissance informatique des émissions de carbone est un choix essentiel

La transition des centres de données vers des modèles sans émissions s'impose à l'échelle mondiale. Les principaux pays et régions développant des centres de données se sont fixé des ambitions politiques fortes pour accélérer cette évolution. Aux États-Unis, plusieurs politiques, dont l'Initiative fédérale de consolidation des centres de données,⁷ stimulent l'amélioration de l'efficacité énergétique via le renouvellement ou la fermeture de centres obsolètes et peu performants,⁸ l'optimisation de l'utilisation des serveurs et une meilleure disponibilité des installations.⁹ L'UE se distingue en fixant des objectifs précis de réduction carbone pour le secteur des centres de données. Par des cadres d'efficacité énergétique et la promotion de bonnes pratiques, elle vise à diminuer la consommation énergétique et à atteindre la neutralité climatique des centres de données d'ici à 2030.¹⁰

En Chine, des politiques ont été instaurées pour améliorer l'implantation et la planification des centres de données, imposer des normes strictes d'efficacité énergétique pour les nouveaux projets, et favoriser la rénovation énergétique des centres existants. D'ici 2025, la Chine vise à réduire l'indicateur d'efficacité énergétique (PUE) des centres de données grands et très grands, nouvellement construits ou rénovés, à 1,25 ou moins (à comparer à la moyenne nationale d'environ 1,48 en 2023).^{11,vi}

Au-delà des politiques réglementaires, les acteurs majeurs du marché mondial des centres de données se sont également engagés en faveur de la neutralité carbone. Parmi les Global 500, la plupart des entreprises technologiques et des fournisseurs de services de centres de données se fixent des objectifs de neutralité carbone pour 2030 ou avant, anticipant ainsi les objectifs 2050 adoptés par de nombreux autres secteurs. Des géants d'internet tels que Google, Microsoft, Adyen et Zalando ont déjà atteint la neutralité carbone dans leurs opérations et œuvrent désormais pour une alimentation en énergie sans carbone disponible 24h/24 et 7j/7. En Chine, au moins 12 entreprises de centres de données et de services cloud se sont engagées à atteindre la neutralité carbone dans leurs propres activités. Alibaba Cloud et Tencent montrent la voie, en annonçant qu'ils atteindront la neutralité carbone dans leurs opérations et chaînes d'approvisionnement d'ici 2030.

Si le développement de la puissance de calcul parvient à dépasser les limites liées à la consommation d'énergie et aux émissions de carbone, il pourrait devenir le moteur de la transformation numérique et intelligente de tous les secteurs, favorisant une synergie avec la transition bas-carbone. À titre d'exemple dans le secteur de l'énergie, les technologies numériques et l'IA permettent d'améliorer considérablement la précision des prévisions des énergies renouvelables à la production, d'optimiser les stratégies de trading sur les marchés de l'électricité et de renforcer la rentabilité des actifs verts. Côté transport et distribution, l'intégration des outils numériques dans les équipements de réseau, les unités de production et les systèmes de gestion facilite l'anticipation et la prévention des incidents, améliorant la gestion du réseau. Par ailleurs, l'utilisation de drones et de robots pour inspecter les installations augmente significativement l'efficacité opérationnelle et la maintenance du réseau. Enfin, pour les consommateurs, les technologies digitales offrent un suivi détaillé et en temps réel de l'approvisionnement et de la consommation d'énergie, aidant entreprises et parcs industriels à analyser l'efficacité énergétique et à optimiser leurs processus de production.

vi L'indicateur d'efficacité énergétique d'un data center (PUE) correspond au ratio entre l'énergie totale consommée par le centre et celle utilisée par ses équipements informatiques. Plus le PUE se rapproche de 1, plus la part d'énergie dédiée à l'informatique est élevée, et moindre est celle consacrée aux systèmes annexes comme le refroidissement ou la distribution électrique. Selon le Ministère de l'Industrie et des Technologies de l'Information, un data center « extra-large » compte plus de 10 000 baies standards, tandis qu'un centre « grand format » en regroupe entre 3 000 et 10 000. Dans ce contexte, une baie standard est une unité de référence dont la consommation électrique est fixée à 2,5 kilowatts (kW).

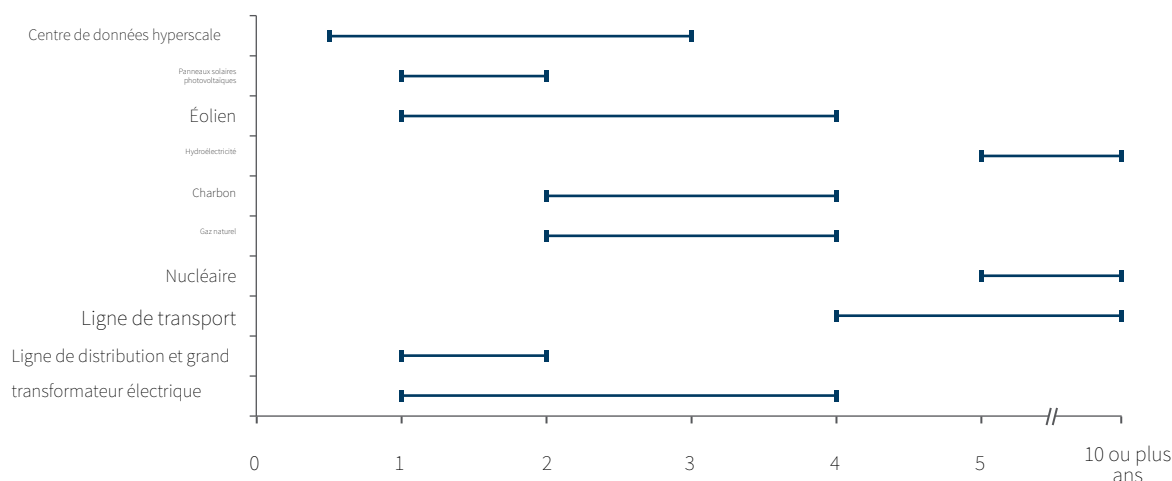
Défis systémiques pour décarboner les data centers

À l'ère de l'IA, la puissance de calcul, portée principalement par les data centers, devient un moteur essentiel de la transformation numérique de tous les secteurs. Pourtant, l'augmentation de ces capacités s'accompagne de problématiques majeures liées à la consommation d'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre. Améliorer l'efficacité énergétique et réduire l'empreinte carbone des data centers est incontournable, mais se heurte à quatre grands défis.

La croissance des data centers dépasse le développement des infrastructures énergétiques

Le développement massif de l'intelligence computationnelle devrait faire grimper la demande d'électricité des data centers au-delà des prévisions actuelles, ce qui complexifie la planification des unités de production et du réseau électrique. Selon le rapport *Global Data Center Trends 2024* publié par Global Commercial Real Estate Services, les pénuries d'électricité persistantes à l'échelle mondiale limitent fortement l'expansion du marché des data centers, poussant les opérateurs d'Amérique du Nord, d'Europe, d'Amérique latine et de la région Asie-Pacifique à faire de l'accès à l'électricité une priorité.¹² Les infrastructures énergétiques nécessitent généralement des cycles de planification longs et des processus de construction complexes ; une montée en flèche de la demande à court terme risque donc de déséquilibrer l'ensemble. Cette situation est d'autant plus critique que la planification et le développement des réseaux de transport et de distribution accusent souvent un retard par rapport à ceux des data centers, ce qui peut allonger la file d'attente pour le raccordement au réseau de certains projets (voir Figure 3).

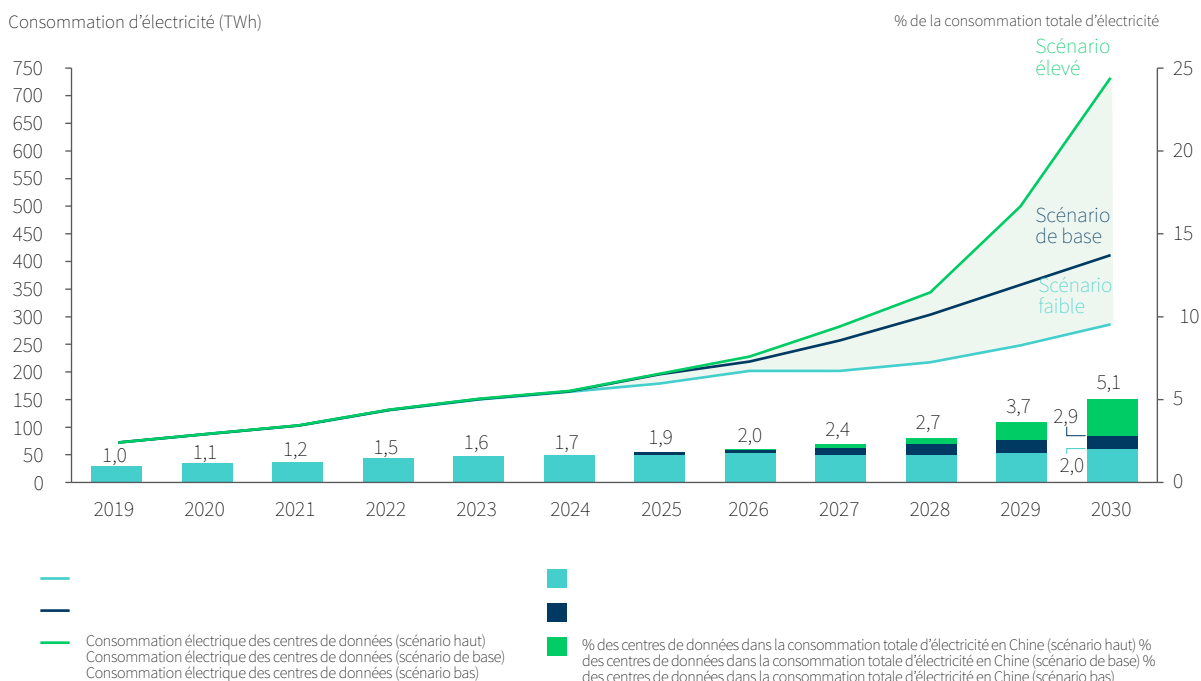
Figure 3 Comparaison des délais de planification et de construction pour les data centers, les unités de production et les réseaux de transport et de distribution



Graphique RMI. Source : IEA, *Délais moyens de construction de nouveaux équipements de réseau électrique en Europe et aux États-Unis 2010-2021*, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/average-lead-times-to-build-new-electricity-grid-assets-in-europe-and-the-united-states-2010-2021>, et *Caractéristiques de coût et de performance des nouvelles technologies de production*, *Annual Energy Outlook 2023*, https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/elec_cost_perf.pdf.

La consommation électrique des data centers en Chine connaît également une forte croissance, et sa part dans la consommation totale d'électricité du pays pourrait passer de 1,6 % en 2023 à environ 5 % d'ici 2030. D'après les estimations du CAICT, la consommation totale d'électricité des data centers chinois atteignait 150 TWh fin 2023, soit une hausse annuelle de 15,4 %, représentant 1,6 % de la consommation électrique nationale, pour environ 84 millions de tonnes d'émissions de carbone.¹³ À l'horizon 2030, selon des scénarios de croissance faible, moyenne ou forte, la consommation électrique des data centers devrait atteindre respectivement 300, 400 et 700 TWh, soit deux à cinq fois le niveau de 2023,^{vii} et la part des data centers dans la consommation totale d'électricité du pays pourrait approcher de 2,0 % à 5,1 % (voir Figure 4).

Figure 4 Prévisions de la consommation électrique des data centers en Chine, 2019–2030



Remarque : Ceci repose sur un taux de croissance annuel moyen de 6,7 % de la consommation électrique totale chinoise sur les sept prochaines années. Graphique RMI. Source : CAICT, Conseil de l'électricité de Chine

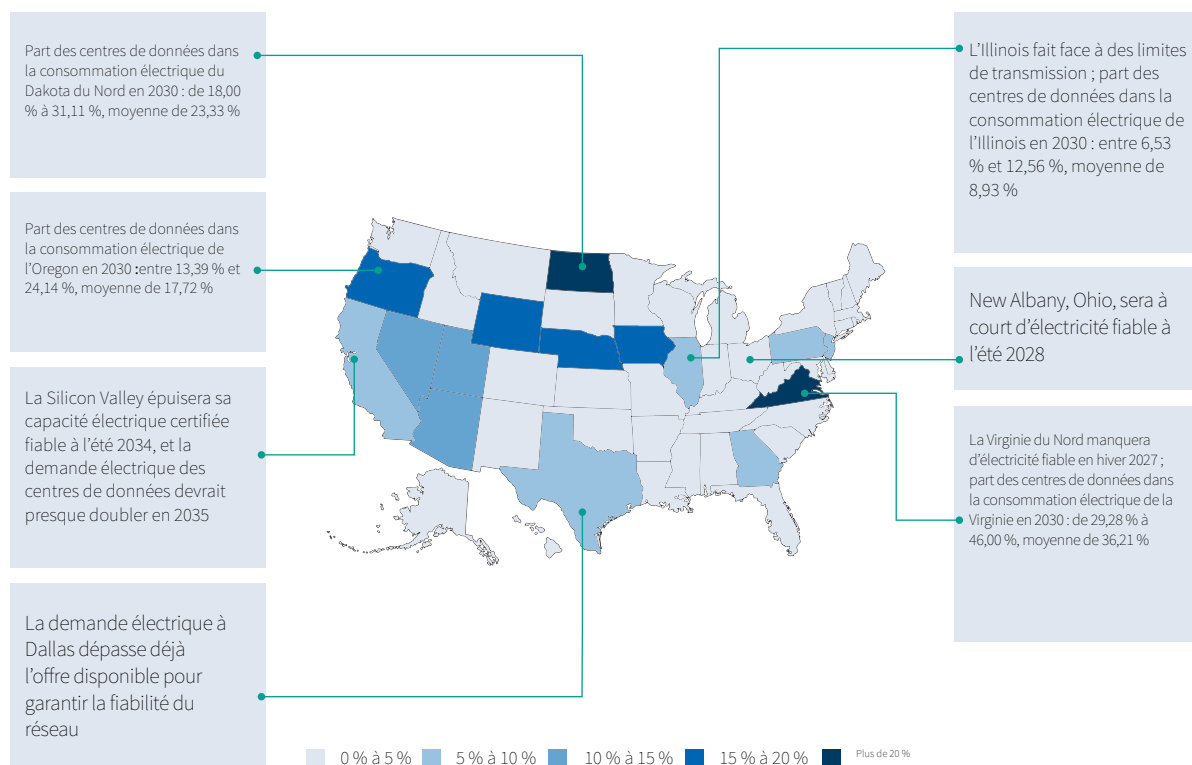
Parallèlement, les data centers deviennent plus grands et se concentrent de plus en plus dans certaines régions, compliquant davantage la stabilité du réseau dans ces zones. Selon Synergy Research Group, le nombre de data centers hyperscale dans le monde est passé à 992 fin 2023, dépassant les 1 000 début 2024, soit le double par rapport à la fin 2018.^{viii} Ce chiffre devrait encore doubler d'ici quatre ans.¹⁴ La tendance à la hausse et à la concentration des data centers peut provoquer des surcharges locales du réseau, des congestions sur les lignes de transmission amont et d'autres problèmes qui affectent la qualité et la stabilité de l'alimentation électrique.

Aux États-Unis, l'Electric Power Research Institute (EPRI) prévoit qu'en 2030, 80 % de la consommation électrique des data centers se concentrera dans 15 États.¹⁵ Selon TD Securities, les réseaux locaux des régions à forte concentration de data centers, comme Dallas (Texas), le nord de la Virginie, New Albany (Ohio) et la Silicon Valley (Californie), pourraient rencontrer des difficultés à maintenir la flexibilité et la fiabilité du système (voir Figure 5).

vii La consommation électrique des data centers n'est pas répertoriée comme catégorie distincte dans les statistiques officielles. Cependant, plusieurs organismes estiment les consommations actuelles et prévisionnelles. Malgré des méthodes et critères variés selon les institutions, tous s'accordent à dire que la consommation des data centers continuera d'augmenter dans les années à venir.

viii Selon l'International Data Corporation, un data center hyperscale compte au moins 5 000 serveurs et nécessite un espace d'au moins 10 000 pieds carrés.

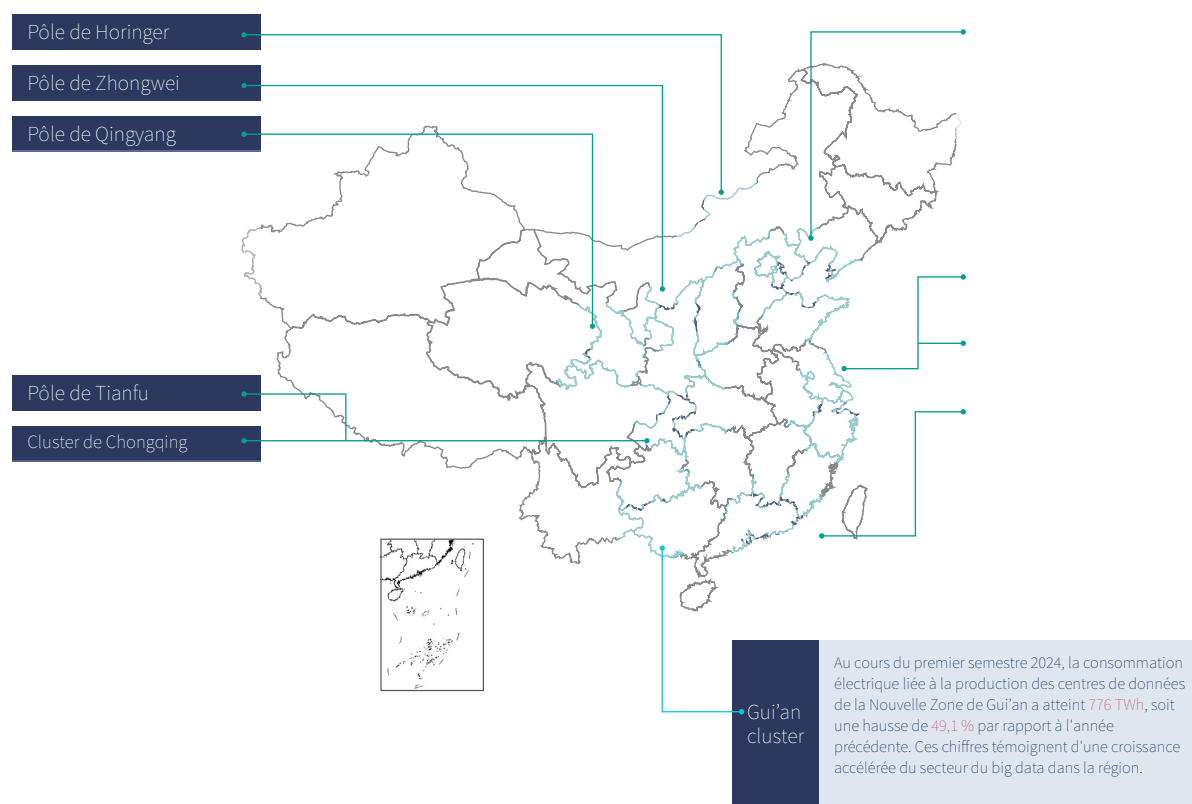
Figure 5 Part des data centers dans la consommation électrique des États américains prévue pour 2030 et exemples de défis locaux pour les réseaux énergétiques



Remarque : Le pourcentage des data centers dans la consommation d'électricité des États pour 2030 correspond à la moyenne des quatre scénarios du rapport Graphique RMI. Source : TD Securities, *Data Centers Part II : Power Constraints — The Path Forward*, <https://www.tdsecurities.com/ca/en/data-centers-2-power-constraints>; Data Center Dynamics, « PG&E : 3,5 GW de capacité de data center dans le pipeline de raccordement en Californie pour les cinq prochaines années », <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/pg-e-35gw-of-data-center-capacity-in-connection-pipeline-over-next-five-years> et EPRI, *Powering Intelligence : Analyzing Artificial Intelligence and Data Center Energy Consumption*, https://www.wpr.org/wp-content/uploads/2024/06/3002028905_PoweringIntelligence_AnalyzingArtificialIntelligenceandDataCenterEnergyConsumption

En Chine, la nouvelle demande en électricité liée aux data centers se concentre de plus en plus dans les grandes villes stratégiques. Le gouvernement central a élaboré une stratégie globale pour l'implantation nationale de la puissance informatique, créant ainsi 8 pôles informatiques nationaux et 10 grappes de data centers dans ces pôles. En principe, aucun nouveau data center de grande ou très grande taille ne sera construit en dehors de ces hubs.¹⁶ D'ici 2025, on estime qu'environ 60 % de la nouvelle puissance informatique sera rassemblée dans ces pôles. La consommation d'électricité dans ces clusters affiche déjà une forte progression (voir Figure 6). À titre d'exemple, la part des data centers dans la consommation électrique totale de Zhangjiakou est passée de 6,8 % en 2019 à 20,1 % en 2023. La consommation annuelle du parc industriel de data centers de Qingyang devrait atteindre 3,2 fois la consommation totale de la ville en 2022.¹⁷ Cette croissance fulgurante exerce une forte pression sur l'extension des réseaux locaux et la construction de nouvelles centrales électriques.

Illustration 6 Huit pôles nationaux informatiques et dix grappes de centres de données dans le projet chinois de transfert de ressources informatiques de l'Est vers l'Ouest

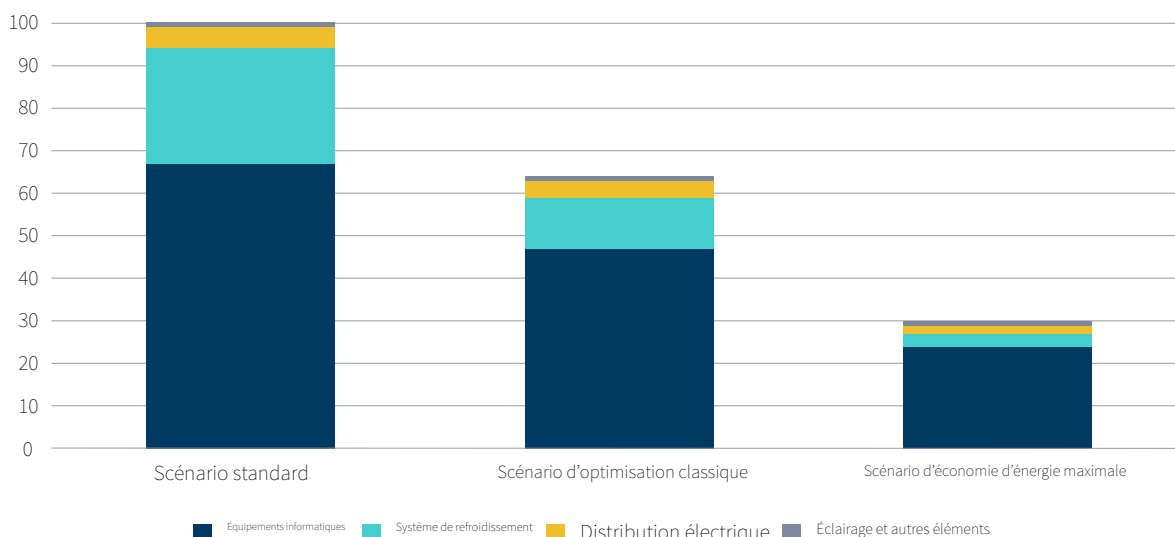


Graphique RMI. Source : Commission nationale du développement et de la réforme (NDRC), *Comprendre le projet « Transfert de ressources informatiques de l'Est vers l'Ouest »*, » https://gbdy.ndrc.gov.cn/gbdyycjd/202202/t20220217_1315798.html; ainsi que diverses sources publiques, dont l'Institut de recherche économique et technique de State Grid Jibei Electric Power Company, le compte officiel WeChat de Shaoguan Toutiao, le compte officiel WeChat de State Grid Qingyang Electric Power Company, le compte officiel WeChat de Smart Chongqing et le comité de gestion de la nouvelle zone de Gui'an sur WeChat

Le potentiel d'efficacité énergétique des centres de données reste largement inexploité

La consommation d'énergie des centres de données — incluant les équipements informatiques, les systèmes de refroidissement et la distribution électrique — offre un fort potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique. Les technologies d'économie d'énergie dans les centres de données se répartissent en deux grandes catégories : l'optimisation des équipements informatiques et celle des systèmes auxiliaires. Ces solutions combinées permettent d'optimiser la performance globale et de limiter la consommation électrique des centres de données. Comme illustré dans l'Exposition 7, dans un scénario d'optimisation standard, la mise en place de mesures d'efficacité sur les équipements informatiques, telles que la virtualisation ou la modernisation du stockage, peut diminuer la consommation d'environ 20 %. À cela s'ajoutent les optimisations des systèmes de refroidissement, comme l'amélioration des flux d'air internes, qui permettent de réduire la consommation de près de 15 %, portant la baisse totale à environ 35 %. Dans un scénario de sobriété extrême, avec adoption des technologies les plus avancées aussi bien sur l'informatique que sur les équipements auxiliaires, la réduction globale d'énergie pourrait atteindre jusqu'à 70 %.¹⁸

Figure 7 Possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les centres de données



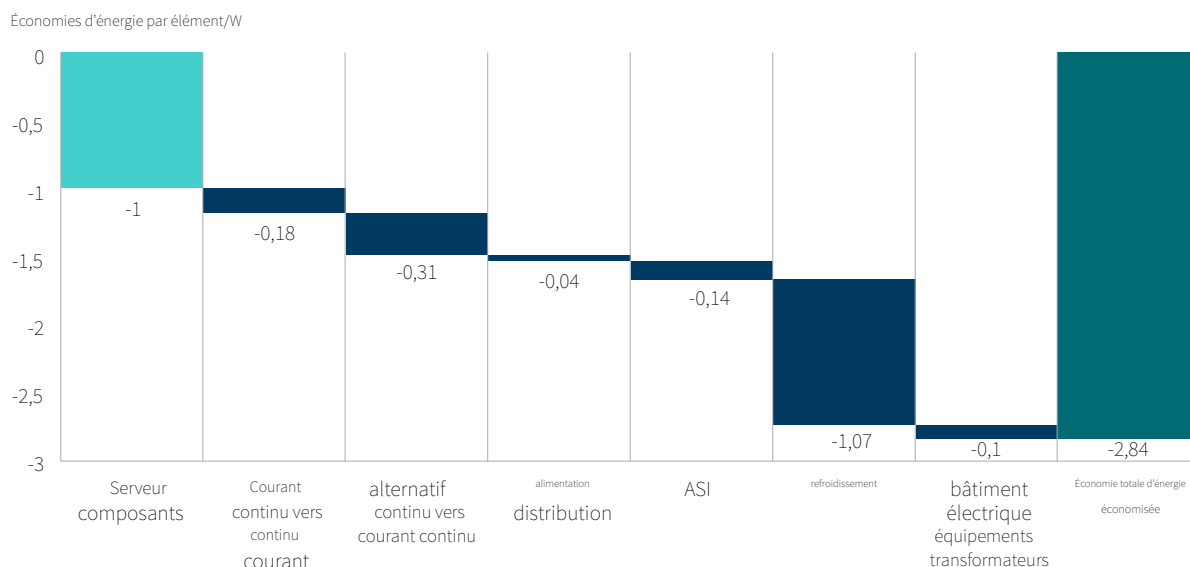
Remarque : Dans le scénario standard, la consommation totale d'énergie des centres de données est fixée à 100.

Graphique RMI. Source : H. Zhu et al., *“Technologies pour la conservation de l'énergie et la réduction des émissions dans les centres de données du futur dans le cadre du développement de villes intelligentes et bas carbone,”*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670722006266>

L'amélioration de l'efficacité énergétique des centres de données existants représente également un enjeu prioritaire. Bien que la PUE moyenne des centres de données en Chine ait atteint 1,48 en 2023, de nombreux centres de petite et moyenne taille, construits plus tôt, affichent souvent des valeurs supérieures, dépassant parfois 1,8 voire 2,0. Les centres de grande et très grande capacité tirent profit des économies d'échelle, ce qui leur permet d'optimiser l'utilisation de ressources telles que l'électricité, le refroidissement et l'espace, mais cela se traduit par une efficacité opérationnelle globale moindre. Malgré leur PUE plus basse, la taille imposante des centres extra-larges fait que leur consommation énergétique totale reste considérable, justifiant la mise en œuvre de mesures d'optimisation plus avancées.

Si les technologies d'économie d'énergie pour les centres de données sont désormais assez avancées, leur adoption massive se heurte principalement à une intégration encore insuffisante des indicateurs et mesures d'efficacité énergétique dans les normes de construction. Aujourd'hui, la PUE reste la référence principale pour évaluer l'efficacité énergétique, mais elle présente des limites. Il ne s'agit que d'un ratio, sans prise en compte des évolutions de la consommation totale. Elle se concentre uniquement sur l'efficacité des systèmes auxiliaires (refroidissement, distribution électrique, éclairage, etc.), négligeant le potentiel de réduction d'énergie au niveau des équipements informatiques eux-mêmes. Par exemple, les serveurs affichent souvent un taux d'utilisation très faible — entre 5 % et 15 % seulement — et même à l'arrêt, ils consomment encore 30 % à 40 % de leur puissance maximale¹⁹, entraînant ainsi un important gaspillage d'énergie. Ce problème n'est pas reflété par la PUE. En réalité, améliorer l'efficacité énergétique des équipements informatiques peut avoir un « effet domino » sur l'ensemble du centre de données, réduisant la consommation liée à la distribution d'énergie et au refroidissement (voir Schéma 8).

Figure 8 Effet de cascade de l'optimisation énergétique des équipements informatiques

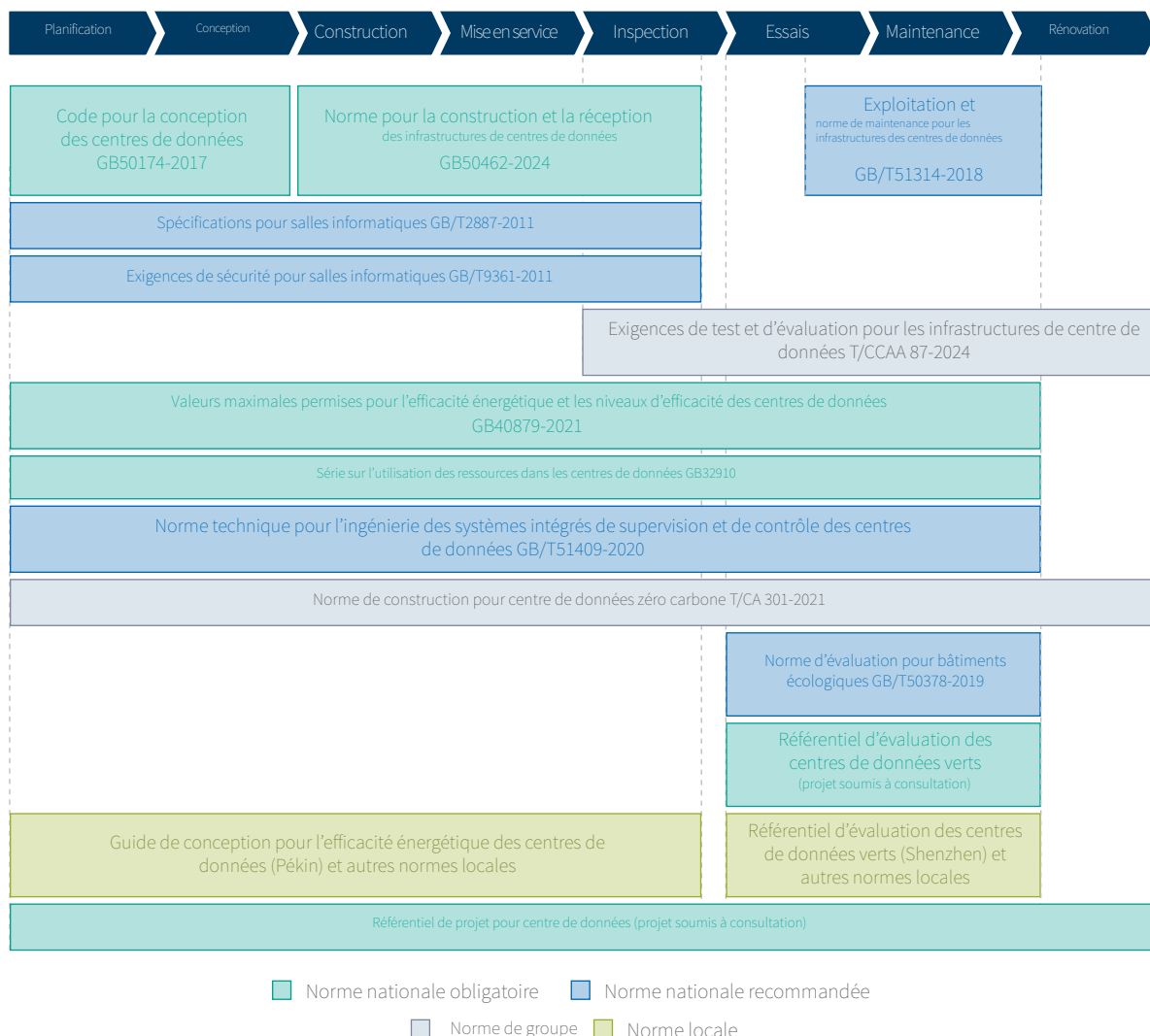


Graphique RMI. Source : Vertiv, *Discussion sur le PUE dans les centres de données — Comprendre le « BUG » du PUE et comment y remédier*, <https://mp.weixin.qq.com/s/okEL4ExDSN99bN6c6e9wQ>

Par ailleurs, il existe des marges de progression dans les standards de construction et de gestion des centres de données concernant l'application des mesures d'efficacité énergétique. Le Code de conception des centres de données s'appuie sur la norme de conception énergétique des bâtiments publics pour l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment. Toutefois, des différences fondamentales subsistent entre les exigences d'efficacité énergétique des centres de données et celles des bâtiments publics. Alors que les bâtiments publics visent avant tout le confort des occupants, les centres de données sont conçus pour accueillir des équipements informatiques, qui consomment beaucoup d'énergie et génèrent une forte chaleur, nécessitant une évacuation thermique continue vers l'extérieur. Ainsi, les exigences d'efficacité énergétique pour l'enveloppe des centres de données doivent tenir compte de leurs particularités thermiques.

Bien que le système normatif chinois pour les centres de données couvre déjà l'ensemble du cycle de vie de ces infrastructures, de la planification à la modernisation en passant par la construction et la mise en service (voir Figure 9), ces normes n'intègrent pas encore pleinement et de façon systématique les exigences liées à la performance énergétique et à la réduction du carbone sur toute la durée de vie des centres. De plus, aucune directive globale n'a été élaborée pour optimiser l'efficacité énergétique des centres de données, quels que soient leur taille ou leur secteur d'activité.

Figure 9 Schéma du système de normes pour les centres de données en Chine



Graphique RMI. Source : analyse RMI

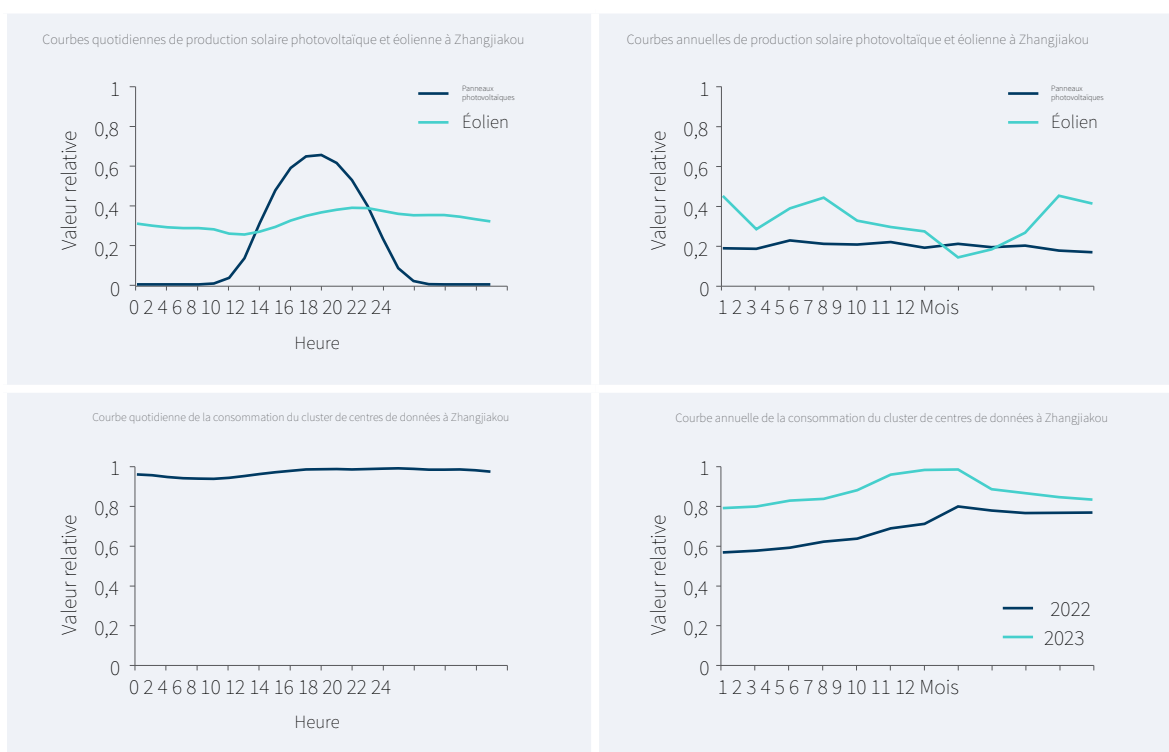
Les écarts temporels et géographiques entre la demande informatique et l'électricité verte compliquent la décarbonation des centres de données

Répondre aux besoins énergétiques des centres de données à l'aide d'électricité à faible ou zéro émission carbone (appelée « énergie verte ») est essentiel pour limiter encore davantage les émissions. Pourtant, d'un point de vue physique, la demande des centres de données ne coïncide pas toujours, dans le temps et l'espace, avec les ressources en énergie verte.

Sur le plan temporel, la variabilité des énergies renouvelables rend difficile la satisfaction du besoin d'alimentation continue 24h/24 des centres de données. Ceux-ci exigent une grande stabilité électrique, avec de faibles variations journalières et des pics plus élevés en été. À l'inverse, les sources renouvelables comme l'éolien ou le solaire connaissent d'importantes fluctuations sur la journée et de fortes incertitudes saisonnières, entraînant un décalage entre la demande d'électricité des centres de données et la production renouvelable.

Le graphique 10 présente le cluster de centres de données de Zhangjiakou en Chine. Dès 2022, la part des capacités installées en énergies renouvelables dans les provinces d’Hebei, Gansu et Ningxia — pôles nationaux du numérique — a dépassé 50 % et continue d’augmenter. À l’avenir, le décalage temporel entre la production d’énergie renouvelable et la demande des centres de données sera de plus en plus marqué, soulignant la nécessité d’une meilleure coordination entre les centres de données et les réseaux électriques lors de la planification et de l’exploitation.

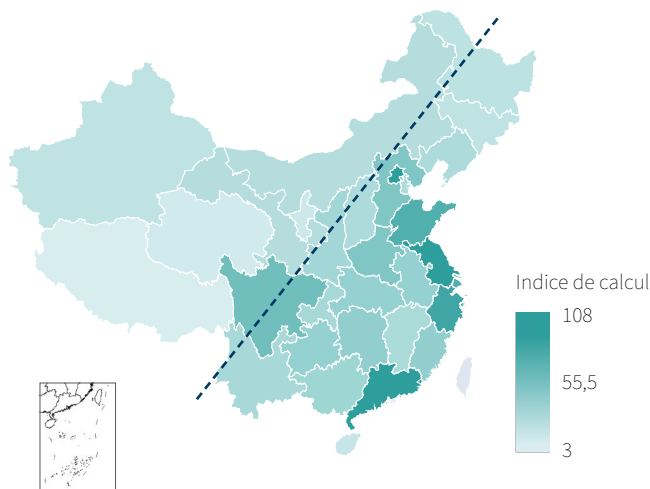
Graphique 10 Déséquilibre quotidien et saisonnier entre la charge des centres de données et la production renouvelable dans le cluster de Zhangjiakou



Graphique RMI. Source : Institut de Recherche Économique et Technique de la State Grid Jibei Electric Power Company, Yue Hao, *Analyse de l'impact de la croissance rapide de la puissance informatique intelligente sur l'offre et la demande d'électricité*, Université North China Electric Power, <https://mp.weixin.qq.com/s/w05pYBIQRzfWRmTx2KyyCA> ; ainsi que Renewables Ninja, <https://www.renewables.ninja/>

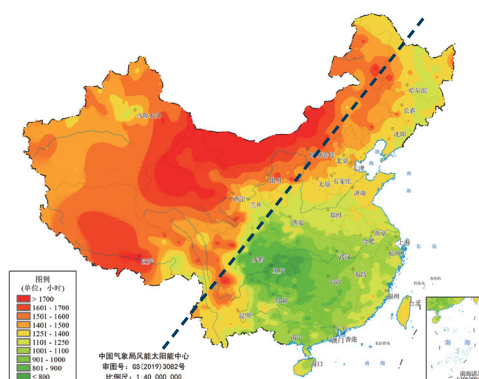
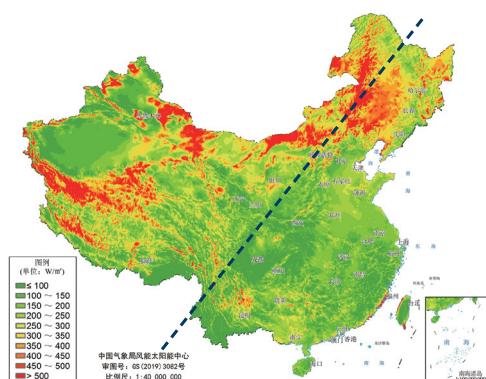
D'un point de vue géographique, il existe un décalage entre l'implantation des centres de données et les ressources énergétiques vertes. En Chine, la planification historique des data centers répond principalement à la demande et se concentre surtout sur les régions côtières de l'Est. Pourtant, les ressources en énergies renouvelables comme l'éolien, le solaire ou l'hydroélectricité sont abondantes dans le centre et l'ouest du pays, accentuant ainsi ce déséquilibre spatial. Pour y remédier, la Chine a lancé le projet de transfert des ressources informatiques de l'Est vers l'Ouest, encourageant la migration des services à forte latence — tels que l'entraînement de modèles IA, l'apprentissage automatique, le rendu vidéo, l'analyse hors ligne ou la sauvegarde — de l'Est vers l'Ouest pour mieux articuler puissance de calcul et énergie verte.²⁰ Cependant, la mise en œuvre reste complexe. Même si les pôles et clusters de centres de données à l'Ouest sont généralement proches de grands sites de production d'énergies renouvelables, ces sites ont souvent déjà des plans de transport longue distance, faute de coordination suffisante lors de la planification initiale. Ainsi, l'approvisionnement local en énergie verte n'est pas systématiquement garanti pour les centres de données.

Figure 11 Indice informatique par province et répartition des ressources éoliennes et solaires photovoltaïques en Chine



Carte nationale de la répartition moyenne annuelle de la densité de puissance éolienne à 100 mètres de hauteur sur terre

Carte de la répartition annuelle de l'irradiation solaire totale pour les installations photovoltaïques fixes à la meilleure inclinaison



Remarque : L'Indice de Développement de la Puissance de Calcul en Chine est un outil d'évaluation permettant de mesurer l'évolution des capacités informatiques du pays. La version 2.0 de cet indice s'appuie sur des indicateurs couvrant cinq dimensions : volume de calcul, industrie, technologie, environnement et applications. Pour en savoir plus, consultez le *Livre Blanc sur l'Indice de Développement de la Puissance de Calcul en Chine* (2023) publié par la CAICT.

Graphique RMI. Source : CAICT, *Livre Blanc sur l'Indice de Développement de la Puissance de Calcul en Chine* (2023), <http://www.caict.ac.cn/english/research/whitepapers/202311/P020231103309012315580.pdf>; ainsi que l'Institut Chinois de Recherche sur les Ressources en Eau et l'Hydroélectricité, Administration Météorologique de Chine, *Bulletin Annuel sur les Ressources Éoliennes et Solaires en Chine 2023*, https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202402/t20240222_6082082.html

Un appui coordonné des politiques et des mécanismes de marché est indispensable pour réduire l’empreinte carbone des centres de données

Premièrement, il existe un manque de réglementation contraignante sur les émissions de carbone et de mécanismes de divulgation spécifiques aux centres de données ainsi qu’aux services et produits associés, comme la puissance de calcul, ce qui freine la motivation à réduire les émissions. À l’échelle mondiale, les exigences de transparence sur la durabilité des centres de données évoluent du volontaire vers l’obligatoire ; cependant, la Chine n’impose pas encore la publication des données sur les émissions de carbone pour les centres de données ou les services informatiques. Cela concerne notamment :

- **Déclarations organisationnelles sur le carbone pour les marchés carbone :** La plupart des marchés carbone nationaux ne prennent en compte que les émissions de Scope 1 des entités, alors que celles des centres de données concernent principalement le Scope 2.

- **Déclarations environnementales, sociales et de gouvernance (ESG) pour les investisseurs et consommateurs :** De plus en plus d’entreprises cotées en Chine commencent à publier des rapports ESG, qui restent pour l’instant facultatifs, et les normes de publication, notamment pour les émissions de carbone, ne sont pas encore harmonisées.

- **Comptabilité carbone au niveau des produits, de plus en plus demandée par les entreprises clientes lors de l’achat de services et produits liés aux données :** Les centres de données offrent des services et non des biens physiques — comme la puissance informatique ou les services numériques — ce qui rend la définition des unités de produit et des limites de comptabilité complexe. À ce jour, les sociétés clientes ne demandent pas explicitement les données d’empreinte carbone pour les services numériques qu’elles acquièrent auprès des centres de données.

Par ailleurs, même avec une éventuelle intégration aux marchés carbone et des exigences de transparence de la part des clients, il manque encore aux centres de données et aux fournisseurs de puissance informatique une méthodologie de comptabilité carbone standardisée. Deux défis majeurs doivent être relevés pour développer cette méthodologie.

- **La méthodologie de comptabilisation du carbone doit englober l’ensemble des activités des centres de données, qu’il s’agisse de centres exploités en interne, en colocation ou sur le cloud public.^{ix}** Une approche globale qui définit clairement les périmètres de comptabilisation et prend en compte la contribution des centres de données à la décarbonation d’autres secteurs est essentielle pour garantir la fiabilité des bilans carbone. Si l’Uptime Institute propose des lignes directrices pour différents types de centres de données (voir l’Exhibit 12), une méthode harmonisée reste à établir, que ce soit en Chine ou à l’international.

- **La base de données nationale sur les émissions de carbone en Chine, qui influence fortement les résultats comptables, est encore en cours d’élaboration.** Les bases de données étrangères ne reflètent pas précisément l’empreinte carbone des activités de production en Chine, et la reconnaissance internationale des certificats verts pour l’électricité renouvelable reste limitée, ce qui rend leur utilisation incertaine dans la compensation des émissions. Ces facteurs risquent d’impacter la précision et la crédibilité de la comptabilisation carbone, un défi auquel sont confrontés les centres de données dans le monde entier.

^{ix} Un centre de données sur site appartient et est exploité par une organisation pour héberger sa propre infrastructure informatique. Les centres de données en colocation permettent à plusieurs organisations d’installer leur équipement informatique dans un même espace partagé.

Figure 12 Répartition des champs de comptabilisation des émissions selon le mode de gestion des data centers

	Périmètre de comptabilisation des émissions	
	Émissions liées à l'informatique	Émissions liées à l'infrastructure du site
Opérateur informatique propriétaire du centre de données		
Opérateur informatique	2	2
Opérateur informatique dans un site de colocation		
Opérateur informatique	2	3
Opérateur de colocation	3	2
Opérateur informatique sur un cloud public		
Opérateur informatique (client cloud)	3	3
Fournisseur de services cloud	2	2
Cloud public hébergé dans un centre de colocation		
Opérateur informatique (client cloud)	3	3
Opérateur de colocation	3	2
Fournisseur de services cloud	2	3

Remarque : Les opérateurs informatiques désignent les entités (entreprises, organismes publics, etc.) ayant besoin de puissance de calcul ou de services numériques. Les fournisseurs de colocation proposent des espaces et des infrastructures de centres de données, permettant à d'autres entreprises d'installer leur matériel tout en assurant l'alimentation, le refroidissement et la sécurité. Les fournisseurs de services cloud livrent des solutions informatiques dématérialisées et gèrent l'infrastructure, la virtualisation et les ressources réseau sous-jacentes. Les émissions liées à l'IT proviennent de la consommation d'énergie des équipements informatiques, tandis que les émissions liées à l'infrastructure proviennent de la consommation d'énergie des systèmes du centre de données, comme le refroidissement, l'éclairage et la ventilation.

Graphique RMI. Source : Uptime Institute, *Accounting for Digital Infrastructure GHG Emissions*, <https://journal.uptimeinstitute.com/accounting-for-digital-infrastructure-ghg-emissions/>

Troisièmement, la décarbonation des centres de données manque de soutien financier adapté. Un investissement important est nécessaire pour les nouvelles installations économes en énergie et pour l'amélioration de l'efficacité des centres existants, surtout les plus anciens où le coût des travaux est particulièrement élevé.²¹ Un appui financier ciblé pourrait réellement accélérer l'adoption de technologies d'efficacité énergétique et de réduction du carbone dans ces infrastructures. Cependant, de nombreuses solutions de décarbonation profonde pour les centres de données restent coûteuses, et diverses technologies de réduction des émissions n'ont pas encore été intégrées aux catalogues de projets soutenus par des obligations vertes.²²

Voies de transformation globale pour dissocier la croissance des data centers de la hausse des émissions

Prendre en compte l'ensemble des critères pour le choix du site et la planification des data centers

Les data centers peuvent viser un développement durable en optimisant l'utilisation des ressources, en maîtrisant les coûts et en limitant leur impact environnemental grâce à une approche planifiée, systématique et stratégique, tout en satisfaisant les besoins des entreprises. Le choix d'implantation d'un data center doit ainsi intégrer l'ensemble des facteurs essentiels^x : besoins en puissance de calcul, approvisionnement énergétique, solutions de refroidissement, valorisation de la chaleur, contraintes foncières et réglementaires, ainsi qu'infrastructures réseau, afin de garantir la faisabilité technique, la rentabilité économique, l'efficacité énergétique et la réduction des émissions de carbone.

- **Besoins en puissance de calcul :** Le choix du site d'un data center dépend directement des usages visés, notamment en fonction des exigences de latence qui imposent une certaine proximité avec les utilisateurs. Pour des applications nécessitant une latence minimale et des performances élevées, comme le trading financier, la conduite autonome ou l'Internet des objets, les data centers en périphérie (« edge ») sont privilégiés pour optimiser les délais et la performance.^x Être proche des utilisateurs finaux permet également de réduire les coûts de bande passante, de limiter la congestion du réseau et de diminuer la consommation d'énergie ainsi que l'empreinte carbone liée au transfert de données. Pour les usages où la latence n'est pas critique, comme l'analyse de données hors temps réel ou l'hébergement, il peut être pertinent d'implanter les data centers dans des zones plus éloignées.
- **Ressources en énergies vertes :** Le choix de l'implantation d'un centre de données doit intégrer la disponibilité d'énergies renouvelables afin de limiter l'empreinte carbone et les coûts énergétiques. Au-delà de l'approvisionnement en énergie verte, il est essentiel de prévoir des voies d'alimentation électrique multiples et de combiner différentes sources d'énergie propre afin d'assurer une alimentation fiable et stable. Parmi les stratégies à privilégier : (1) installer les centres de données dans des régions bénéficiant d'un fort potentiel éolien, solaire, hydraulique ou nucléaire, afin de se raccorder au réseau ou directement aux sources d'énergie verte^x; (2) dans les zones où ces ressources sont rares, l'achat d'énergie verte via des échanges permet de dépasser les contraintes géographiques.
- **Ressources de refroidissement naturel :** Exploiter les ressources naturelles pour le refroidissement est une méthode efficace pour réduire la consommation d'énergie des centres de données. Comme illustré dans le graphique 13, plusieurs options existent^x : (1) choisir des régions froides ou tempérées où l'air extérieur frais peut servir à refroidir directement ou indirectement les installations^x; (2) privilégier les zones arides afin d'opter pour le refroidissement par évaporation^x; (3) s'implanter à proximité de ressources aquatiques naturelles, telles que rivières ou lacs, pour recourir à des systèmes de refroidissement par eau. Lors de la conception de nouveaux centres, il est aussi crucial d'anticiper l'évolution du climat et d'éventuels risques géologiques. L'installation de systèmes de contrôle intelligents, de matériaux à changement de phase pour le stockage de l'énergie, ou le stockage thermique saisonnier, contribue à maintenir l'efficacité et la sûreté des solutions de refroidissement.

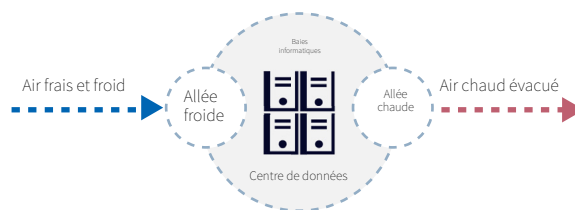
^x Un edge data center est un centre de données situé au plus près des utilisateurs finaux ou des dispositifs qui collectent et transmettent les données, ou partout où ces données sont générées.

Figure 13 Schéma de l'utilisation des ressources de refroidissement naturel dans les centres de données

Refroidissement direct par air naturel

En se basant sur la différence de température entre l'air extérieur froid et l'air intérieur, l'air extérieur est introduit, partiellement ou totalement, pour remplacer la climatisation dans le centre de données

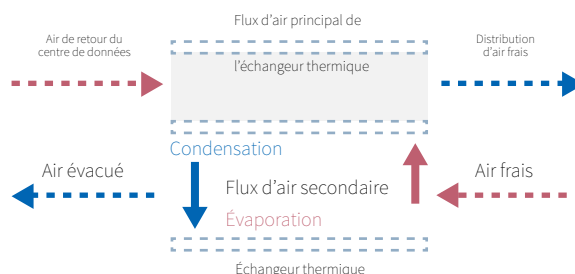
- Exigences élevées en qualité de l'air
- Faible consommation énergétique et taux d'économie élevé



Refroidissement évaporatif indirect

L'air refroidi par évaporation directe sert à rafraîchir l'air de retour via un échangeur thermique

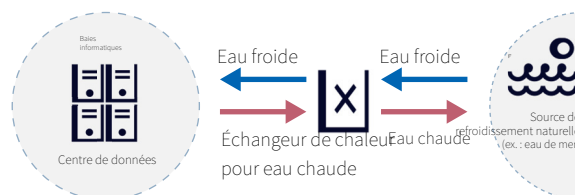
- Structure simple et fiabilité élevée
- Exploite pleinement les ressources de refroidissement naturelles pour fournir du froid à la demande



Refroidissement naturel par l'eau

Utilisation de sources d'eau naturelle extérieure, à basse température (comme la mer, les lacs, les rivières, etc.), pour le refroidissement du centre de données

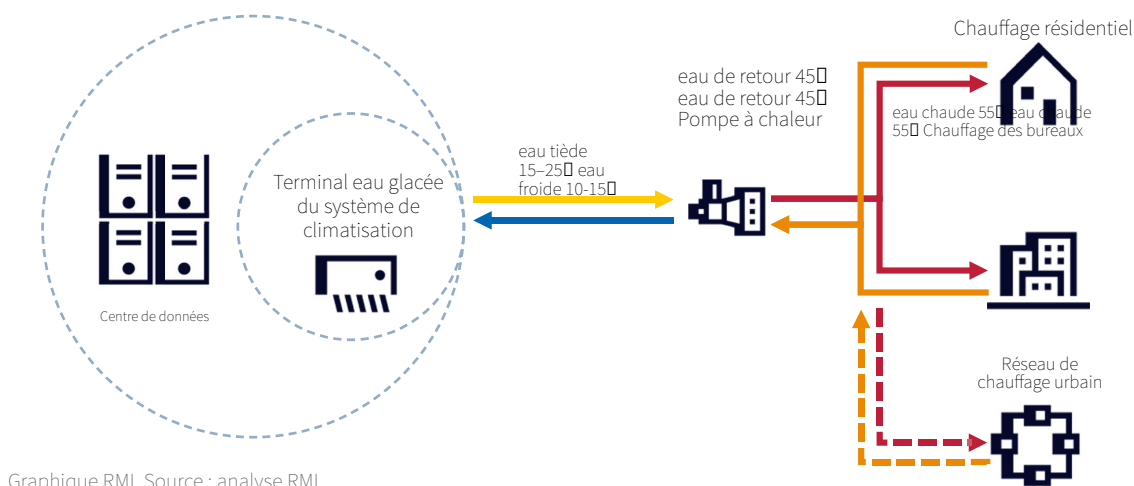
- Exigences techniques élevées : circulation thermique, courants sous-marins, variations de température, impuretés de l'eau et turbidité
- Technologies de matériaux spécifiques : prévention de la corrosion par l'eau de mer



Graphique RMI. Source : analyse RMI

• **Récupération de chaleur :** La récupération de chaleur dans les centres de données est une stratégie efficace pour optimiser l'utilisation énergétique (voir Figure 14). Grâce à la réfrigération par absorption, aux pompes à chaleur, au stockage thermique et à l'intégration aux réseaux de chauffage urbain, la chaleur résiduelle des centres de données peut être transformée en énergie thermique ou en électricité, permettant ainsi sa réutilisation. Cette chaleur est principalement valorisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire de deux façons : (1) dans les parcs industriels ou de bureaux, l'aménagement du site peut intégrer les besoins en chauffage de différents bâtiments, notamment des bureaux et des logements pour les employés ; (2) pour les centres de données indépendants, la chaleur récupérée peut être acheminée vers des bâtiments via les réseaux de chaleur urbains, soit par échange direct, soit par pompe à chaleur. Enfin, si les centres présents dans un même parc disposent d'un surplus de chaleur une fois les besoins internes couverts, ce surplus peut également être transféré vers les réseaux urbains, élargissant encore davantage le champ d'application de la récupération de chaleur.

Figure 14 Schéma de valorisation de la chaleur d'un data center



Graphique RMI. Source : analyse RMI

- **Prix du foncier et facteurs de politique :** Le coût du terrain, les politiques locales d'incitation, les défis liés au recrutement, les procédures d'approbation gouvernementale et les politiques macroéconomiques générales sont des éléments clés dans la planification des centres de données. Les prix du foncier varient selon les régions et certains gouvernements locaux peuvent proposer des tarifs attractifs pour encourager l'investissement. De plus, différentes régions peuvent offrir des avantages comme des exonérations fiscales ou des subventions financières. Le bon fonctionnement d'un centre de données repose sur la disponibilité de personnel technique qualifié, ainsi la facilité de recrutement et la présence de talents locaux sont également essentielles ; les territoires dotés d'établissements d'enseignement supérieur et de ressources en recherche présentent souvent des atouts. La construction d'un centre de données nécessite une autorisation gouvernementale, et certaines régions appliquent des limitations strictes sur la consommation énergétique et les émissions de carbone.

- **Infrastructures réseau :** La planification des ressources en bande passante est essentielle pour les nouveaux centres de données. Face à l'augmentation des besoins en bande passante, le choix du site doit tenir compte de la proximité avec des réseaux à fibre optique haut débit et de la capacité d'évolution de l'infrastructure réseau pour répondre aux besoins actuels de transmission de données et anticiper le développement futur. Des équipements réseau performants et des technologies de pointe sont également nécessaires pour optimiser les performances. Pour les services nécessitant un traitement des données en temps réel, il est idéal que les centres de données soient situés près des principaux nœuds de fournisseurs de réseau ou des points d'échange internet. Pour les centres de données dédiés à l'IA, une attention particulière doit être portée à la capacité et à la flexibilité du réseau en fibre optique. Enfin, la sécurité de la transmission des données doit être intégrée à la planification afin de limiter les risques d'interruption d'activité.

Pour choisir l'emplacement optimal d'un centre de données, il convient de s'appuyer sur quatre principes fondamentaux (voir Illustration 15) :

Axé sur la demande : le site doit être proche des zones à forte demande de calcul pour réduire la latence et garantir une qualité de service optimale. Il est nécessaire d'analyser en profondeur les besoins en rapidité du réseau, le niveau de développement du secteur numérique et la digitalisation régionale.

Axé sur les coûts : la sélection du site doit prendre en compte de manière globale le prix de l'électricité, le coût du foncier et les dépenses liées à la main-d'œuvre afin de limiter les frais d'exploitation.

Axé sur l'écologie : privilégier les régions bénéficiant de ressources renouvelables abondantes et d'un climat favorable afin d'encourager l'usage d'énergies durables et de réduire l'impact environnemental.

Axé sur la sécurité : l'emplacement du centre doit garantir la protection physique et numérique, en tenant compte de la stabilité géologique et d'un faible risque de catastrophe pour préserver l'intégrité des données et des services.

Au-delà de ces principes, le choix de l'emplacement des centres de données doit aussi prendre en compte la politique, les transports et d'autres paramètres. Une planification scientifique permet d'atteindre un équilibre entre performance économique et respect de l'environnement.

Figure 15 Principes pour un choix et une implantation optimaux des centres de données

	Axé sur la demande	Axé sur les coûts	Axé sur l'écologie	Axé sur la sécurité
Besoins en puissance de calcul	• Selon les exigences de latence propres à chaque activité, évaluez la distance physique entre le centre de données et ses utilisateurs.	• Proche des utilisateurs finaux pour réduire les coûts de bande passante. • Limiter la distance de transmission des données permet également de diminuer la consommation énergétique du centre de données.		
Sources d'électricité verte		• Exploitez pleinement les ressources d'énergie verte dans les zones où l'offre est abondante afin de limiter les coûts énergétiques.	• Installez-vous à proximité des sources d'électricité verte pour favoriser la consommation d'énergie renouvelable. • Facilitez les échanges d'électricité verte entre provinces et régions pour garantir l'accès.	• Optez pour des alimentations électriques doubles ou multiples, ainsi que des sources d'énergie verte complémentaires, pour assurer la sécurité et la stabilité du centre de données.
Sources de refroidissement naturel		• Valorisez au maximum les ressources de refroidissement naturel en remplacement des systèmes électriques. • Stockez l'énergie de refroidissement la nuit ou à basse température pour une utilisation diurne.	• Utilisez pleinement les sources de refroidissement naturel pour remplacer les systèmes électriques.	• Réduisez la dépendance aux systèmes de refroidissement électriques. • Garantisiez un environnement stable, avec une température et une humidité maîtrisées.
Récupération de chaleur Prix du foncier et		• Valoriser la chaleur résiduelle en énergie économiquement utile. • Certaines régions proposent des allègements fiscaux ou des subventions pour la récupération de chaleur. • Garantir des coûts du terrain et de la main-d'œuvre raisonnables afin de maîtriser les dépenses d'exploitation.	• Optimiser l'efficacité énergétique globale pour limiter la consommation d'énergie et les émissions de carbone.	
facteurs politiques		• Bénéficier des incitations locales, telles que les déductions fiscales ou subventions accordées par les autorités.		
Infrastructures réseau	• S'appuyer sur les ressources réseau locales afin de répondre aux besoins en performance, faible latence et interactions en temps réel à haute fréquence.	• Offrir une évolutivité flexible pour augmenter rapidement la bande passante et ajouter des nœuds, minimisant ainsi les risques liés aux investissements à long terme.		• Utiliser des équipements réseau redondants et concevoir des chemins alternatifs pour réduire les risques. • S'appuyer sur des technologies avancées pour accroître la bande passante et garantir la transmission en temps réel.

Graphique RMI. Source : analyse RMI

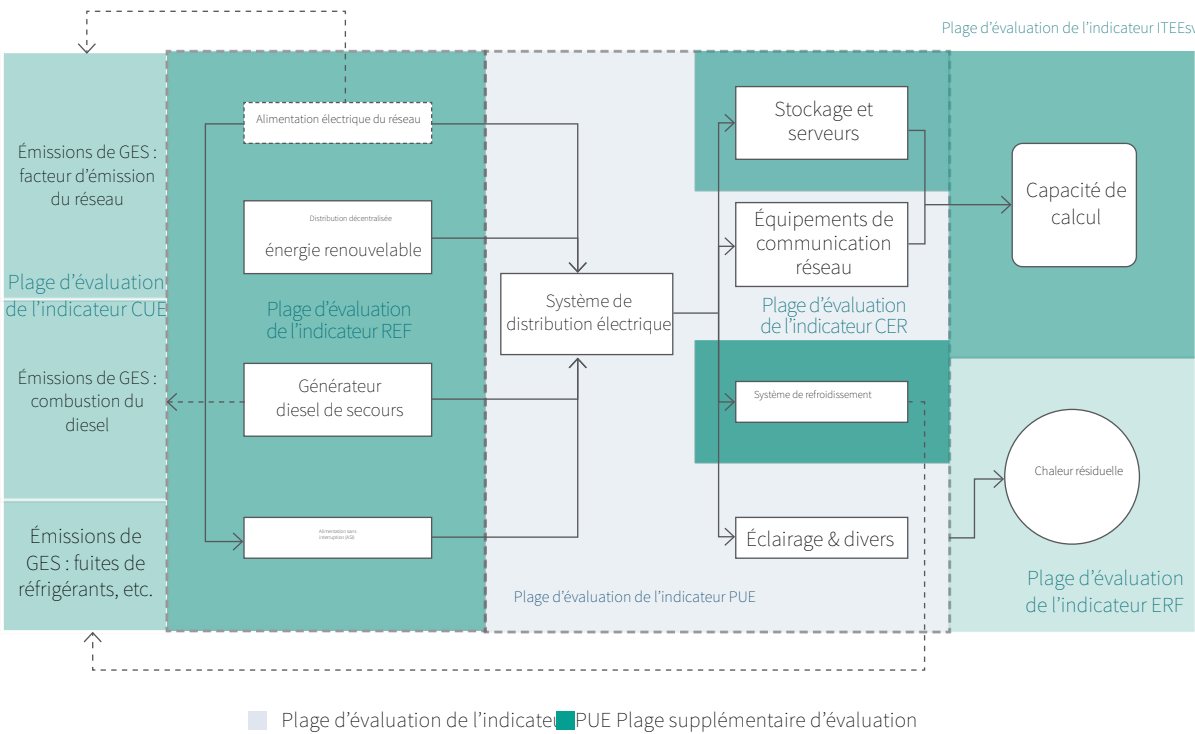
Optimiser l'efficacité énergétique des centres de données, nouveaux et existants

Affiner les indicateurs et normes d'évaluation énergétique et carbone pour orienter la construction des nouveaux data centers

Étant donné que le PUE ne reflète pas entièrement la performance globale des centres de données en matière d'efficacité énergétique et d'émissions de carbone, il est nécessaire de mettre en place un cadre d'évaluation énergétique et carbone complet et multidimensionnel. L'Exemple 16 présente des indicateurs complémentaires recommandés pour évaluer la performance énergétique et carbone des centres de données. Ces indicateurs couvrent pratiquement tous les aspects de la consommation d'énergie des centres de données, constituant ainsi un cadre d'évaluation exhaustif. De plus, les normes énergétiques et carbone des centres de données doivent intégrer les spécificités régionales — climat, composition énergétique, disponibilité en eau — afin de fixer des seuils pertinents et adaptés. Cette méthode garantit un système d'évaluation scientifique, opérationnel et pertinent.

Exemple 16 Cadre d'évaluation énergétique et carbone global pour les centres de données

	Type d'énergie	Efficacité du refroidissement	Valorisation de la chaleur perdue	Émissions de carbone	Efficacité des équipements IT
Indicateur principal d'évaluation	Facteur d'énergie renouvelable (REF)	Indice d'efficacité de refroidissement (CER)	Facteur de réutilisation de l'énergie (ERF)	Efficacité d'utilisation du carbone (CUE)	Efficacité énergétique des serveurs informatiques (ITEESv)
Formule de calcul	REF = quantité d'énergie renouvelable utilisée par le centre de données ÷ consommation énergétique totale du centre	CER = rendement de refroidissement du système du centre de données ÷ consommation énergétique totale du système de refroidissement	ERF = quantité d'énergie réutilisée par le centre de données ÷ consommation énergétique totale du centre	CUE = quantité d'émissions de CO ₂ liées à l'énergie utilisée par le centre de données ÷ consommation énergétique des équipements informatiques (kWh)	ITEESv = nombre de tâches traitées par les serveurs informatiques ÷ consommation énergétique des serveurs



Graphique RMI. Source : analyse RMI

Intégrer des technologies d'économie d'énergie et des mesures de gestion bas carbone plus complètes dans les normes de construction des data centers permet d'optimiser la consommation énergétique et de réduire les émissions de carbone dès la conception.

- **Efficacité énergétique pour les infrastructures non informatiques : adopter des principes de construction écologique afin de réduire la consommation énergétique des centres de données et installer des équipements performants.** Cela implique d'optimiser l'isolation thermique du bâtiment, de privilégier le refroidissement passif, d'utiliser des systèmes de distribution d'énergie et de refroidissement efficaces, ainsi que de mettre en place des solutions intelligentes de gestion pour le suivi et l'optimisation énergétique en temps réel.

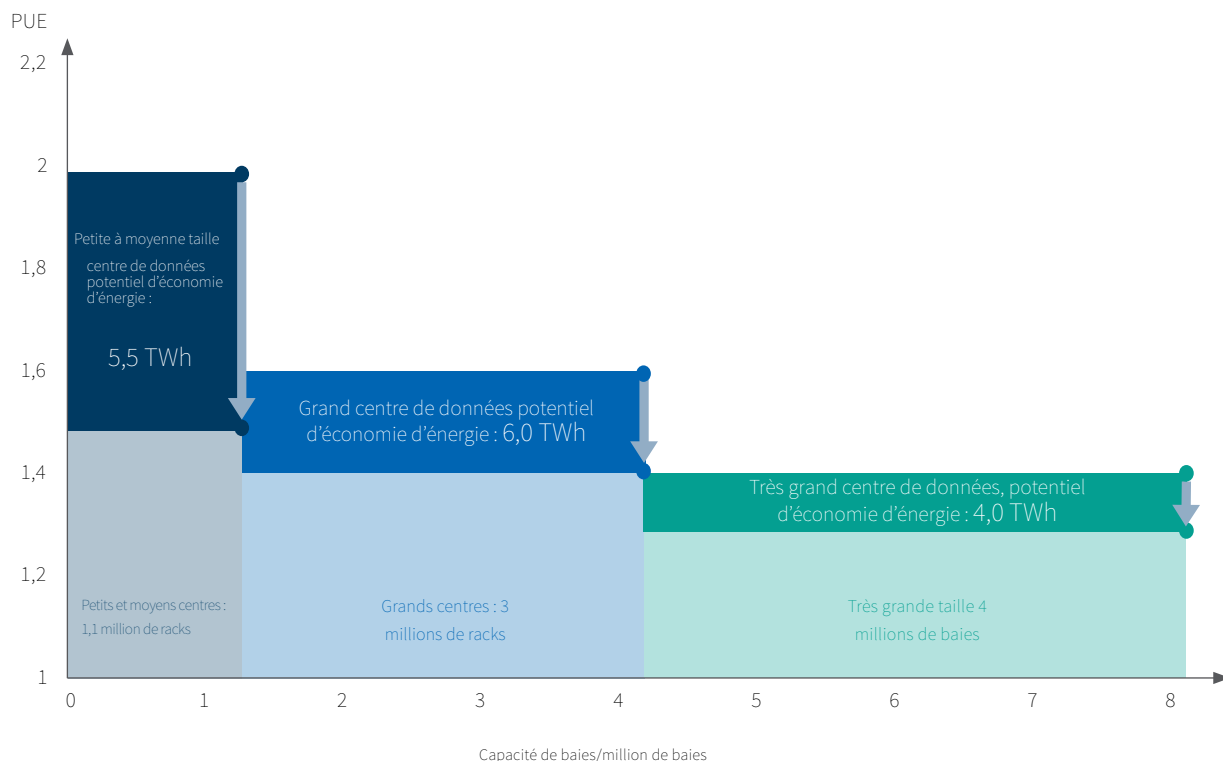
- **Efficacité énergétique des équipements IT et des logiciels : améliorer la performance informatique en optimisant les algorithmes, en augmentant l'utilisation des serveurs grâce à l'équilibrage des charges et en choisissant des serveurs, des dispositifs de stockage et des équipements réseaux à haute efficacité pour renforcer significativement l'efficacité énergétique du système IT du centre de données.**

- **Usage des énergies renouvelables : diversifier les sources d'électricité renouvelable et coordonner l'informatique avec l'approvisionnement énergétique contribue à atteindre l'objectif de neutralité carbone.** Il convient également de privilégier des équipements IT à faible émission de carbone, d'utiliser des matériaux durables dans la construction, de préserver la qualité environnementale intérieure et de limiter l'impact écologique global du bâtiment grâce à des analyses du cycle de vie.

Réaliser des rénovations énergétiques globales pour les centres de données à faible efficacité

Pour accroître l'efficacité énergétique des centres de données existants, il est indispensable d'élaborer des plans de rénovation sur mesure, adaptés aux spécificités et besoins de chaque centre. Pour les infrastructures les plus vétustes et peu performantes, la fermeture ou la mutualisation peut être envisagée. Pour les centres de grande ou très grande taille, les rénovations doivent se faire par étapes et par lots, en privilégiant l'optimisation de la gestion opérationnelle, des modernisations partielles ainsi que des mises à niveau complètes du système. Selon les estimations de RMI, la mise en œuvre d'un programme de rénovation énergétique, classé par type de centre et ciblant spécifiquement l'efficacité des équipements non informatiques, permettrait en Chine, d'atteindre des économies d'énergie d'environ 25 % pour les petits et moyens centres, 13 % pour les grands centres et 7 % pour les très grands centres. L'économie d'énergie totale annuelle pourrait ainsi s'élever à 15,5 TWh (voir l'illustration 17).

Illustration 17 Potentiel des rénovations énergétiques classifiées dans les centres de données chinois



Graphique RMI. Source : analyse RMI

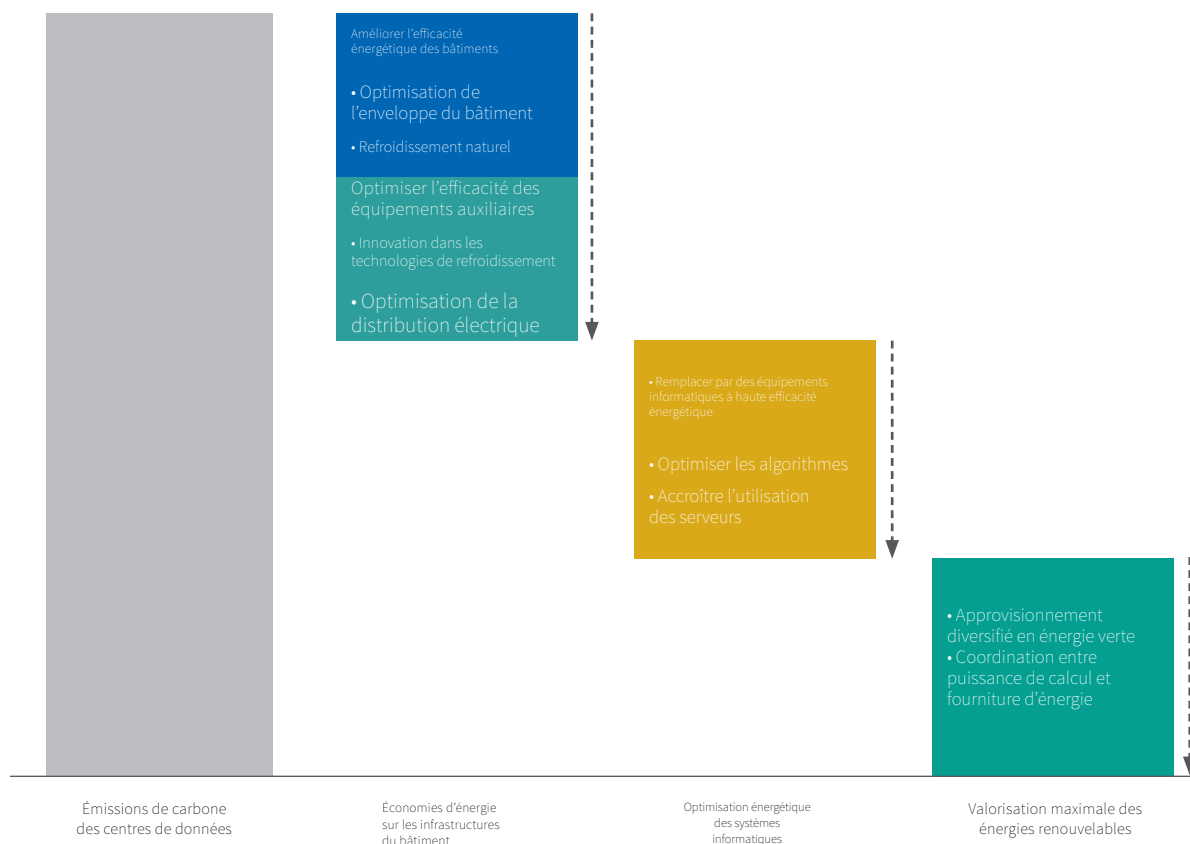
Une rénovation complète visant à économiser l'énergie et réduire le carbone dans les centres de données s'articule autour de trois axes principaux :

Optimisation de l'efficacité énergétique des infrastructures hors IT : Cela inclut l'amélioration de la performance du bâtiment, comme le renforcement de l'enveloppe et le recours au refroidissement passif. Cela passe aussi par une meilleure efficacité des systèmes auxiliaires, notamment le refroidissement et la distribution de l'énergie.

Amélioration de l'efficacité énergétique des équipements et logiciels IT : Cela consiste à remplacer les anciens équipements informatiques par des modèles plus sobres et à renforcer la performance globale grâce à l'optimisation des algorithmes et une meilleure utilisation des serveurs.

Augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables : Cette stratégie repose sur la diversification des sources d'électricité verte et une meilleure synchronisation entre les besoins informatiques et la consommation électrique. En diminuant la dépendance aux énergies fossiles et en maximisant l'emploi du renouvelable, les centres de données peuvent viser une activité à faible, voire zéro carbone (voir Illustration 18).

Figure 18 Voies d'optimisation énergétique et de réduction carbone pour la rénovation des data centers



Graphique RMI. Source : analyse RMI

Les travaux d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les data centers doivent relever des défis tels que la sécurité des données, le risque d'interruption d'activité et la coordination interdisciplinaire afin d'assurer la réussite des projets tout en limitant l'impact sur l'exploitation. Pour limiter les risques de fuite de données et d'interruption de service, les rénovations doivent perturber au minimum la production, ce qui fait des data centers modulaires une solution clé. De plus, exploiter les ressources redondantes existantes et procéder par étapes permet de réduire davantage ces risques. Pour optimiser la coordination entre disciplines, il est essentiel de mettre en place un dispositif de communication et de collaboration entre les spécialités. Par ailleurs, renforcer la compréhension des bénéfices économiques des rénovations énergétiques chez les propriétaires de data centers est fondamental pour encourager l'adoption de technologies performantes et rentables. L'utilisation d'outils d'analyse financière, tels que le retour sur investissement ou le coût total de possession, permet d'offrir une vision plus claire et accessible de l'intérêt économique de ces améliorations.

Garantir une utilisation évolutive, interactive avec le réseau et sans carbone de l'énergie dans les centres de données

Explorer diverses options d'approvisionnement en énergie verte, des connexions physiques aux solutions basées sur le marché

Au stade de l'exploitation, maximiser l'approvisionnement en énergie verte est essentiel pour réduire l'empreinte carbone des centres de données. Le graphique 19 présente quatre solutions principales permettant aux entreprises d'accéder à l'électricité verte. Les deux premières reposent sur des installations renouvelables décentralisées sur site, comme le solaire photovoltaïque ou l'éolien, destinées à l'autoconsommation ou à une connexion directe à des sources vertes hors site via des lignes électriques dédiées, assurant ainsi un lien physique entre la production et le centre de données. Les deux autres reposent sur des mécanismes de marché, tels que l'achat d'électricité verte ou de certificats verts, qui suppriment les contraintes géographiques. Ces deux options permettent d'acquérir et certifier l'énergie verte ou ses attributs environnementaux à travers des contrats entre acheteurs et vendeurs, ou par l'intermédiaire d'organismes tiers.

Graphique 19 Comparatif des quatre principales solutions d'approvisionnement en énergie verte pour les centres de données

	Option	Envergure	Préparation	Économie	Maturité
Basé sur la localisation	Énergies renouvelables décentralisées sur site	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★
	Raccordement direct à une énergie verte	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★
Basé sur le marché	Echange d'énergie verte	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★
	Certificat d'électricité verte	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★

Remarque : L'évaluation repose sur la situation globale du marché mondial, et des différences peuvent exister selon les pays ou régions. De 1 à 4 étoiles, plus il y a d'étoiles, plus cela indique : une plus grande capacité à répondre aux besoins des entreprises, une préparation plus rapide (donc plus pratique), une meilleure efficacité économique (moins de coûts supplémentaires ou des avantages potentiels), et une plus grande maturité du mécanisme (risque réduit pour l'entreprise).
Graphique RMI. Source : analyse RMI

Les exploitants de data centers devraient privilégier une combinaison d'options d'approvisionnement adaptée à la consommation d'électricité, à la phase du projet, à la tolérance au risque, aux avantages économiques et aux exigences de transparence environnementale, afin d'augmenter sans cesse la part d'énergie verte dans leur mix énergétique.

- **Énergies renouvelables distribuées sur site :** Grâce à leur rentabilité et à la facilité d'installation, les énergies renouvelables déployées localement sont souvent privilégiées par les entreprises. Néanmoins, leur capacité reste limitée par la disponibilité des toitures et du foncier. Généralement, une partie du toit des centres de données est occupée par les systèmes de refroidissement, ce qui réduit l'espace disponible pour les panneaux solaires. On estime ainsi que l'énergie solaire en toiture peut couvrir moins de 1 % des besoins annuels en électricité d'un centre de données.^{xi}
- **Raccordement physique direct à l'électricité verte :** Cette solution permet de s'approvisionner en grande quantité d'énergie verte tout en réduisant souvent les coûts de transport et de distribution, ce qui la rend économiquement avantageuse. À ce jour, de nombreux exemples reposent sur l'hydroélectricité ou l'énergie nucléaire, qui présentent toutefois d'importantes contraintes géographiques et limitent donc leur déploiement à grande échelle. Les ressources éoliennes et solaires, plus abondantes, restent néanmoins variables et intermittentes, ce qui peut poser problème pour l'alimentation continue et stable des centres de données. Dans ce cas, il est souvent nécessaire de prévoir une alimentation de secours via le réseau ou des sources pilotables. Si le réseau électrique fait office de secours, les centres de données devront éventuellement négocier des frais de réserve raisonnables ou explorer de nouveaux modèles économiques partagés, pour passer du statut de simple consommateur à celui de ressource flexible pour le réseau (voir section suivante).^{xii} Toutefois, ces dispositifs impliquent généralement une planification plus complexe et des délais de mise en place plus longs.
- **Marché de l'électricité verte et certificats verts :** Ces deux options sont actuellement les plus répandues parmi les principaux acteurs mondiaux du secteur pour garantir un approvisionnement en énergie verte. Leur mise en œuvre nécessite l'existence d'un mécanisme de marché dans le pays ou la région concernée. Cela suppose une collaboration entre le réseau, les plateformes d'échange et les autorités publiques pour assurer la négociation, la certification et la vérification de l'électricité verte ou de ses attributs environnementaux. Il est également essentiel d'assurer l'unicité, la légitimité et la traçabilité de ces attributs, afin qu'ils soient reconnus dans les cadres réglementaires nationaux et internationaux sur le carbone ainsi que dans des initiatives majeures comme RE100 et SBTi.

Les principaux certificats d'électricité verte comprennent les Certificats Internationaux d'Énergie Renouvelable (IREC, mondial), les Instruments Négociables pour les Énergies Renouvelables Globales (TIGR, mondial), les Certificats d'Électricité Verte (GEC, Chine) et les Garanties d'Origine des Énergies Renouvelables (GO, UE). Les contrats d'achat d'électricité (PPA) et d'autres solutions d'approvisionnement en énergie verte existent depuis plusieurs années en Europe et aux États-Unis, permettant d'ajouter 36,1 gigawatts (GW) de capacités renouvelables en Europe et 77,6 GW de capacités zéro carbone aux États-Unis entre 2014 et 2023.^{24,xii} En Chine, le marché des certificats d'électricité verte, lancé en 2017, offre une grande disponibilité, avec 1,8 milliard de certificats émis à la date d'août 2024.²⁵ L'échange d'électricité verte a démarré en septembre 2021 et connaît une croissance rapide, avec des transactions de 8,7, 18,1 et 69,7 TWh respectivement en 2021, 2022 et 2023, soit un taux de croissance annuel moyen de 283 %.²⁶ En 2023, huit entreprises liées aux centres de données figuraient parmi les 100 premiers consommateurs d'électricité verte (certificats compris) en Chine.²⁷

xi Par exemple, le centre de données Dabailou de China Mobile, situé dans le district de Daxing à Pékin, dispose d'environ 4 700 baies informatiques et de 3 000 mètres carrés de panneaux solaires en toiture, générant près de 400 000 kilowattheures (kWh) d'électricité solaire par an. En supposant une consommation annuelle de 10 000 kWh par baie et un PUE annuel moyen de 1,3, la production solaire en toiture couvre environ 0,65 % de la consommation électrique totale annuelle du centre de données.

xii En Europe, les statistiques ne prennent en compte que la contribution des PPA, tandis qu'aux États-Unis, les chiffres incluent également d'autres modes d'approvisionnement en électricité verte, comme les tarifs verts, les investissements en fiscalité verte et les investissements directs (propriété de projet).

À la lumière des tendances internationales en matière de transparence environnementale, il devient essentiel pour les entreprises d'accorder une attention accrue à l'adéquation temporelle et géographique entre l'électricité verte achetée et la consommation des centres de données. Dans le cadre du dispositif RED III de l'UE, l'Association des Organismes Émetteurs prévoit d'affiner la précision géographique et temporelle des Garanties d'Origine en 2024, afin de mieux refléter le lieu, le moment de production et la technologie utilisée pour l'énergie renouvelable.²⁸ Dans ses *Directives de reporting 2024*, RE100 propose également aux entreprises d'adopter des stratégies de correspondance temporelle et géographique fine (approvisionnement 24 h/24 et 7 j/7), identifiant cette approche comme un quatrième indicateur d'impact dans son rapport de suivi du marché et signalant un futur cadre de déclaration basé sur cette granularité.²⁹

Favoriser une coordination harmonisée entre centres de données et réseaux électriques

Une coordination harmonieuse entre les centres de données et les réseaux électriques peut générer une situation gagnant-gagnant, en favorisant à la fois la décarbonation du réseau et la consommation d'énergie à faible émission de carbone dans les centres de données. Avec la montée en puissance des énergies renouvelables, le système électrique fait face à des incertitudes tant du côté de la production que de la demande, ce qui met en avant le besoin de ressources plus flexibles et pilotables pour assurer l'équilibre. Les centres de données, en tant que grands consommateurs d'électricité avec une demande croissante, offrent un fort potentiel en matière de flexibilité côté demande.

Du point de vue du réseau, la flexibilité des charges des centres de données peut alléger la pression sur l'équilibre du réseau, favoriser l'intégration des énergies renouvelables et réduire le facteur d'émission du réseau. Sur le long terme, cela peut aussi limiter les investissements dans des centrales de pointe et différer les besoins d'extension des capacités de transport et de distribution. Du côté des centres de données, dans les régions où le marché de l'électricité est libéralisé, les prix ont tendance à être plus bas lors des pics de production renouvelable, ce qui incite les centres de données à adapter leur consommation en fonction des signaux tarifaires, permettant ainsi de réduire les coûts d'exploitation tout en assurant une alimentation en énergie décarbonée.

La possibilité de déplacer les charges informatiques dans le temps et dans l'espace constitue un levier essentiel pour résoudre les décalages temporels et spatiaux entre la demande des centres de données et l'offre d'électricité verte. L'illustration 20 présente les principales sources de flexibilité temporelle et spatiale dans les centres de données ainsi que leurs caractéristiques en matière d'interaction avec la charge réseau. L'essentiel de la consommation des centres de données provient du système informatique, lui-même réparti entre la charge de calcul et la charge des serveurs. La première reflète la variabilité des tâches de traitement de données, tandis que la seconde représente la charge de base requise par les équipements essentiels pour assurer ces traitements. Les charges informatiques peuvent être classées en deux catégories — hors ligne ou en ligne — selon leur sensibilité au temps de traitement. Leur sensibilité au respect des délais de traitement.

Les charges hors ligne sont généralement composées de tâches complexes de traitement de données, longues à traiter et capables de supporter un certain retard, offrant ainsi une flexibilité temporelle allant de quelques minutes à plusieurs heures, selon la disponibilité des serveurs et la priorité des tâches. Les charges en ligne, qui correspondent à des tâches en temps réel, sont très sensibles à la latence. En règle générale, le système d'ordonnancement maintient une redondance pour les charges en ligne critiques sur des serveurs distants, permettant de rediriger rapidement les commandes opérationnelles d'un centre de données à un autre, ce qui confère une flexibilité spatiale à la charge.

En tirant parti de cette flexibilité opérationnelle, les centres de données peuvent devenir des ressources précieuses et modulables pour le réseau électrique, en offrant non seulement des services tels que le décalage de charge à l'heure ou la régulation de fréquence à la minute, mais aussi en participant à l'ajustement économique, à la planification des unités et à la coordination entre centres de données et systèmes énergétiques.³⁰

En outre, les systèmes de refroidissement, d'alimentation de secours et les dispositifs de soutien apportent une flexibilité supplémentaire pour l'interaction charge-réseau. Par exemple, en ajustant les équipements de refroidissement ou en utilisant des systèmes de stockage thermique à froid, il est possible de...

L'inertie thermique des infrastructures de centres de données et des réseaux de refroidissement, ainsi que l'optimisation de la gestion du stockage d'énergie distribué, peuvent également permettre des réponses à la demande face aux signaux du réseau, de la seconde à l'heure, assurant une gestion coordonnée entre différentes sources d'énergie telles que l'électricité, la chaleur et la climatisation.

Figure 20 Principales sources de flexibilité temporelle et spatiale côté demande dans les centres de données

Source	Équipements principaux	Part de la charge	Méthode d'ajustement	Flexibilité temporelle					Flexibilité spatiale
				Niveau seconde	Niveau minute	Niveau horaire	Niveau journalier	+ Plusieurs jours	
Charge du système informatique	Stockage et serveurs	~50 %	Planification des charges en ligne						☐
			Planification des charges hors ligne	☐	☐	☐	☐	☐	
			Gestion énergétique des serveurs	☐	☐				
Charge du système de refroidissement	Climatisation, réseau de refroidissement	~30 %	Régulation de température, avec inertie thermique	☐	☐	☐			
Système d'alimentation de secours	Groupes électrogènes diesel	N/A	Marche/arrêt, gestion de la puissance		☐	☐	☐	☐	
	Système de stockage d'énergie	N/A	Optimisation de la stratégie de charge et de décharge	☐	☐	☐			

Graphique RMI. Source : North China Electric Power University, Cao Yujie et al., *Coordination et optimisation des centres de données et des systèmes électriques à l'ère de l'Internet de l'énergie (Partie II) : Opportunités et défis, Actes de la Société chinoise d'ingénierie électrique*

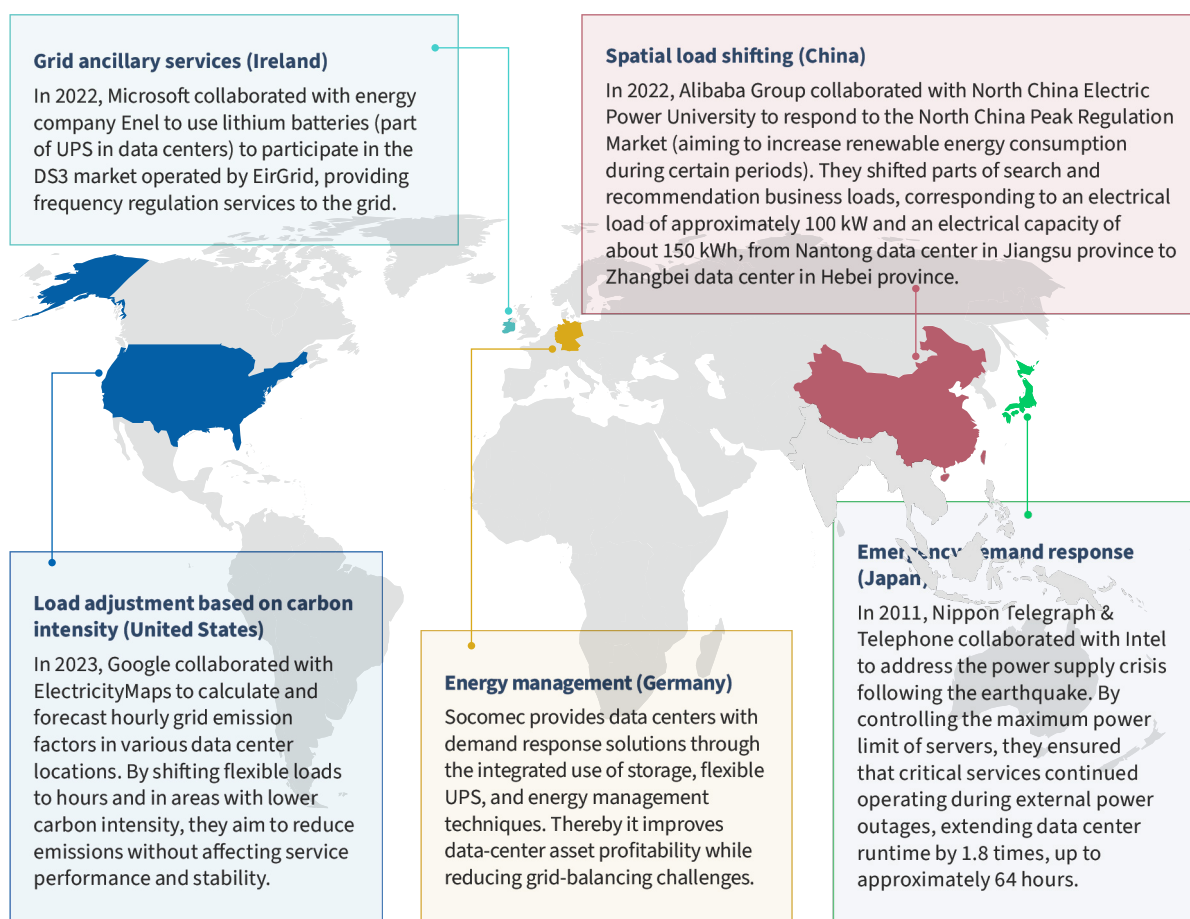
D'un point de vue opérationnel, la planification coordonnée des centres de données et des systèmes électriques s'effectue à deux niveaux : (1) la flexibilité interne de gestion des charges et des systèmes énergétiques dans chaque centre de données ; et (2) la coordination régionale entre plusieurs centres de données répartis géographiquement. L'Exposition 21 présente des exemples mondiaux des interactions entre centres de données et réseaux électriques à différents niveaux et de divers types.

- Coordination au niveau du site : La première étape consiste à mettre en place un approvisionnement énergétique efficace et bas carbone pour le centre de données. Cela inclut l'optimisation de la distribution interne de l'électricité, l'amélioration de l'efficacité du refroidissement, et l'intégration d'énergies renouvelables distribuées. Ensuite, les opérateurs doivent exploiter la flexibilité côté demande des centres de données et adapter la consommation aux signaux des marchés de l'énergie et du carbone. Cela se fait en planifiant les charges informatiques faiblement couplées comme ressources flexibles.^{xiii} Cette méthode permet d'augmenter la part d'électricité verte consommée et de réduire les coûts énergétiques ainsi que les émissions de carbone, sans perturber la logique métier.

^{xiii} Le couplage correspond au degré d'interdépendance entre les modules logiciels. Un couplage lâche signifie que les composants sont peu liés entre eux et qu'une modification sur l'un impacte peu ou pas l'existence ou les performances d'un autre.

· **Coordination à l'échelle régionale :** Cette approche consiste à orchestrer plusieurs centres de données et à optimiser les charges informatiques et énergétiques entre différentes régions. Elle permet d'ajuster dynamiquement la répartition des tâches et la consommation d'énergie dans des centres répartis géographiquement, nécessitant une grande souplesse et capacité d'adaptation, notamment face aux variations de charge et à l'intermittence des énergies renouvelables. Ce type de coordination est souvent étroitement lié aux marchés de l'électricité, avec une participation à des dispositifs tels que la gestion de la demande, la régulation de fréquence et les marchés spot pour optimiser les coûts énergétiques, tout en alignant les coûts informatiques sur les prix du marché. De plus, cette coordination peut réagir à des signaux carbone, comme des facteurs d'émissions du réseau qui varient selon le lieu et le moment, permettant ainsi de réduire précisément l'empreinte carbone liée à l'utilisation électrique des centres de données.

Exemple 21 Exemples internationaux d'interactions entre centres de données et réseaux électriques



Graphique RMI. Source : Alibaba, « Favoriser le développement vert et bas carbone : Alibaba et l'Université North China Electric Power publient plusieurs résultats issus du projet de coordination entre puissance de calcul et électricité des centres de données », <https://developer.aliyun.com/article/1135139> ; ElectricityMaps, « Découvrez comment Google atteint ses objectifs de durabilité grâce à Electricity Maps », <https://www.electricitymaps.com/client-stories/google> ; Microsoft, « Les batteries des centres de données Microsoft soutiennent la croissance des énergies renouvelables sur le réseau », <https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/ireland-wind-farm-datacenter-ups/> ; Agence allemande de l'énergie, *Étude sur la flexibilité des centres de données sino-allemands — État actuel et meilleures pratiques* ; et Intel, « Maîtriser dynamiquement la consommation énergétique des serveurs et réduire les pics de demande dans les centres de données de 16 à 18 % », <https://www.intel.co.id/content/dam/www/public/us/en/documents/articles/ntt-data-case-study.pdf>

Mettre à profit politiques et leviers de marché pour favoriser la réduction du carbone dans les centres de données

Premièrement, il est primordial d'améliorer les politiques d'émissions carbone et les mécanismes de transparence pour les centres de données ainsi que leurs produits (comme les services numériques), afin d'optimiser la gestion du carbone dans ce secteur.

- **La mise en place de politiques pourrait commencer par l'obligation de publier les émissions carbone pour les entreprises cotées et les grands groupes du numérique.** Étant donné la forte concentration du marché des centres de données, imposer cette transparence aux leaders du secteur permettrait de réduire considérablement les émissions, tout en servant d'exemple et de guide pour les centres de données de taille petite ou moyenne, favorisant ainsi la transparence carbone dans toute la filière.
- **Les entreprises situées en aval et le secteur public peuvent encourager les centres de données en amont à rendre compte et à maîtriser leurs émissions en imposant des exigences carbone pour la puissance de calcul et les services numériques.** Les sociétés privées peuvent inclure des plafonds d'émissions dans leurs contrats avec des partenaires de colocation ou de cloud, tandis que les pouvoirs publics pourraient intégrer les indicateurs carbone dans leurs critères d'achat.
- **Intégrer des critères carbone dans les certifications « centre de données vert » renforcerait leur rôle dans la promotion de l'efficacité énergétique et la réduction des émissions.** Les certifications actuelles, telles que l'Indice national chinois d'évaluation des centres de données verts, se concentrent principalement sur l'efficacité énergétique sans mettre l'accent sur le carbone. Ajouter des exigences carbone inciterait les opérateurs à mieux gérer leurs émissions et offrirait des repères plus clairs aux acheteurs en aval. Mettre en place des démarches simplifiées pour la demande, la certification et l'approbation favoriserait également l'adoption massive de ces labels verts.

Deuxièmement, la création d'un système de comptabilité carbone pour les centres de données est essentielle à une gestion efficace des émissions.

- **La comptabilité carbone des centres de données doit en priorité définir des méthodes de mesure pour les émissions de type Scope 3.** Il convient également de prendre en compte la diversité des modes d'exploitation (sur site, colocation, services publics), en précisant les frontières et périmètres de comptabilité carbone selon les différentes entités et structures de propriété.
- **Il est recommandé aux opérateurs de centres de données d'adopter des plateformes de gestion d'infrastructures spécifiques afin d'harmoniser la collecte, le traitement et la déclaration des données énergétiques et carbone, renforçant ainsi l'exhaustivité et la transparence des informations relatives à l'énergie et aux émissions.**
- **L'harmonisation internationale et la mise en place de référentiels communs pour la comptabilité carbone sont également indispensables.** Face à l'essor rapide de l'usage mondial d'Internet et l'apparition de taxes liées au climat, il est essentiel que les standards carbone des centres de données soient compatibles à l'échelle internationale pour gérer les services numériques transfrontaliers et leurs émissions. Le système chinois doit s'aligner sur les normes mondiales et créer une base de données carbone nationale reconnue et crédible à l'international, afin de soutenir l'intégration globale de l'industrie chinoise des centres de données.

Par ailleurs, renforcer le recours aux solutions financières vertes dans le secteur des centres de données s'avère essentiel. Un modèle de finance verte plus spécialisé, guidé par le marché et appuyé par un cadre réglementaire adapté, est nécessaire pour accroître les incitations à déployer des technologies d'efficacité énergétique et de réduction des émissions carbone dans les centres de données.

• Il est essentiel de concevoir des outils financiers verts innovants pour diversifier les sources de financement dédiées à l'intégration des technologies écologiques dans les data centers. Les obligations vertes et les prêts liés à la performance durable figurent aujourd'hui parmi les instruments de financement vert les plus largement utilisés pour ce type de projets. Par ailleurs, les modèles de contrats de performance énergétique peuvent être envisagés lors de la modernisation des centres de données, en impliquant des prestataires spécialisés afin de répondre aux importants besoins d'investissement initial.

• Élargir la taxonomie de la finance verte pour inclure des technologies propres aux data centers permettrait d'offrir un cadre plus clair au soutien financier. Mettre l'accent sur les technologies qui améliorent l'efficacité énergétique des différents sous-systèmes et adopter des solutions bas carbone (voir Figure 22) faciliterait l'accès des projets au financement vert, encourageant ainsi banques, entreprises et sociétés cotées à émettre des obligations vertes. Cette taxonomie enrichie pourrait aussi servir de repère aux collectivités pour concevoir des dispositifs incitatifs adaptés et des politiques associées. Enfin, intégrer des technologies de réduction des émissions sur l'ensemble du cycle de vie, telles que la construction modulaire préfabriquée, contribuera à réduire davantage l'empreinte carbone.

Figure 22 Panorama des technologies bas carbone pour les centres de données

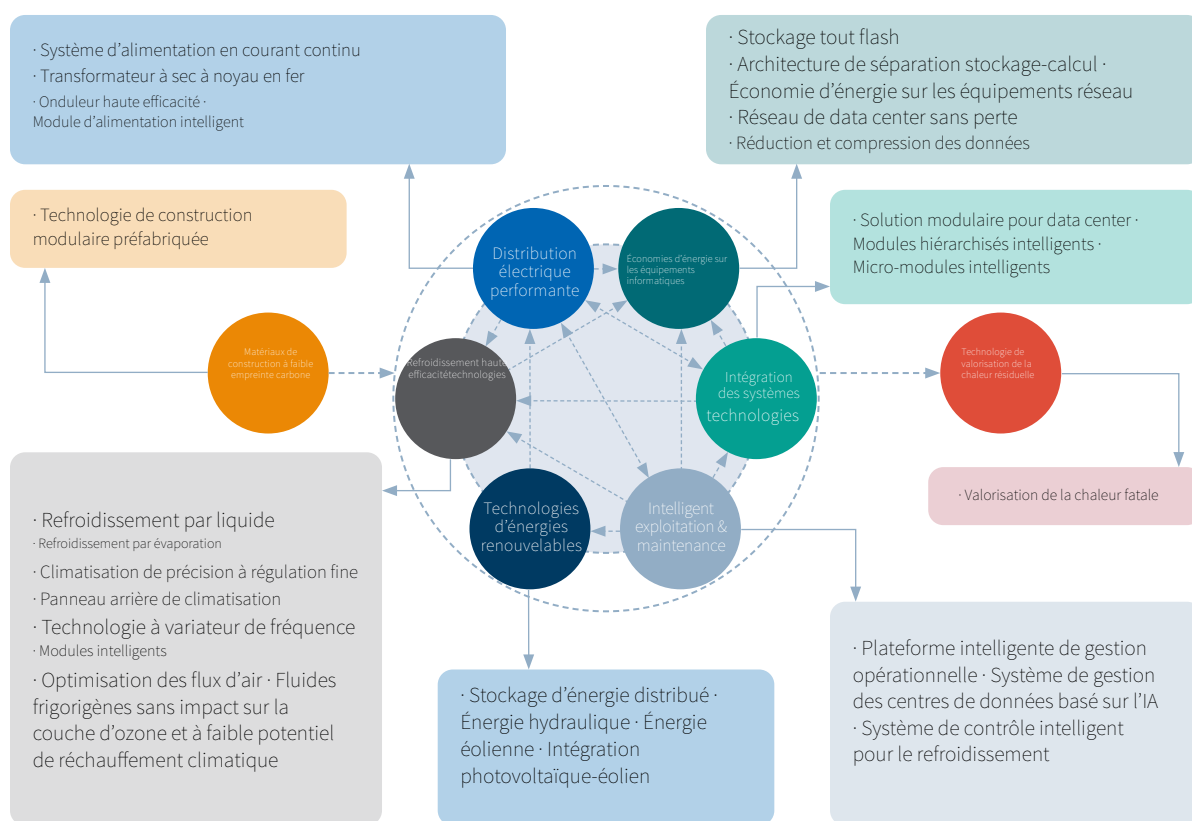


Illustration RMI. Source : Département pour la conservation de l'énergie et l'utilisation efficace, Ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information de la RPC, *Guide des applications technologiques d'économie d'énergie dans le secteur de l'information*, https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/nyjy/art/2022/art_fbb57e69a8b148cfa263953a71b53e2e.html

Énergie et innovation : pistes pour décarboner les centres de données de demain

Stratégie et choix d'emplacement — optimiser la localisation et la configuration des data centers en prenant en compte divers critères

- **Garantir un accès optimal à l'énergie verte** : Privilégier l'implantation des centres de données dans des régions disposant de ressources abondantes en énergies renouvelables telles que l'éolien, le solaire, l'hydroélectricité ou le nucléaire. S'appuyer sur des réseaux électriques propres, des connexions physiques directes ou des micro-réseaux pour s'approvisionner localement. Lorsque ces ressources sont limitées, cibler des zones disposant de marchés d'échanges d'électricité verte interprovinciaux ou interrégionaux bien établis, afin d'assurer l'approvisionnement via des mécanismes de marché. Multiplier les voies d'alimentation électrique et combiner différentes sources d'énergie complémentaires pour garantir une fourniture stable et fiable.

- **Exploiter pleinement les sources de refroidissement naturelles** : Choisir des sites situés dans des climats froids ou tempérés pour utiliser l'air extérieur frais, ou proches de ressources en eau telles que rivières, lacs ou mers pour des systèmes de refroidissement par eau naturelle. Associer ces technologies naturelles à des systèmes de gestion intelligente pour des ajustements automatisés qui optimisent l'efficacité du refroidissement. Créer un système de refroidissement fiable en intégrant à la fois les ressources naturelles et traditionnelles, afin d'assurer le fonctionnement stable des centres de données.

- **Valoriser la récupération de la chaleur** : Lors de la planification de centres de données dans un parc, prendre en compte les besoins en chauffage des bâtiments voisins pour permettre une connexion précise et une répartition efficace de la chaleur résiduelle. En plus de la réutilisation locale, intégrer cette chaleur dans les réseaux de chauffage urbain grâce à des solutions comme les pompes à chaleur, le stockage thermique et le transport de chaleur sur de longues distances. Profiter des incitations fiscales et subventions mises en place par les autorités nationales et locales.

Construction neuve et rénovation : s'appuyer sur les normes pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire l'empreinte carbone des centres de données existants ou à venir

- **Mettre en place un cadre d'évaluation multidimensionnel de l'énergie et du carbone** : Au-delà du PUE, intégrer des indicateurs tels que le taux d'utilisation des énergies renouvelables, l'efficacité du refroidissement, le taux de réutilisation de l'énergie, le taux d'utilisation du carbone, et l'efficacité des serveurs pour les équipements informatiques, afin d'élaborer un cadre d'évaluation complet et multidimensionnel. Définir des valeurs de référence et des seuils pour ces indicateurs, adaptés au climat local et au mix énergétique.

- **Affiner les standards d'efficacité énergétique des centres de données et encourager les technologies de réduction du carbone** : Intégrer les principes de conception des bâtiments verts dans les normes grâce à l'utilisation du refroidissement naturel et à l'optimisation de l'enveloppe des bâtiments. Proposer des recommandations pour l'adoption de technologies économes en énergie telles que le refroidissement performant, les équipements électriques et informatiques, la récupération de chaleur et les systèmes intelligents de gestion de l'énergie. Valoriser l'usage des énergies renouvelables, dont le solaire photovoltaïque, l'éolien et les systèmes de stockage.

- **Accélérer la modernisation des centres de données à faible rendement :** Élaborer des plans de rénovation énergétique adaptés à la taille et à l'ancienneté des infrastructures. Pour les petits et moyens centres plus anciens à faible efficacité, envisager leur fermeture ou regroupement. Pour les grands et très grands centres, privilégier des rénovations ciblées ou globales. Opter en priorité pour des améliorations modulaires afin de limiter l'impact sur le fonctionnement. Mettre en place une dynamique interdisciplinaire pour favoriser la collaboration autour de l'efficacité énergétique. Réaliser régulièrement des audits énergétiques afin de mieux sensibiliser sur les avantages économiques liés à ces initiatives.

Gestion des opérations — concevoir des modèles de consommation énergétique propres, bas carbone et compatibles avec le réseau pour les data centers

- **Adopter une diversité d'approvisionnements en énergie verte :** Les gestionnaires de data centers devraient opter pour un mix de solutions incluant les énergies renouvelables locales, la connexion directe à l'électricité verte, le marché de l'énergie verte et l'échange de certificats d'électricité verte, selon les besoins énergétiques, l'étape du projet, la gestion des risques, les avantages économiques et les obligations de transparence environnementale, afin d'augmenter au maximum la part d'énergie verte consommée.

- **Renforcer les mécanismes d'échange d'énergie verte et de certificats d'électricité verte :** Les pouvoirs publics, les opérateurs de réseau et les plateformes d'échange doivent coopérer pour mettre en place un marché stable et fiable, garantissant l'unicité, l'autorité et la traçabilité des attributs environnementaux, afin d'accroître la reconnaissance nationale et internationale. Dans les zones où l'électricité verte est limitée, il est essentiel d'améliorer les échanges interrégionaux afin d'augmenter la fréquence, le volume et la capacité de transmission des transactions.

- **Explorer des modèles de coordination optimale entre la puissance de calcul et l'approvisionnement électrique :** Les entreprises devraient désigner des spécialistes pour superviser de manière intégrée la gestion de l'énergie, la planification des tâches informatiques et les systèmes de refroidissement afin d'identifier et de piloter en toute autonomie les ressources flexibles, faiblement couplées à la logique métier en temps réel. En complément, le partage spatial des ressources et une allocation optimisée entre centres de données sont indispensables. Des signaux tarifaires adaptés du marché de l'électricité sont essentiels pour encourager la flexibilité côté demande, la participation aux marchés spot, aux services auxiliaires et aux mécanismes de réponse à la demande, favorisant la coordination à l'échelle des installations et des régions, tout en alignant les prix de l'énergie et du calcul.

- **Accroître les projets pilotes de synergie entre centres de données verts et coordination électro-informatique :** Les gestionnaires de centres de données doivent s'associer avec des producteurs d'énergies renouvelables locaux et les opérateurs de réseau pour mettre en place des pratiques d'alimentation directe en énergie verte. Les premières expérimentations pourraient cibler des régions riches en énergies renouvelables, centralisées ou distribuées, ainsi que les pôles nationaux de calcul, tout en testant des alternatives zéro carbone comme l'hydrogène vert, les piles à combustible à ammoniac ou les petits réacteurs modulaires. Il s'agit également de développer des modèles économiques de synergie électricité-calcul et de partager les retours d'expérience pour favoriser la coordination à l'échelle nationale.

Mécanismes de soutien — garantir un développement écologique et de qualité des data centers grâce à une synergie entre politiques publiques et dynamiques de marché

- **Renforcer les politiques d'émissions carbone et les dispositifs de transparence pour les data centers et leurs produits :**Instaurer des obligations de déclaration carbone pour les sociétés cotées et grandes entreprises du secteur. Favoriser l'efficacité énergétique et la réduction des émissions via des achats responsables.Les entreprises utilisatrices de services numériques peuvent exiger des performances bas carbone de leurs fournisseurs, et les organismes publics intégrer ces critères dans leurs appels d'offres.Inclure des indicateurs d'émissions dans les systèmes de certification des data centers durables.

- **Mettre en place un système unifié de comptabilisation du carbone pour les centres de données :** Élaborer des normes précises de comptabilité carbone, en veillant particulièrement aux émissions de Scope 3. Définir les limites d'émissions pour chaque acteur et structure de propriété. Favoriser l'adoption d'outils numériques, comme une plateforme de gestion d'infrastructure de centre de données, pour harmoniser la collecte et le traitement des données, améliorer la transparence ; accorder la priorité à l'alignement international et à la reconnaissance mutuelle lors de l'élaboration des standards de comptabilité carbone des centres de données.

- **Mobiliser des outils financiers verts pour renforcer l'efficacité énergétique et la réduction du carbone dans les centres de données :** Encourager les institutions financières et les entreprises à concevoir des solutions innovantes adaptées à ce secteur, offrant des financements variés à destination des technologies d'économie d'énergie et de réduction des émissions dans les centres de données écologiques. Intégrer des innovations telles que le refroidissement liquide, l'intégration de systèmes haute performance et la gestion intelligente dans la classification de la finance verte, afin d'orienter les investissements vers des centres de données plus efficaces et moins émetteurs.

Notes de fin

- 1 *Rapport d'évaluation de l'indice mondial de la puissance informatique 2022-2023*, International Data Corporation, Inspur Information et Tsinghua Global Industry Institute, juillet 2023, <https://www.igi.tsinghua.edu.cn/info/1019/1321.htm>.
- 2 « Puissance informatique, nouvelle productivité de qualité et modernisation de la gouvernance nationale », *China Youth Daily*, 12 mai 2024, <http://theory.people.com.cn/n1/2024/0512/c40531-40234127.html>.
- 3 *Livre blanc sur le développement de l'industrie des centres de données en Chine*, China Comservice Digital Infrastructure Industry Research Institute, avril 2023, <https://aimg8.dlssyht.cn/u/551001/ueditor/file/276/551001/1684888884683143.pdf>.
- 4 « Technologie au premier trimestre 2024 », conférence de presse du Bureau de l'information du Conseil d'État sur le développement de l'industrie et de l'information, avril 2024, https://www.gov.cn/jianbo/fabu/202404/content_6952362.htm.
- 5 *Électricité 2024*, Agence internationale de l'énergie (AIE), 2024, <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>.
- 6 « Dilemme énergétique des centres de données IA — Course à l'espace des datacenters IA », SemiAnalysis, mars 2024, <https://www.semianalysis.com/p/ai-datacenter-energy-dilemma-race>;
Croissance générationnelle — L'essor mondial de la puissance des centres IA/Data et son impact sur la durabilité, GS Sustain, avril 2024, <https://www.goldmansachs.com/images/migrated/insights/pages/gs-research/gs-sustain-generational-growth-ai-data-centers-global-power-surge-and-the-sustainability-impact/sustain-data-center-redaction.pdf>; « Les puces IA consommeront plus de 1,5 % de l'électricité mondiale dans les cinq prochaines années — et 1 milliard de tonnes de carbone », TechInsights, juillet 2024, <https://library.techinsights.com/strategy-analytics/wp-asset/2012723#code=DCC-2406-803>; Émissions de CO₂ en 2023, AIE, mars 2024, <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>.
- 7 Initiative fédérale de consolidation des centres de données, <https://www.congress.gov/bill/113th-congress/housebill/1232>.
- 8 Initiative fédérale de consolidation des centres de données.
- 9 « Mise à jour de l'initiative d'optimisation des centres de données », juin 2019, <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2019/06/M-19-19-Data-Centers.pdf>.
- 10 Pacte pour des centres de données neutres en carbone, <https://www.climateutraldatacentre.net/>.
- 11 *Rapport de recherche sur le développement de la puissance informatique verte en Chine*, China Academy of Information and Communications Technology, 2024, <https://mp.weixin.qq.com/s/-watRt812G4HinUJY0tPzg>.
- 12 *Tendances mondiales des centres de données 2024*, Global Commercial Real Estate Services, 24 octobre 2024, <https://www.cbre.com/insights/reports/global-data-center-trends-2024>.
- 13 *Livre blanc sur l'indice de développement de la puissance informatique en Chine*, China Academy of Information and Communications Technology, 2023, <http://www.caict.ac.cn/english/research/whitepapers/202311/P020231103309012315580.pdf>.
- 14 « Les centres de données hyperscale atteignent le cap du millier ; leur capacité totale double tous les quatre ans », Synergy Research Group, <https://www.srgresearch.com/articles/hyperscale-data-centers-hit-the-thousand-mark-total-capacity-is-doubling-every-four-years>.
- 15 *Alimenter l'intelligence : analyse de la consommation énergétique de l'intelligence artificielle et des centres de données*, Electric Power Research Institute, https://www.wpr.org/wp-content/uploads/2024/06/3002028905_Powering-Intelligence-Analyzing-Artificial-Intelligence-and-Data-Center-Energy-Consumption.pdf.

- 16 *Plan de mise en œuvre pour le système d'innovation collaborative des centres nationaux intégrés de big data*, NDRC, <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-05/26/5612405/files/37d38a7728564ad8b5e-4f08c16cfc8f2.pdf>; et *Avis sur la mise en œuvre approfondie du projet « Transfert des ressources informatiques d'est en ouest » pour accélérer la création d'un réseau national intégré de calcul*, NDRC, https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6924596.htm.
- 17 « Économie numérique : les régions historiques en pleine révolution rivalisent pour devenir la 'Vallée de l'informatique' de Chine », <https://mp.weixin.qq.com/s/d3dIE43emt1kQBYXeMa07Q>.
- 18 H. Zhu et al., « Technologies d'économie d'énergie et de réduction des émissions pour les centres de données dans le cadre de la construction de villes intelligentes et bas carbone », *Sustainable Cities and Society*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670722006266>.
- 19 Zhao Shuai, Diminuer les émissions de carbone à la source de la puissance de calcul — l'adoption de pratiques écologiques et de systèmes de mesure fiables est indispensable, Inspur Information, PR Newswire, <https://www.163.com/dy/arti-cle/IECQSPEL051494RM.html>.
- 20 Opinions sur la mise en œuvre approfondie du projet de transfert de ressources informatiques de l'Est vers l'Ouest pour accélérer la création d'un réseau national intégré, NDRC, https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6924596.htm.
- 21 Douglas Donnellan et al., Enquête mondiale sur les centres de données 2024, Uptime Institute.
- 22 Catalogue des projets soutenus par les obligations vertes, Banque populaire de Chine, avril 2021.
- 23 *Intelligence énergétique*.
- 24 Hao Yihan, Jiang Yi et Lu Shutong, *Mécanismes financiers innovants pour stimuler le développement des énergies renouvelables en Chine — Opportunités et défis des contrats d'achat d'électricité verte à long terme*, RMI, 2024, <https://rmi.org.cn/insights/green-power-long-term-agreement/>.
- 25 « L'Administration nationale de l'énergie publie les données d'émission et de transaction des certificats nationaux d'électricité verte pour août 2024 », Administration nationale de l'énergie, https://www.nea.gov.cn/2024-09/11/c_1310786091.htm.
- 26 « Règles fondamentales pour les échanges d'électricité à moyen et long terme — chapitre spécial sur le commerce de l'électricité verte » publiées — Encourager les acteurs économiques à s'engager activement dans la négociation d'énergie verte, https://www.gov.cn/zhengce/202408/content_6970517.htm.
- 27 « Publication officielle du Top 100 des entreprises consommatrices d'électricité verte (certificat d'électricité verte) en Chine 2023 », <https://mp.weixin.qq.com/s/9dQPn2UZNjEVrSnu9a3r3Q>.
- 28 *Lettre d'information du 21 décembre 2023*, Association of Issuing Bodies, <https://www.aib-net.org/newsletter/web.html?n2g=exu6l9s3-94w48wba-dy4>.
- 29 *Guide de déclaration RE100 2024*, Climate Group et CDP, <https://www.there100.org/sites/re100/files/2024-10/RE100%20Reporting%20Guidance%202024%20v3.pdf>.
- 30 X Yin, C Ye, Y Ding et Y Song, « Valorisation des centres de données Internet en tant que prosommateurs d'énergie dans un système intégré électricité-chaleur », *IEEE Trans Smart Grid* 14, n° 1 (2023) : 67–82, <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3197613>.

Yujing Liu, Wei Li, Ziyi Liu, Meng Wang, Guangxu Wang et al., *Alimenter l'essor des data centers avec des solutions bas carbone : regard chinois et perspectives mondiales*, RMI, 2024,
<https://rmi.org/insight/powering-the-data-center-boom-with-low-carbon-solutions>.

Chez RMI, la collaboration est au cœur de nos valeurs et nous nous engageons à accélérer la transition énergétique en partageant nos connaissances et nos analyses. C'est pourquoi nous autorisons toute personne intéressée à référencer, partager et citer nos travaux sous licence Creative Commons CC BY-SA 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



Toutes les images utilisées proviennent d'iStock, sauf indication contraire.



Centre d'Innovation RMI
22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

© Novembre 2024 RMI. Tous droits réservés.
Rocky Mountain Institute® et RMI® sont des
marques déposées.