

Table des matières

Résumé	01	Consommation d'énergie : Bitcoin et centres de données	15
Introduction	03		
Bitcoin Mining 101	05	Préconisations réglementaires	18
Qu'est-ce que le minage ?	05	Annexe	19
De loterie à consommateur d'énergie atypique	07	Annexe A	19
		Annexe B	20
Centres de données IA 101	09	Notes de fin	21
Notre étude :	12	A propos	22
Méthodologie	12		
Analyse	13		

Comment la flexibilité du minage de Bitcoin réduit les émissions de carbone

Impacts énergétiques actuels et futurs de l'intelligence
artificielle et du minage de Bitcoin

Résumé exécutif

La croissance rapide du minage de Bitcoin, et plus récemment celle de la puissance de calcul nécessaire à l'intelligence artificielle (IA), soulève des questions quant à leur consommation d'électricité et leurs émissions de CO2. Toutefois, ces technologies présentent des impacts énergétiques et environnementaux fondamentalement distincts, nécessitant une approche différenciée dans les politiques publiques. Dans ce rapport, nous expliquons et documentons ces différences, exposons les défis liés à la satisfaction de la demande électrique à venir et faisons des recommandations aux décideurs politiques sur la meilleure manière de répondre à cette demande.

Le minage de Bitcoin et l'IA sont différents

- Nous expliquons les paramètres fondamentaux du minage de Bitcoin, qui fonctionne comme une sorte de loterie énergivore pour sécuriser un réseau décentralisé et distribuer équitablement de nouveaux bitcoins. Ces paramètres le rendent flexible, évolutif, mobile, indépendant de la localisation et sensible au prix de l'électricité. En conséquence, les mineurs recherchent constamment de l'énergie gaspillée, que ce soit en valorisant les gaz de torchage dans des champs pétrolifères isolés ou en s'installant près d'installations solaires et éoliennes. À l'instar des scarabées bousiers, les mineurs survivent grâce aux déchets.
- À l'inverse, on compare la puissance de calcul de l'IA à celle des sauterelles qui dévorent les récoltes : sa consommation d'électricité est généralement inflexible, dépendante de la localisation, du volume et insensible aux prix. Les centres de données IA augmentent la demande de pointe, nécessitant une production supplémentaire de la part du réseau pendant ces périodes.
- Les estimations de la consommation électrique des serveurs IA variant entre 20 et 125 TWh, mais l'IA pourrait déjà utiliser plus du double de la consommation du réseau Bitcoin (48 TWh) tout en ayant un taux de croissance plus rapide.
- Points à noter: Nous pensons que l'IA évoluera pour ressembler davantage au minage de Bitcoin à mesure que les charges de calcul se déplaceront vers les sources d'énergie les moins coûteuses. Nous notons également que, durant les brèves périodes d'envolée du prix du bitcoin, le minage peut se comporter comme une sauterelle, dès lors qu'il devient rentable d'utiliser toute l'électricité disponible.

Documenter la flexibilité des mineurs de Bitcoin

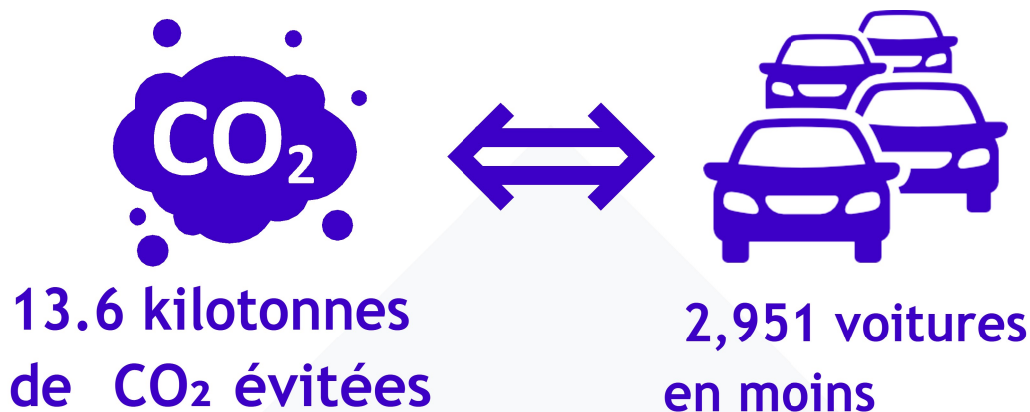
- Les mineurs de Bitcoin vantent souvent leur capacité à éteindre leurs machines lorsque le réseau est sous forte contrainte, mais jusqu'à présent, l'ampleur de cette flexibilité n'avait jamais été vérifiée de manière indépendante. Nous avons recueilli des données détaillées sur l'utilisation de l'électricité de 10 entreprises de minage de Bitcoin aux États-Unis et au Canada et nous avons constaté qu'elles réduisaient leur consommation entre 5 et 31% du temps.

La flexibilité a un impact sur les émissions de carbone

- Nous avons utilisé des facteurs d'émissions marginaux fournis par RESurety et WattTime pour calculer la quantité de dioxyde de carbone évitée lorsqu'une ferme de minage de Bitcoin réduit sa demande en électricité, par rapport à un centre de données fonctionnant en continu. Sur trois mois, les mineurs étudiés ont réduit leurs émissions de dioxyde de carbone de 13 600 tonnes. Si nos mineurs échantillonnés sont représentatifs du réseau, l'impact marginal de la flexibilité des mineurs équivaut à éviter 4,4 millions de tonnes de dioxyde de carbone par an, soit l'équivalent de retirer 956 521 voitures de la route.

Les décideurs doivent encourager la flexibilité et les nouvelles productions d'énergie

- Nous appelons les décideurs à envisager des politiques qui favorisent l'évolution vers des modèles d'utilisation de l'énergie plus flexibles, par exemple avec la mise en place de tarifications dynamiques pour inciter à l'effacement et reflète dans leur prix la rareté et l'abondance. Nous avons également besoin de réformes des lignes de transport et de l'interconnexion, qui permettraient aux nouveaux projets de production d'énergie de répondre à la demande à venir.



Pour 8 installations de minage durant les mois de juillet, août et septembre 2023.

La flexibilité du minage de Bitcoin réduit les émissions de carbone.



En supposant que l'ensemble du réseau possède une flexibilité similaire à celle des installations de notre étude dans des conditions de réseau comparables.

Émissions annuelles. Basées sur des données recueillies auprès de l'industrie du minage de Bitcoin aux États-Unis et au Canada, du CBECI et de l'EPA.

Tous les centres de données ne se valent pas

Quinze ans après son invention, le minage de Bitcoin reste mal compris. La plupart des décideurs politiques savent désormais que ce que nous appelons « miner » est en fait un type de calcul effectué dans des centres de données. Ils savent que le minage de Bitcoin consomme beaucoup d'énergie, actuellement 0,22 % de toute l'énergie primaire dans le monde [1]. Ce qu'ils ne comprennent pas, c'est la différence entre les fermes de minage de Bitcoin et les autres types de centres de données, qu'il s'agisse des centres de données traditionnels qui traitent nos courriels et nos vidéos en streaming, ou des nouveaux centres de données en plein essor qui alimentent l'intelligence artificielle. Pour la plupart des régulateurs, un centre de données est simplement un centre de données. Nous pensons qu'il s'agit là d'un dangereux amalgame entre deux choses qui sont en fait très différentes, et notre rapport vise à expliquer pourquoi.

La sauterelle et le bousier

Nous utilisons pour métaphore directrice deux espèces d'insectes : la sauterelle et le bousier.

Les centres de données traditionnels, et en particulier ceux de l'IA, sont des sauterelles. Tout comme les sauterelles qui s'abattent sur les récoltes d'un agriculteur et mangent tout ce qu'elles voient, les centres de données traditionnels consomment de l'énergie selon leur propres conditions. Leurs contrats exigent un temps de disponibilité de 99,99 %, de sorte qu'ils ne peuvent pas éteindre leurs machines lorsque le réseau est sous forte contrainte. Leurs marges bénéficiaires leur permettent de payer des prix élevés pour l'électricité, ce qui les rend plus compétitifs que les acheteurs locaux. Ils ont besoin d'un système de refroidissement spécial à forte consommation d'eau et de connexions internet à faible latence avec les grandes zones métropolitaines. Ce qui implique que les centres de données arrivent comme une nuée de sauterelles et qu'ils consommeront autant d'énergie que les réseaux pourront en produire, ce qui entraînera une hausse des prix et une augmentation des émissions.

“L'impact de l'effacement sur les émissions a été ignoré à ce jour par toutes les estimations sur les émissions du minage de Bitcoin ; ces estimations ont confondu à tort la sauterelle et le bousier.”

À l'inverse, le minage de Bitcoin est un scarabée bousier qui utilise les déjections animales à la fois comme source de nourriture et espace de reproduction. Nous faisons cette analogie parce que les paramètres de conception de Bitcoin font que le minage n'est rentable qu'avec l'énergie la moins chère du monde. (Peu de mineurs peuvent fonctionner de manière rentable au-dessus de 0,05 \$/kWh, et la plupart paient bien moins). Les mineurs peuvent également se déplacer n'importe où dans le monde sans que cela n'affecte leurs bénéfices, et ils peuvent allumer ou éteindre leurs machines en quelques secondes seulement. Cet ensemble de caractéristiques signifie que les mineurs sont engagés à l'échelle mondiale dans une recherche incessante d'énergie gaspillée. Cette recherche prend de nombreuses formes, comme la mitigation du méthane dans les champs pétrolifères isolés (qui est sinon simplement brûlé dans une torchère), ou la localisation sur site avec des installations solaires et éoliennes pour absorber l'énergie excédentaire. Lorsqu'une ferme de minage de Bitcoin est connectée à un réseau électrique, ses machines s'éteignent simplement lorsque l'énergie est rare et chère, et se rallument lorsque l'énergie est abondante et bon marché. Ainsi, même si le minage de Bitcoin consomme de grandes quantités d'énergie, à l'image du modeste bousier il exploite surtout ce que les autres laissent derrière.



Ajouter un scarabée bousier ne requiert pas nécessairement davantage d'infrastructures de production pour couvrir la demande de pointe, alors que l'ajout d'une sauterelle, si. L'intégration de datacenters hautement flexibles pourrait même, en théorie, réduire les émissions totales du réseau. Jusqu'à récemment, la flexibilité des mineurs de Bitcoin n'avait pas encore été étayée par des données concrètes. Nous savions que les mineurs de Bitcoin pouvaient fonctionner comme des bousiers, mais nous ne savions pas s'ils le faisaient réellement, ou s'ils se comportaient eux-mêmes comme des sauterelles.

Non seulement différents en théorie, mais aussi en pratique.

Nous avons recueilli des données sur la consommation d'énergie dans le monde réel, directement auprès de dix entreprises de minage de Bitcoin, afin de vérifier si la flexibilité réelle du minage correspondait à leur rhétorique. Nous avons ensuite analysé ces données pour déterminer dans quelle mesure les émissions sont évitées par rapport à un datacenter traditionnel, rigide.

Nos résultats montrent que les mineurs se comportent effectivement comme des scarabées bousiers et font preuve de flexibilité. Les fermes de minage de Bitcoin étudiées ont éteint leurs ordinateurs entre 5 % et 31 % du temps, soit lorsque les prix de l'électricité étaient élevés, soit lorsque les opérateurs du réseau électrique leur en ont fait la demande.

Nous avons également constaté l'importance de cette flexibilité. En croisant nos données avec les facteurs d'émissions marginales de WattTime et ReSurety, nous avons analysé l'impact des émissions lorsque les mineurs réduisaient la consommation de leurs machines, en fonction du moment et du lieu où cela se produisait. Il s'avère que consommer de l'énergie comme un bousier génère bien moins d'émissions que de consommer comme une sauterelle. Les mineurs de Bitcoin qui nous ont fourni des données ont évité l'émission de 13 577 tonnes de dioxyde de carbone en 3 mois, par rapport à un datacenter traditionnel, qui ne réduit pas sa consommation. Cela équivaut à retirer 2 951 voitures de la circulation chaque année. Si l'ensemble du réseau Bitcoin se comporte comme nos participants, avec des conditions du réseau électrique similaires, il évite alors plus de 4 mégatonnes de dioxyde de carbone chaque année, ce qui équivaut à retirer plus de 956 500 voitures de la circulation pendant un an. À ce jour, cet impact de l'effacement sur les émissions a été ignoré par toutes les estimations des émissions liées au minage de Bitcoin ; ces estimations ont confondu, à tort, le bousier avec la sauterelle.

En résumé, l'IA et Bitcoin ont des caractéristiques différentes, et nous pensons que les politiques publiques devraient être élaborées en tenant compte de ces différences. Nous supposons que l'IA deviendra moins comparable à une sauterelle et plus à un scarabée bousier avec le temps, à mesure que l'industrie deviendra plus compétitive, et en particulier avec le calcul distribué et le parallélisme des modèles. Mais pour l'instant, nous n'observons que des signaux émergents de flexibilité dans le calcul de l'IA.

Dans ce qui suit, nous expliquons plus en détail la nature de ces deux types de consommateurs d'énergie et estimons leur consommation énergétique actuelle et future ainsi que leurs émissions relatives. Nous concluons en proposant des recommandations politiques qui permettraient aux réseaux électriques de répondre à la demande à venir tout en tirant parti des caractéristiques uniques du minage de Bitcoin, comparables à celles du bousier.

Bitcoin Mining 101

Qu'est-ce que le minage ?

En substance, le réseau Bitcoin est un registre distribué. Au lieu d'un registre unique, détenu par une banque par exemple, le protocole Bitcoin crée des milliers de copies du registre sur l'ordinateur de toute personne utilisant le logiciel Bitcoin. Non seulement ce registre est massivement distribué, mais il est également exhaustif : il s'agit d'un enregistrement public de l'historique de toutes les transactions en bitcoin.

Ce qui maintient toutes les milliers de copies du registre en accord, c'est le minage de Bitcoin. Le minage coordonne non seulement toutes les copies du registre, en les protégeant contre divers types d'attaques, mais il permet également l'émission de nouveaux bitcoins.

Mais qu'est-ce que le minage de Bitcoin et comment coordonne-t-il les copies du registre de Bitcoin ?

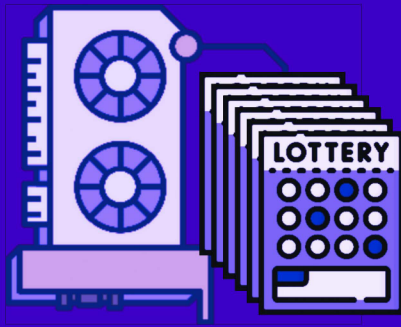
Le minage est une compétition que l'on peut imaginer comme une loterie. Chaque ordinateur de minage est comme une machine à générer des tickets de loterie. Plus vous avez de machines, plus vous produisez de tickets, et plus vos probabilités de gagner la « loterie du minage » augmentent. Actuellement, le réseau Bitcoin traite des milliers de milliards de tickets de loterie chaque seconde.

Lorsqu'un mineur « gagne » à la loterie, tout le monde sur le réseau peut rapidement vérifier que son ticket est gagnant, et le réseau accorde au mineur gagnant le droit de publier de nouveaux lots de transactions, appelés blocs, dans le registre partagé. Gagner à la loterie est lucratif, car le mineur qui publie un lot de transactions peut percevoir les frais associés à ces transactions (environ 5 % des revenus du mineur) et reçoit également une récompense pour avoir gagné, appelée la subvention de bloc (environ 95 % des revenus du mineur). La subvention de bloc est le moyen par lequel tous les nouveaux bitcoins sont distribués.

Contrairement à une loterie classique, la récompense diminue : tous les quatre ans, la subvention de bloc en bitcoin est réduite de moitié. Elle est actuellement de 3,25 bitcoins par bloc, contre 50 bitcoins par bloc en 2009.

Le protocole Bitcoin contrôle également la vitesse à laquelle les blocs sont ajoutés à la chaîne de blocs. Le protocole diminue la probabilité qu'un ticket soit gagnant si les blocs sont trouvés plus rapidement que la moyenne de 10 minutes, et augmente cette probabilité si les blocs sont trouvés plus lentement que 10 minutes. Cela garantit un flux constant de nouvelles transactions et une émission régulière de nouveaux bitcoins.

Le minage de Bitcoin est comme une loterie



Chaque ordinateur de minage est comme un générateur de tickets de loterie.



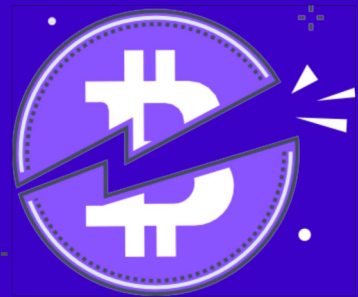
Plus vous générez de tickets, plus avez de chances de gagner la loterie.



Mais... Si les participants devinent trop vite, la loterie devient plus difficile.



Donc... Il faut gagner en efficacité pour rester dans la course.



Et... La récompense est réduite de moitié tous les quatre ans.

Bitcoin Mining 101

De loterie à consommateur d'énergie atypique

Ce mode de consommation, semblable à celui du scarabée bousier, se manifeste de diverses façons.

- **Acheteur de premier et de dernier recours pour l'éolien et le solaire.** Contrairement à d'autres consommateurs d'énergie, comme les habitations ou les usines, les mineurs de Bitcoin peuvent acheter de l'électricité inexploitée, c'est-à-dire non physiquement reliée à des utilisateurs qui en ont besoin. Ainsi, les mineurs peuvent être des « acheteurs de premier recours », servant en quelque sorte de locataires piliers pour de nouvelles fermes solaires et éoliennes avant leur connexion complète au réseau. Les mineurs peuvent également être des « acheteurs de dernier recours », en utilisant l'électricité excédentaire lorsque les générateurs produisent trop. Par exemple, lors d'une journée venteuse et ensoleillée, lorsque les panneaux solaires et les éoliennes produisent plus que ce dont le marché connecté a besoin, les mineurs peuvent utiliser cet excédent [3]. Comme les énergies renouvelables nécessitent des acheteurs pour leur production d'électricité, le minage peut inciter au développement de la production d'énergie renouvelable. En effet, il est fréquent de trouver des opérations de minage de Bitcoin dans des zones où il y a un excédent d'énergie éolienne et solaire, soit sur site avec une ferme éolienne ou solaire, soit dans une zone du réseau électrique où une grande quantité d'énergie renouvelable est inexploitée en raison de contraintes de transmission.
- **Utilisation sur site de l'énergie hydroélectrique inexploitée.** Dans d'autres cas, les mineurs de Bitcoin s'implantent dans certains pays, comme le Kenya, où les mini-réseaux hydroélectriques sont en difficulté à cause d'une faible demande [4]. Récemment, Marathon Digital Holdings, une entreprise américaine de minage de Bitcoin cotée en bourse, a signé un accord pour valoriser et investir 80 millions de dollars dans l'énergie verte inexploitée du Kenya [5].
- **Effacement de la demande de deux manières.** La plupart des mineurs de Bitcoin connectés au réseau arrêtent leurs machines dès que les prix de l'électricité sont trop élevés pour miner de manière rentable. C'est ce qu'on appelle l'effacement tarifaire. Mais nous voyons également des mineurs participer à des programmes d'assurance réseau, connus sous le nom d'effacement diffus, où les mineurs arrêtent volontairement leur équipement lorsque les opérateurs du réseau le demandent, dans le cadre d'un accord contractuel [6]. L'effacement permet d'éviter les coupures de délestage et améliore la fiabilité du réseau en permettant aux opérateurs de contrôler si les mineurs fonctionnent ou non à tout moment. Ces deux comportements signifient que les mineurs sont généralement déconnectés lors des pics de demande, restituant ainsi de l'énergie au réseau lorsqu'elle est la plus nécessaire.
- **Baisse des émissions de méthane.** D'autres entreprises de minage s'attaquent au méthane gaspillé ou mal brûlé dans les décharges et les champs pétroliers et gaziers [7]. Certaines de ces entreprises minant avec du méthane parviennent également à réduire les émissions, soit en capturant le méthane relâché, soit en améliorant la faible combustion des torchères.

- **Electrification du chauffage.** La volonté de rester compétitif pousse également les entreprises de minage à réutiliser la chaleur perdue pour d'autres usages, tels que le chauffage municipal, la distillation de l'eau ou la fourniture de chaleur pour la capture directe du carbone dans l'air [8].
- **Des exceptions existent.** Bien sûr, la recherche d'énergie bon marché ne se traduit pas toujours par un soutien aux énergies renouvelables, par l'équilibrage des réseaux électriques ou par la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Dans certains cas, des entreprises de minage de Bitcoin ont choisi de s'installer à proximité de centrales à gaz naturel ou à charbon. Cependant, au fur et à mesure que les marges bénéficiaires diminuent, seule l'énergie la moins chère demeure désormais rentable pour les mineurs, et cette forme d'utilisation d'énergie, bien qu'elle ne soit pas bénéfique, tend à diminuer.

Tous ces comportements sont prévisibles et découlent, comme décrit ci-dessus, de la nature même unique de Bitcoin. Le minage repose sur des mécanismes d'incitation qui poussent naturellement vers un comportement de type scarabée bousier. Il consomme certes de grandes quantités d'énergie, mais de façon rarement nuisible, et souvent même utile.

En dehors des lois du marché, certaines entreprises comme le Sustainable Bitcoin Protocol utilisent des produits financiers pour encourager l'utilisation d'énergie plus verte. Du côté des politiques publiques, des États comme New York ont limité la localisation sur site du minage de Bitcoin avec des centrales à combustibles fossiles [9]. D'autres États, comme l'Ohio, mettent en place de nouvelles structures tarifaires qui limiteraient sérieusement la demande liée au minage sur leur réseau [10]. Nous ne portons aucun jugement de valeur sur ces choix politiques, mais étant donné l'émergence d'une combinaison d'incitations à la fois marchandes et publiques, la combinaison des faibles marges bénéficiaires du minage de Bitcoin et de sa flexibilité sans égale orientera inévitablement les mineurs vers l'utilisation d'excédents d'énergie propre.

Dans la section suivante, nous approfondirons notre analyse comparative du minage de Bitcoin et de l'IA, afin d'explorer comment les similitudes et les différences entre ces deux technologies influenceront la demande en électricité, la fiabilité du réseau électrique et les émissions de gaz à effet de serre.

Centres de données IA 101: Caractéristiques

Nous avons introduit le scarabée bousier — le minage de Bitcoin — et expliqué comment ses caractéristiques de conception l'incitent à adopter un comportement de récupération d'énergie. Il est maintenant temps de faire la connaissance de la sauterelle : les centres de données IA. La plupart des observations que nous ferons à propos de ces centres de données s'appliquent également aux serveurs traditionnels, qu'ils fournissent des services de messagerie, proposent du streaming ou du commerce en ligne. Cependant, nous avons choisi de nous concentrer sur les centres de données IA en raison de leur croissance rapide. Alors que les datacenters traditionnels, du moins jusqu'en 2022, n'ont connu qu'une expansion modérée grâce à des améliorations de leur efficacité, l'Agence internationale de l'énergie prévoit une multiplication par 10 de la consommation énergétique liée à l'IA d'ici 2026 par rapport à 2023 [11]. C'est cette croissance rapide qui a suscité des inquiétudes parmi les services publics, les régulateurs et dans les médias [12].

Propriétés	Minage de Bitcoin	IA
Sensible aux coûts	N'opère que sur l'électricité la moins chère.	Moins sensible aux coûts de l'électricité.
Dépendance à l'emplacement	La latence n'est pas un problème	La latence peut être un problème,
Dépendance temporelle	Indépendant : la valeur du calcul ne dépend pas de l'heure	La valeur du calcul n'est pas toujours la même et peut dépendre du moment.
Flexibilité opérationnelle	Peut s'allumer/s'éteindre sans affecter le réseau.	Extinction/allumage peu aisés sans logiciel d'orchestration des charges (l'entraînement est plus flexible que l'inférence).
Passage à l'échelle	Rentable d'une machine à des milliers sur un même site.	Les modèles à grande échelle exigent de multiples GPU.

Deux types de calcul sont nécessaires pour soutenir les formes d'intelligence artificielle en pleine croissance. Le terme « entraînement » fait référence au traitement de vastes quantités d'informations pour construire un modèle d'apprentissage automatique. « L'inférence », quant à elle, désigne le type de calcul qui traite une requête d'un utilisateur — par exemple, lorsque quelqu'un tape une question dans ChatGPT ou Midjourney — et produit une réponse ou une image, en utilisant le modèle d'apprentissage automatique. Actuellement, l'entraînement et l'inférence utilisent principalement des GPU, qui ont une densité de puissance extrêmement élevée. Par densité, nous entendons que les centres de données traditionnels ont une densité moyenne de 5 à 10 kilowatts par rack, tandis que les serveurs d'IA nécessitent désormais 60 kilowatts ou plus par rack [13].

Nous avons montré que le minage de Bitcoin est sensible aux coûts, indépendant de l'emplacement, indépendant du temps, flexible et évolutif. Le calcul lié à l'IA diffère, au moins dans une certaine mesure, sur chacun de ces aspects.

Sensibilité aux coûts. Tout d'abord, les marges bénéficiaires pour le calcul lié à l'IA, du moins à l'heure actuelle, sont bien plus élevées que celles du minage de Bitcoin. Alors que les machines de minage les plus récentes ne génèrent que 0,17 à 0,20 \$/kWh de revenus, les GPU de Nvidia génèrent 3 à 5 \$/kWh, soit une différence multipliée par un facteur de 17 à 25 [14]. Ces marges bénéficiaires élevées signifient que, même si une installation d'IA pouvait éteindre ses GPU en période de prix élevés de l'électricité, cela ne serait pas rentable à moins que les prix de l'électricité ne soient extrêmement élevés. Chaque moment où un GPU ne fonctionne pas, il perd des revenus substantiels tout en se dépréciant.

Dépendance à l'emplacement. Des marges bénéficiaires élevées signifient également que le prix de l'électricité n'est pas nécessairement le facteur décisif pour déterminer l'emplacement des installations d'IA. Ces installations sont plutôt confrontées à d'autres contraintes. Par exemple, il peut y avoir des contraintes géopolitiques sur l'endroit où les données sensibles sont stockées. Plus important encore, pour l'inférence, la faible latence est cruciale afin que les requêtes puissent être traitées rapidement. Ainsi, les infrastructures dédiées à l'inférence doivent être situées à proximité des zones densément peuplées qu'elles desservent.

Flexibilité. En principe, les tâches d'entraînement pourraient être flexibles. La charge de calcul pourrait être déplacée dans le temps et dans l'espace pour accéder à l'énergie la moins chère. Il existe d'ailleurs des preuves émergentes que l'IA possède cette capacité, puisque le firmware utilisé par les mineurs de Bitcoin, qui permet d'adapter la consommation d'énergie, a été repris pour soutenir l'IA. Cependant, nous n'avons pas encore trouvé de preuve directe que le calcul lié à l'IA réduit effectivement sa consommation d'énergie. L'inférence, en revanche, est à la demande et dépendante de l'emplacement. Il est difficile d'imaginer comment elle pourrait être hautement flexible, au-delà de la réduction de la consommation d'énergie pour des équipements non liés au calcul, comme le refroidissement.

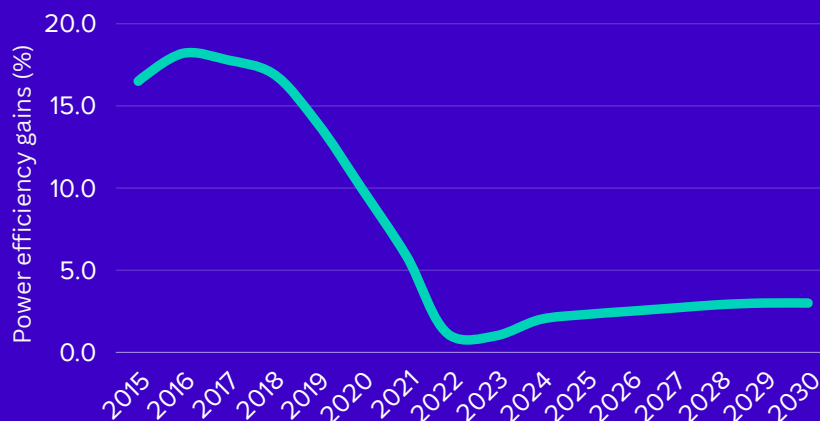
Évolutivité. En principe, certaines formes de calcul liées à l'IA devraient pouvoir être distribuées sur des clusters de calcul plus petits. Pour l'instant, d'après des retours informels de participants du secteur, 10 MW est l'échelle minimale recherchée par les entreprises.

C'est là la nature de la sauterelle : insensible aux coûts, dépendante de l'emplacement, largement inflexible et dépendante de l'échelle.

Dans ce qui suit, nous examinerons les meilleures estimations de la consommation d'énergie pour chacun de ces types de calculs — actuels et futurs — puis nous analyserons la croissance projetée de la production électrique nécessaire pour répondre à cette demande croissante. Enfin, nous évaluerons l'étendue de la flexibilité du minage de Bitcoin et l'impact de cette flexibilité sur les émissions par rapport aux consommateurs inflexibles.

L'efficacité atteint un plateau

Au début du millénaire, il était admis que les gains d'efficacité des centres de données, principalement dus à une meilleure utilisation de l'énergie, suffiraient à répondre à la demande. Cependant, des estimations récentes de Goldman Sachs montrent que ces gains ont cessé autour de 2018, probablement en raison des avancées inattendues de l'IA.



Source: Goldman Sachs, 2024.



Les gains d'efficacité doivent être plus innovants que les améliorations des puces pour compenser l'augmentation de la demande énergétique.



Source: ASICminervalue.com

Ralentissement des gains d'efficacité des puces

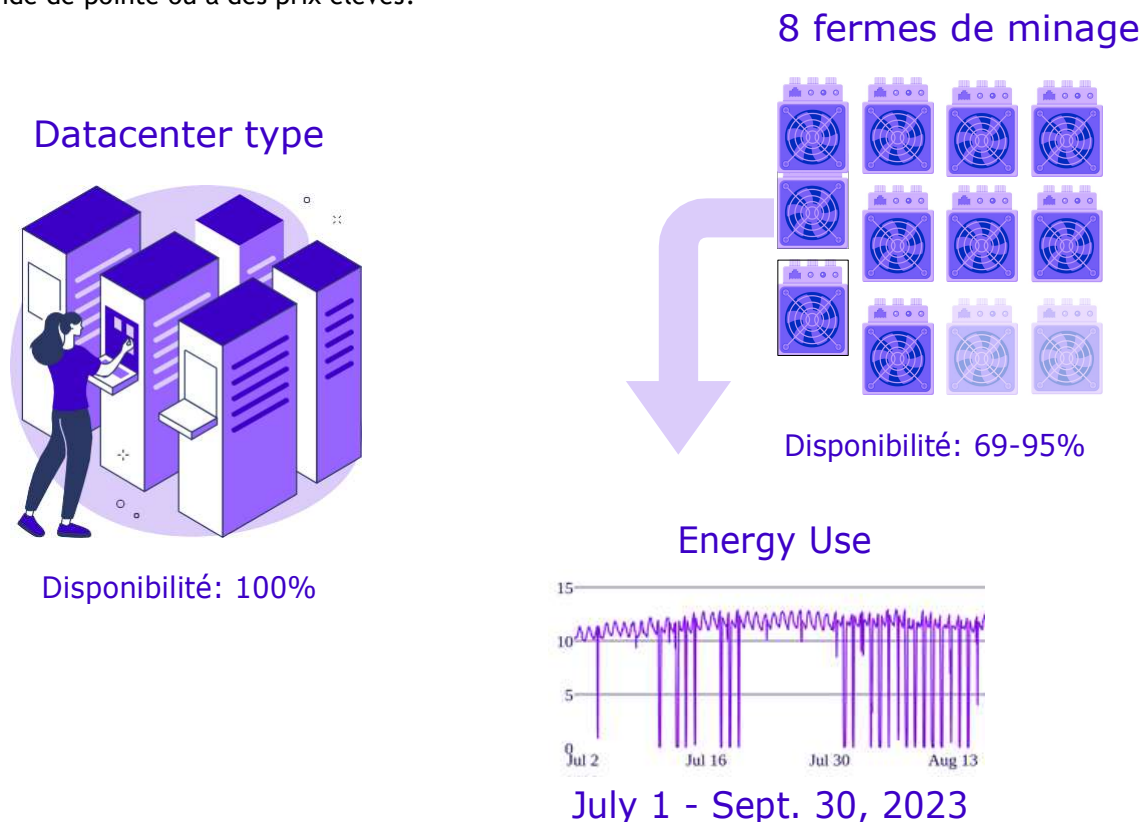
Les tendances en matière d'efficacité des machines ont ralenti au cours des cinq dernières années. Cependant, il reste encore une petite marge d'amélioration à mesure que les machines évoluent vers des puces de 3 nm. Samsung et Block ont tous deux annoncé une puce ASIC de 3 nm pour le minage de Bitcoin. D'autres fabricants introduisent également des puces de 4 nm, alors que la plupart des machines utilisent actuellement des puces de 5 nm. La trajectoire est similaire pour les puces utilisées par l'IA.

Notre étude :

Données et méthode

Pour mieux comprendre comment la flexibilité de la charge des datacenters et du minage de Bitcoin impacte les émissions et la stabilité des réseaux électriques, nous avons collecté des données auprès de 10 entreprises de minage de Bitcoin aux États-Unis et au Canada. Nous savions que les mineurs de Bitcoin avaient, en théorie, la capacité de s'allumer et de s'éteindre rapidement, et qu'il existait des preuves anecdotiques dans les rapports médiatiques. Cependant, jusqu'à présent, très peu de données ont été produites pour démontrer cela de manière définitive.

En utilisant les facteurs d'émission marginaux de dioxyde de carbone de RESurety et WattTime, nous avons calculé la quantité d'émissions de carbone évitées lorsqu'une installation de minage de Bitcoin réduisait sa demande en électricité en réponse à une demande de pointe ou à des prix élevés de l'électricité [23]. Nous avons ensuite comparé cela à notre datacenter type, que nous avons supposé être une charge constante, c'est-à-dire qu'il ne réduit jamais sa consommation en réponse à une demande de pointe ou à des prix élevés.



Notre étude: Analyse

Les mineurs font preuve de flexibilité.

Lors de notre analyse de la flexibilité, sur la période du 1er juillet au 30 septembre 2023, nous avons constaté que les mineurs de Bitcoin éteignaient leurs machines entre 5 et 31 % du temps. Cette grande variabilité est probablement davantage liée au type de contrat d'énergie qu'ils ont, plutôt qu'aux capacités de leurs installations. De manière anecdotique, certains opérateurs de minage de Bitcoin ont déploré qu'ils aimeraient offrir plus de flexibilité de charge, mais que les structures tarifaires de leur région ne le permettent pas.

Les mineurs réduisent leur activité durant les événements météorologiques extrêmes.

Pour explorer le soutien du minage de Bitcoin au réseau pendant les périodes de stress, nous avons sélectionné des données provenant de trois fermes de minage qui ont été impactées par la tempête hivernale du Texas en janvier 2024, laquelle a compromis la stabilité du réseau en raison d'une demande exceptionnellement élevée. Nos résultats montrent que ces fermes de minage ont pu réduire leur consommation, soit sur la base de signaux envoyés par l'opérateur du réseau, soit en réponse directe à des prix élevés dépassant leur seuil de rentabilité. La capacité du minage de Bitcoin à payer pour la production d'électricité lorsque le réseau n'est pas sous pression, tout en réduisant sa consommation pendant les pics de demande, améliore la stabilité globale du réseau.

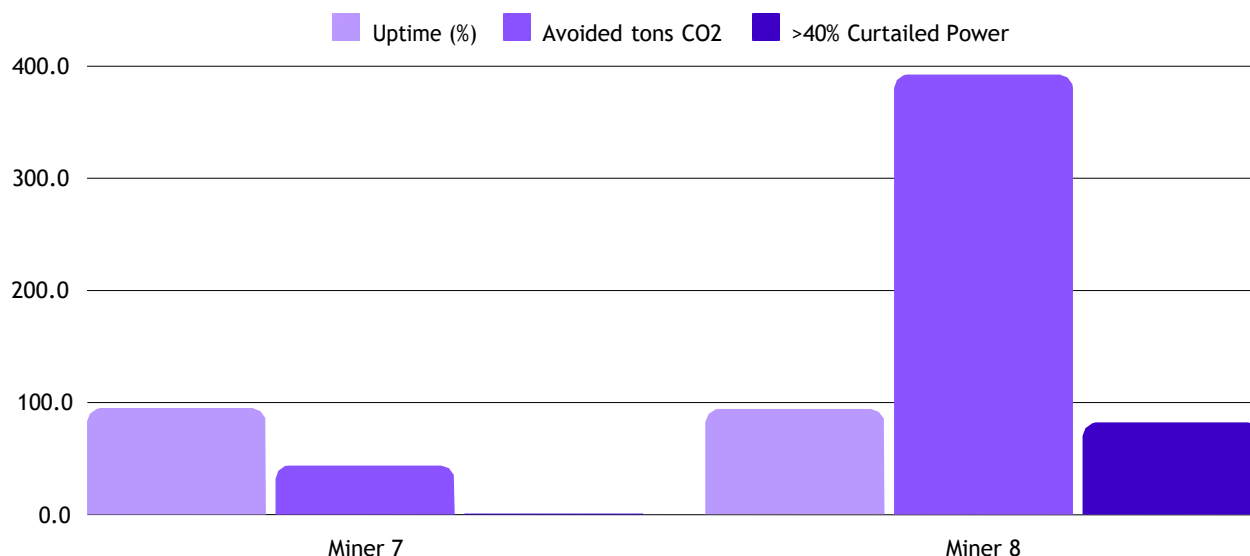
La flexibilité des mineurs permet d'éviter une quantité substantielle d'émissions.

Sur une période de trois mois, les mineurs que nous avons étudiés ont réduit leurs émissions de CO2 de 13,6 kilotonnes. Si les mineurs de notre échantillon sont représentatifs du réseau, l'impact marginal de leur flexibilité équivaut à éviter 4,4 millions de tonnes de CO2 par an, soit l'équivalent de retirer plus de 956 500 voitures de la circulation.

L'ampleur de la flexibilité est importante.

Nous avons également constaté que le degré de réduction de la consommation des mineurs joue un rôle dans le total des émissions évitées, en plus de la fréquence de ces réductions. Par exemple, deux mineurs, désignés comme Mineur 7 et Mineur 8 dans nos figures d'étude, avaient des temps de disponibilité similaires d'environ 94 %. Pourtant, le Mineur 7 n'a évité que 43,8 tonnes d'émissions de carbone, tandis que le Mineur 8 en a évité 392,7 tonnes. Notre étude a révélé que le Mineur 7 avait réduit sa consommation d'électricité de plus de 40 % une seule fois durant notre période de trois mois, alors que le Mineur 8 a atteint ce même niveau de réduction à 82 reprises au total.

La principale conclusion de notre étude est que la flexibilité du côté de la demande est cruciale à la fois pour éviter des émissions supplémentaires et pour maintenir la fiabilité du réseau, notamment face à la hausse rapide de la demande prévue dans les datacenters au cours des prochaines années. Le minage de Bitcoin n'est pas seulement capable d'offrir cette flexibilité, il la met déjà en pratique.



L'avenir de la flexibilité de la consommation

Le minage de Bitcoin a ouvert la voie à l'utilisation du calcul comme d'une charge importante et très flexible. Le minage est poussé à la flexibilité par le protocole Bitcoin lui-même, qui oblige les mineurs à rechercher l'énergie la moins chère au monde et les incite à réduire leur consommation d'électricité dès que celle-ci devient coûteuse. En principe, cette flexibilité devrait également être possible pour d'autres types de tâches de calcul. Bien que nous disposions de peu de preuves à ce jour, les serveurs d'entraînement pour l'IA pourraient, à l'avenir, offrir un type de flexibilité similaire, étant donné qu'ils n'ont pas besoin d'être situés près des grandes villes et que leurs charges de travail peuvent être interrompues ou décalées.

En pratique, tout datacenter pourrait potentiellement offrir des services d'effacement s'ils utilisaient leurs générateurs de secours lorsque les réseaux le leur demandent. Cependant, l'utilisation de générateurs diesel dans ce contexte augmenterait les émissions marginales du réseau dans son ensemble. Les datacenters pourraient également apporter leur propre production d'électricité, en utilisant leurs propres micro-réseaux à faibles émissions de carbone pour soutenir les services publics lors des périodes de forte demande. Bien que cela implique des dépenses en capital plus élevées, les programmes d'effacement paient souvent les participants pour qu'ils réduisent leur consommation ou réinjectent de l'énergie dans le réseau, ce qui pourrait compenser ces coûts supplémentaires et rendre ce modèle rentable. Des entreprises telles que Verrus construisent des datacenters équipés de micro-réseaux alimentés par batteries pour fournir ce type de flexibilité, avec pour objectif de lancer leurs premiers datacenters flexibles d'ici 2026 ou 2027 [24].

Une dernière précision s'impose. Bien que les incitations liées à Bitcoin poussent au final vers l'utilisation de l'énergie la moins chère, pendant les périodes de volatilité des prix à la hausse, il peut être rentable de miner Bitcoin avec une énergie très coûteuse. Ces périodes sont de courte durée, car, comme mentionné plus haut, les profits du minage incitent à produire et déployer davantage de machines de minage, ce qui, à son tour, réduit les marges de tous les mineurs, jusqu'à ce que, de nouveau, seuls ceux qui utilisent l'énergie la moins chère puissent survivre. Toutefois, de telles périodes se produisent, comme lorsque la Chine a interdit le minage de Bitcoin pendant une phase de hausse du prix et qu'une pandémie mondiale a perturbé les chaînes d'approvisionnement. Pendant cette période, il était rentable de miner Bitcoin avec une énergie coûteuse. Ainsi, bien que le minage de Bitcoin ait la capacité d'être flexible, il ne se comporte pas toujours de manière flexible. Ce comportement inflexible pourrait réapparaître dans des conditions similaires.

Utilisation de l'énergie : Bitcoin et Datacenters

Utilisation actuelle de l'énergie

Dans ce rapport, nous nous appuyons sur les résultats préliminaires du prochain rapport du Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) pour estimer la croissance actuelle et future des datacenters et des serveurs d'IA aux États-Unis. Le groupe produisant ce rapport s'appuie sur des données de l'industrie pour alimenter leurs modèles. Leur estimation pour 2024 suggère que les datacenters aux États-Unis consommeront 375 TWh, tandis que les serveurs d'IA représenteront environ 47 % de ce total. Ils prévoient une croissance similaire de l'industrie de l'IA jusqu'en 2027 [15].

Selon le Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI), au 6 juillet 2024, la consommation énergétique du minage de Bitcoin aux États-Unis est estimée à 139,81 TWh [16]. Ce chiffre fluctue en fonction de la quantité d'énergie consommée quotidiennement. Comme nous ne disposons pas d'estimations quotidiennes ou même mensuelles pour les datacenters, nous ne pouvons comparer les chiffres que d'une année à l'autre. L'année dernière, les fermes de minage de Bitcoin aux États-Unis ont consommé environ 121,13 TWh, tandis que les datacenters américains ont utilisé entre 100 et 325 TWh, et les serveurs d'IA aux États-Unis étaient estimés entre 20 et 125 TWh [17].

Il peut sembler surprenant que la consommation énergétique du minage de Bitcoin soit probablement bien inférieure à celle des datacenters. Nous pensons que cette perception erronée est due à la croissance rapide et inattendue du minage de Bitcoin en 2021, après l'interdiction du minage en Chine. À son apogée, on estimait que le minage de Bitcoin en Chine représentait environ 72,98 % des installations de minage du réseau mondial [18]. Les mineurs ont rapidement cherché de nouveaux emplacements pour brancher leurs machines, parfois de manière imprudente, rétrospectivement. Les données du CBECI montrent une augmentation estimée de 375,5 % du minage de Bitcoin basé aux États-Unis entre 2020 et 2021 [19]. De même, la récente augmentation soudaine de la demande pour l'IA générative pourrait entraîner une attention excessive dans les médias quant aux risques liés à la consommation énergétique de l'IA, comme cela a été le cas avec Bitcoin.

Projection de la consommation d'énergie future

Estimer la consommation d'énergie est une tâche difficile. Prévoir la consommation énergétique future l'est encore plus. L'informatique est soumise à des percées technologiques imprévisibles qui peuvent modifier radicalement la trajectoire des tendances de consommation d'énergie d'une année à l'autre. Le minage de Bitcoin ne fait pas exception, d'autant plus lorsque l'on prend en compte le facteur supplémentaire de volatilité d'une cryptomonnaie. Malheureusement, nous ne disposons pas d'estimations robustes pour l'utilisation énergétique future issues d'études récentes de l'industrie ou du monde académique. Ainsi, dans le but d'avoir une approximation éclairée pour nos comparaisons, nous avons décidé d'inclure une estimation pour le minage de Bitcoin dans nos chiffres. Cependant, ces estimations doivent être considérées comme une indication de ce qui pourrait être, et non comme une réalité stricte, car il s'agit d'une estimation extrêmement simplifiée de la croissance du réseau. De nombreux autres facteurs pourraient influencer la projection de consommation énergétique.

En utilisant nos projections pour le minage de Bitcoin, ainsi que celles du LBNL et de Goldman Sachs pour les datacenters, nous prévoyons que la croissance des datacenters dépassera probablement celle du minage de Bitcoin. Notre estimation indicative place la consommation énergétique du minage de Bitcoin à environ 160 TWh en 2027, tandis que le LBNL estime que les serveurs d'IA consommeront environ 240 TWh et que l'industrie des datacenters dans son ensemble (hors minage de cryptomonnaies) atteindra environ 540 TWh [20]. Goldman Sachs, pour sa part, propose des estimations légèrement plus modestes pour 2027, avec environ 70 TWh pour les serveurs d'IA et environ 280 TWh pour les datacenters (hors minage de cryptomonnaies) [21]. Dans l'ensemble (voir Annexe 1), les rapports de l'industrie projettent des augmentations comprises entre 48 % et 186 % pour la consommation énergétique future des datacenters, principalement attribuées à la croissance de l'IA et des applications d'IA générative.

L'IA a récemment atteint une certaine maturité technologique avec l'IA générative, ce qui entraînera probablement une augmentation de la demande jusqu'à ce que l'adoption de cette nouvelle technologie se stabilise. En conséquence, nous pensons qu'une augmentation accélérée de la demande en électricité, dépassant celle du minage de Bitcoin, est raisonnable, du moins aux États-Unis. L'afflux actuel de capitaux dans le marché de l'IA signifie que le minage de Bitcoin aura du mal à rivaliser avec des concurrents capables de payer plus cher pour la même électricité. Cependant, cette tendance pourrait ne pas durer éternellement, selon les dynamiques du marché de l'IA. Malgré tout, la consommation énergétique est restée relativement stable avant le halving d'avril 2024, et, selon Luxor's Hashrate Index, en raison de la concurrence accrue, les revenus du minage de Bitcoin par unité de calcul sont proches de leur plus bas niveau depuis 2017 [22].

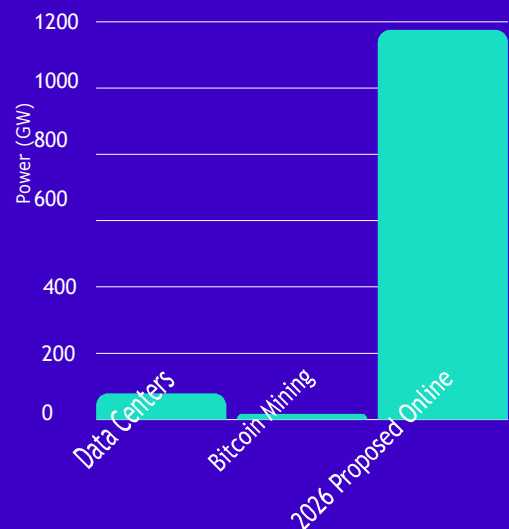
Compte tenu de ces projections, la consommation d'énergie du minage de Bitcoin et de l'IA continuera de faire les gros titres. Nous pensons cependant que les décideurs politiques et autres parties prenantes devraient prêter davantage attention à la manière dont ces nouveaux consommateurs utilisent l'énergie plutôt qu'à la quantité absolue d'énergie qu'ils consomment. Dans la section suivante, nous expliquons pourquoi, en présentant nos recherches sur le degré de flexibilité réelle des mineurs de Bitcoin et en analysant l'impact de cette flexibilité sur les émissions.

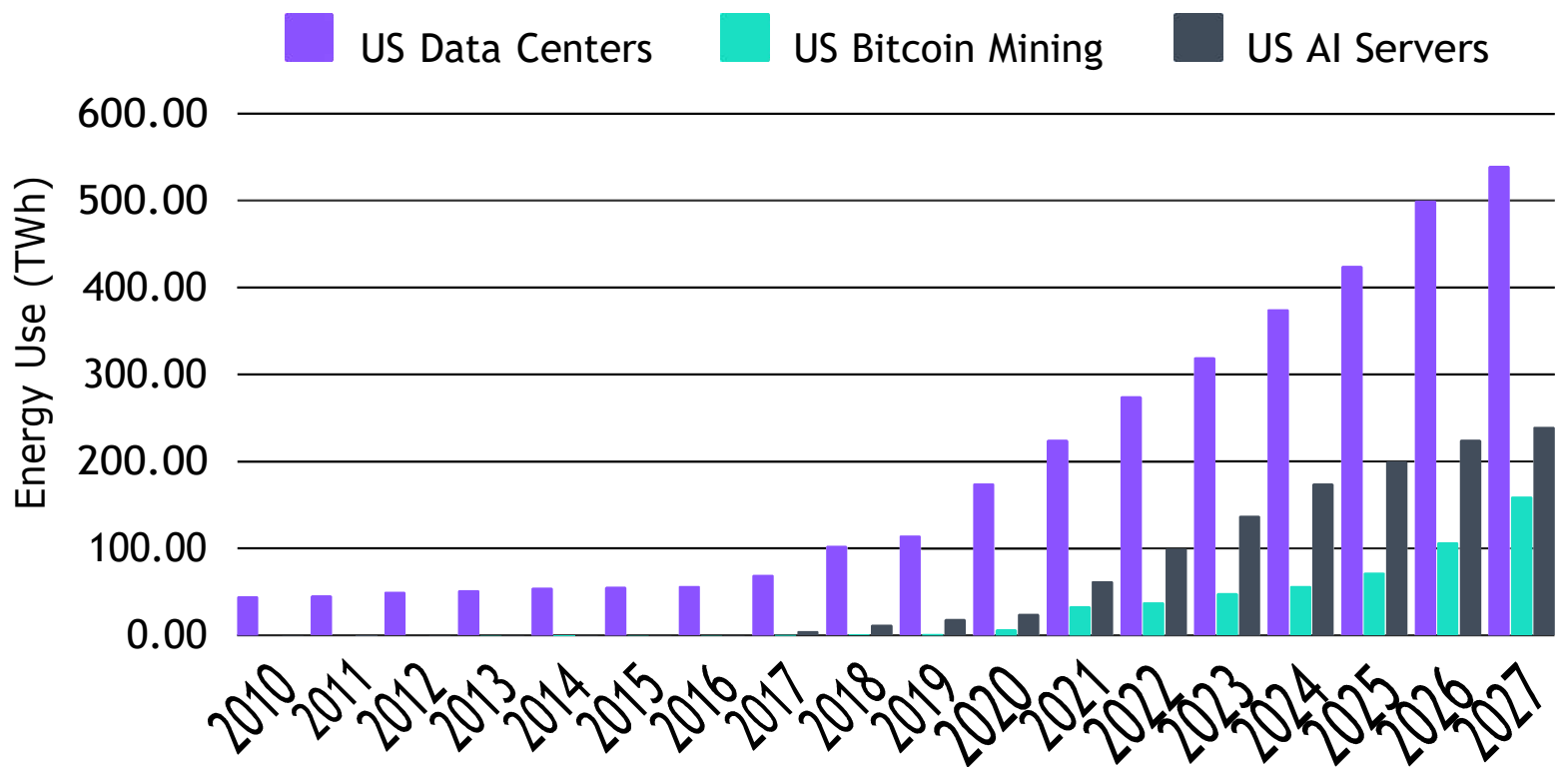
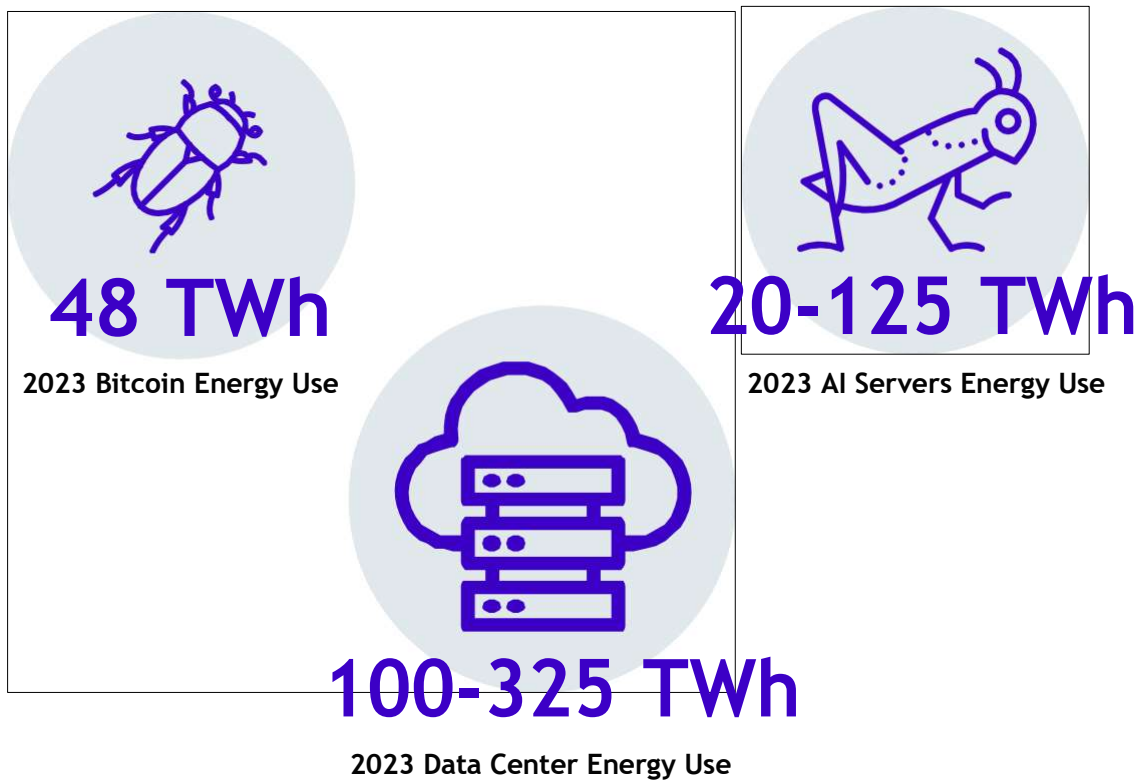
Les files d'attente pour l'interconnexion peuvent répondre à la demande croissante.

Les datacenters et le minage représentent 6.3% de la nouvelle capacité de production opérationnelle proposée .

L'estimation haute pour les centres de données (y compris l'IA) est d'environ 80 GW d'ici 2027, tandis que notre estimation pour le minage de Bitcoin suggère 18 GW d'ici 2027.

Combinés, cela représente 6,3 % de la capacité totale de production avec une date opérationnelle prévue d'ici la fin 2026. En effet, le rapport de Berkeley Lab montre que la croissance des projections de production suit une tendance exponentielle remarquablement similaire à celle de la demande des datacenters.





Based on data from CBECI, Lawrence Berkeley Lab, Goldman Sachs, Minerasicvalues.com, and Coinshares hashrate projections.

Une élaboration de politiques solides pour une industrie en pleine évolution et en constante réinvention est un défi. Ci-dessous, nous proposons quelques suggestions pour aider les parties prenantes à prendre de meilleures décisions, en favorisant la fiabilité du réseau, en réduisant les émissions et en encourageant l'innovation.

Mettre en place des structures tarifaires qui incitent à la flexibilité.

Nous recommandons aux décideurs locaux et aux opérateurs de réseau, qui ont le contrôle des structures tarifaires, de ne pas supposer que les datacenters, et en particulier le minage de Bitcoin, sont des charges fixes. Comme nous l'avons démontré, le minage de Bitcoin est une charge hautement flexible. Avec une structure adaptée, les mineurs de Bitcoin peuvent optimiser leur flexibilité pour aider les opérateurs de réseau à éviter les blackouts et à réduire les émissions qui auraient été produites s'ils avaient maintenu des temps de fonctionnement constants. Ainsi, nous recommandons de veiller à ce que tous les types de datacenters qui offrent une flexibilité de la demande coordonnent leurs actions avec les opérateurs de réseau pour faciliter les prévisions.

Réformer les règles de transmission et réduire les délais d'attente des files d'interconnexion.

Même avec les prévisions de croissance les plus élevées pour les datacenters, il y a largement assez de capacité de production d'énergie en attente dans les files d'interconnexion (nouveaux projets de production d'énergie en attente de connexion au réseau). Seuls 6,3 % de l'énergie promise devront être connectés d'ici 2027 pour répondre à la demande à venir [25]. La plupart des capacités actives dans les files d'attente d'interconnexion ont des dates de mise en ligne proposées entre 2025 et 2028, juste à temps pour correspondre à la construction accrue des datacenters. Le plus grand défi est de s'assurer que ces projets de production d'énergie soient menés à bien jusqu'à leur achèvement.

L'étude du Berkeley Lab a montré que les projets de développement de l'énergie approchent une durée médiane de 5 ans entre la demande d'interconnexion et le début des opérations commerciales pour les projets achevés en 2022-2023. Le soutien aux réformes visant à réduire les délais d'attente, comme celles énoncées dans l'ordonnance 2023 récente de la Federal Energy Regulatory Commission (FERC), ainsi que les solutions proposées par l'Interconnection Innovation eXchange (i2X) du Department of Energy (DOE), est nécessaire pour améliorer les retards d'interconnexion [26]. Ces réformes garantissent que la capacité disponible puisse être mise en ligne à temps pour répondre aux projections de nouvelles demandes. Nous incitons également les parties prenantes au niveau des États à veiller à la mise en œuvre des changements de règles au niveau fédéral.

Encourager l'intégration de la puissance de calcul et de la production d'énergie.

Un nombre croissant d'entreprises de minage de Bitcoin intègrent l'IA et le calcul haute performance dans leurs installations. De même, Microsoft, Meta, Google et Amazon sont les premières entreprises de data à devenir également des entreprises énergétiques, en investissant dans de nouveaux projets de production d'énergie. Les datacenters continueront à croître en taille : des centres de 1 GW seront monnaie courante [27]. Pour pouvoir fournir suffisamment d'énergie à ces sites, il sera probablement nécessaire de commander de nouvelles capacités de production d'électricité. Ou, pour des charges pouvant offrir une grande flexibilité, nous verrons davantage de compagnies d'énergie renouvelable consacrer un pourcentage de leur production à ces centres de calcul pour augmenter leurs revenus de base. Les décideurs politiques devraient encourager ces initiatives, car elles accéléreront en fin de compte le développement des énergies propres.

Faire preuve de prudence avec les estimations énergétiques.

Nous recommandons d'adopter un principe de précaution lorsqu'il s'agit de réglementer sur la base de données limitées ou d'études mal développées. Comme nous l'avons montré dans notre rapport, estimer la consommation d'énergie est une tâche difficile, mais prévoir sur plusieurs années est une tâche encore plus ardue. Les prédictions extrêmes de croissance se sont souvent révélées erronées, et les législateurs devraient les considérer comme très provisoires [28].

Appendice A

Méthodologie des estimations énergétiques

Les meilleures estimations de la consommation d'énergie sont basées sur une approche « bottom up », qui nous informe sur le nombre de machines ou de serveurs utilisés, les tendances en matière d'efficacité de ces appareils, ainsi que sur le refroidissement des installations qui les abritent. Cependant, la collecte de ces données prend du temps, c'est pourquoi la plupart des estimations reposent sur des hypothèses simplistes « top down » et des tendances historiques, qui induisent souvent le public en erreur.

Nous avons examiné plusieurs estimations de la consommation énergétique des datacenters remontant à 2008. Nous avons constaté que les données étaient rares, avec des lacunes sur plusieurs années entre les estimations fournies. Par exemple, pour les meilleures estimations, nous ne disposons de données que pour 2000, 2005, 2010, 2015 et 2018. Les méthodes utilisées pour d'autres estimations moins fiables ont souvent exagéré la consommation énergétique. En 2024, les défis liés à l'estimation de la consommation d'énergie demeurent. Nous avons consulté plusieurs rapports de l'industrie et articles académiques publiés entre 2023 et aujourd'hui et avons constaté des problèmes similaires à ceux discutés dans Mytton et al. (2022) [29].

Pour le minage de Bitcoin, nous nous appuyons sur une estimation continue remontant au début du réseau, fournie par le Cambridge Bitcoin Energy Consumption Index (CBECI) [30]. Leur modèle présente des limitations – qu'ils documentent eux-mêmes de manière approfondie – mais il reste l'estimation la plus fiable à ce jour. Le CBECI est en mesure de produire des estimations continues car le protocole de Bitcoin fournit un indicateur indirect, appelé hashrate, qui représente la puissance de calcul totale du réseau de minage de Bitcoin. Le hashrate peut être déduit de la fréquence des blocs et de la difficulté de miner un bloc unique. Associé à l'efficacité énergétique des machines et des installations, il permet ensuite d'estimer la consommation d'énergie à des échelles temporelles fines. Nous soupçonnons que le minage de Bitcoin a reçu une attention disproportionnée dans les médias américains, en partie à cause de cette transparence. Il n'existe pas de mesure publique comparable de la puissance de calcul active dans les datacenters.

Pour notre estimation, nous nous sommes appuyés sur l'estimation de Coinshares concernant la croissance future du hashrate, qu'ils ont calculée à l'aide d'une courbe de puissance, en supposant une forte appréciation du prix du bitcoin [31]. Nous avons ensuite supposé que, pour les trois prochaines années, l'efficacité du réseau se rapprochera d'un mélange pondéré de 80-20 de machines actuellement rentables à \$0,05/kWh, tout en tenant compte de gains d'efficacité linéaires chaque année.

Pour les estimations futures de la consommation d'énergie, nous nous sommes appuyés sur les résultats préliminaires du LBNL issus de leur prochain rapport 2024 au Congrès sur la consommation énergétique des datacenters aux États-Unis, présentés lors du Data Center World 2024 [32]. Nous avons également comparé ces estimations à celles de Goldman Sachs [33]. Nous avons choisi ces estimations car elles reposent toutes deux sur des estimations précédentes « bottom up » comme base, et incluent des estimations annuelles continues sur plusieurs années.

Nous avons également comparé les estimations de croissance de l'IA provenant du LBNL, de Goldman Sachs, de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), de Schneider Electric, de Semianalysis, du Boston Consulting Group, de Morgan Stanley, de McKinsey et de Newmark Consultancy Group [34]. Bien que chaque rapport utilise des méthodes différentes pour estimer leurs projections de croissance, tous ces rapports ont en commun une forte augmentation de la demande entre 2023 et 2030.

Appendice B

Répondre à la demande

La nouvelle production d'électricité sera probablement diversifiée

L'IA et le minage de Bitcoin ne sont pas les seules sources croissantes de demande. Les véhicules électriques continuent d'ajouter de la charge à nos réseaux, tout comme les nouvelles installations industrielles et la production d'hydrogène vert. Dans l'ouest du Texas, qui abrite la plus forte concentration de minage de Bitcoin aux États-Unis, les datacenters représenteront 45 % de la croissance de la demande, le minage de Bitcoin 20 %, et le reste de la demande proviendra des projets d'hydrogène vert [35]. Alors, comment les réseaux réagiront-ils ?

Goldman Sachs estime que 60 % de la nouvelle demande des datacenters sera satisfaite par le gaz naturel et 40 % par les énergies renouvelables. Plusieurs compagnies d'électricité prévoient également des investissements majeurs dans le gaz naturel. Le rapport 2024 sur les files d'attente d'interconnexion du Lawrence Berkeley Lab montre 79 GW de gaz naturel dans les files d'attente, contre environ 1 480 TW de solaire, d'éolien et de stockage. Les retards de connexion signifient qu'un plus petit pourcentage de ces projets sera mis en ligne, mais, en se basant sur la capacité de production dans les files d'attente, il y a largement assez de potentiel en production bas carbone, stockage et gaz naturel pour répondre à l'augmentation de la demande provenant de l'IA et du minage de Bitcoin.

Flexibilité et planification du réseau

Les compagnies d'électricité modélisent la nouvelle demande comme une charge qui utilisera de l'énergie 24 heures sur 24, ce qui nécessitera l'utilisation du gaz naturel pour alimenter le réseau. Pendant les heures de pointe, des centrales à gaz de pointe devront être activées pour répondre à cette nouvelle demande. Cependant, cela peut être évité si les datacenters, à l'instar des mineurs de Bitcoin, peuvent fonctionner de manière flexible. Comme mentionné plus haut, le minage de Bitcoin a la capacité de s'allumer et de s'éteindre en quelques secondes, ce qui lui permet de participer à des programmes d'effacement et, en fonction de leur contrat d'énergie, de s'éteindre en fonction du prix de l'électricité.

Les datacenters traditionnels montrent des signes de développement de la flexibilité. Au cours de l'année dernière, nous avons observé des entreprises comme Google offrant des services d'effacement en utilisant des technologies propriétaires qui déplacent les charges de travail géographiquement et dans le temps. Cependant, cela reste une exception et non une norme dans l'industrie. Les centres de données de niveau IV (Tier IV) sont censés offrir une fiabilité de 99,995 %, ce qui signifie que les interruptions de courant ne doivent pas dépasser 26,3 minutes par an.

Pour garantir ce temps de disponibilité, la plupart des datacenters conservent des générateurs diesel comme systèmes de secours. Les datacenters n'ont pas encore les mêmes capacités de flexibilité que le minage de Bitcoin, mais cela devrait évoluer au cours des prochaines années, à mesure que de plus en plus de centres de données construisent des micro-réseaux pouvant être utilisés comme centrales électriques virtuelles pour réinjecter de l'énergie dans le réseau en période de forte demande.

Endnotes

1. "Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI)," <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci>; G., Papaefthymiou and Ken Dragoon, "Towards 100% Renewable Energy Systems: Uncapping Power System Flexibility," *Energy Policy* 92 (May 2016): 69–82, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.025>; T. Renugadevi et al., "Carbon-Efficient Virtual Machine Placement Based on Dynamic Voltage Frequency Scaling in Geo-Distributed Cloud Data Centers," *Applied Sciences* 10, no. 8 (April 14, 2020): 2701, <https://doi.org/10.3390/app10082701>.
2. Rayan El Helou, Ali Menati, and Le Xie, "Physical and Economic Viability of Cryptocurrency Mining for Provision of Frequency Regulation: A Real-World Texas Case Study" (arXiv, March 16, 2023), <http://arxiv.org/abs/2303.09081>; Joshua D Rhodes, Thomas Deetjen, and Caitlin Smith, "Impacts of Large, Flexible Data Center Operations on the Future of ERCOT," 2021. https://lancium.com/wp-content/uploads/2022/06/Lancium_Flexible_Data_Center_Whitepaper_4.2022.pdf
3. John Dorrell, Abhilash Kancharla, and Matthew Ambrosia, "'Green Crypto Mining: A Quantitative Analysis of the Profitability of Bitcoin Mining Using Excess Wind Energy,'" *The Journal of Energy and Development*, Vol. 48, No. 1, Pp. 1–22, January 25, 2024, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25055597.v4>.
4. Gridless, "Energy & Bitcoin in Africa: Weaving a More Distributed, Resilient Global Energy Tapestry in Africa and Beyond," 2023, <https://gridlesscompute.com/2023/05/17/a-blueprint-for-bitcoin-mining-and-energy-in-africa/>.
5. "Marathon Digital Holdings Enters into Agreement with the Ministry of Energy and Petroleum of the Republic of Kenya To Enhance Kenya's Energy Sector," MARA, May 24, 2024, <https://ir.mara.com/news-events/press-releases/detail/1358/marathon-digital-holdings-enters-into-agreement-with-the>.
6. Mackenzie Sigalos and Jordan Smith, "Texas Paid Bitcoin Miner Riot \$31.7 Million to Shut down during Heat Wave in August," *CNBC*, September 6, 2023, <https://www.cnn.com/2023/09/06/texas-paid-bitcoin-miner-riot-31point7-million-to-shut-down-in-august.html>.
7. "Marathon Digital Holdings Announces Energization of Its First Bitcoin Mining Pilot Project Powered by Renewable, Off-Grid Energy from a Landfill," MARA, November 2, 2023, <https://ir.mara.com/news-events/press-releases/detail/1330/marathon-digital-holdings-announces-energization-of-its>; Crusoe Energy, "Impact Report," 2023, https://crusoe.ai/pdfs/Crusoe_ESG+Report_2024.06.06.pdf.
8. Nik Hoffman, "Marathon Uses Bitcoin Mining To Heat Town of 11,000 in Finland," *Bitcoin Magazine*, June 20, 2024, <https://bitcoinmagazine.com/business/marathon-uses-bitcoin-mining-to-heat-town-of-11000-in-finland>
9. Luis Ferre-Sadurni and Grace Ashford, "New York Enacts 2-Year Ban on Some Crypto-Mining Operations" *The New York Times*, Nov 2, 2022.
10. "AEP Ohio Proposes Data Center, Crypto Financial Requirements amid 30 GW in Service Inquiries," *Utility Dive*, accessed May 19, 2024, <https://www.utilitydive.com/news/aep-ohio-data-center-crypto-rates-puc/716150/>.
11. International Energy Association, "Electricity 2024 - Analysis and Forecast to 2026," 2024.
12. Kearney, Laila, Dareen, Seher, and Kaushik Vakil, Deep, "US Electric Utilities Brace for Surge in Power Demand from Data Centers," Reuters, April 10, 2024, <https://www.reuters.com/business/energy/us-electric-utilities-brace-surge-power-demand-data-centers-2024-04-10/>.
13. "Data Center Cooling: The Unexpected Challenge to AI," Spectra, accessed July 20, 2024, <https://spectra.mhi.com/insights/data-center-cooling-the-unexpected-challenge-to-ai>.
14. Nick Hansen, "How Does the World Look with 1ZH of Mining Power?" Global Digital Mining Summit, June 17, 2024.
15. Arman Shehabi and Sarah Smith, "Report to Congress on U.S. Data Center Energy Use" (Data Center World Conference, Washington, D.C., 2024).
16. "Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI)," <https://ccaf.io/cbeci/index>.
17. "Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI)"; Arman Shehabi and Sarah Smith, "Report to Congress on U.S. Data Center Energy Use"; Goldman Sachs, "Generational Growth: AI, Data Centers and the Coming US Power Demand Surge," April 2024.
18. CDAP, "Mining Map - Cambridge Blockchain Network Sustainability Index," accessed July 21, 2024, https://ccaf.io/cbnsi/cbeci/mining_map.
19. CDAP; Alun John, Samuel Shen, and Tom Wilson, "Bitcoin Miner Core Scientific Converts Data Center Infrastructure for AI," Reuters, May 9, 2024, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-05-08/bitcoin-miner-core-converts-data-center-infrastructure-for-ai>.
20. Arman Shehabi and Sarah Smith, "Report to Congress on U.S. Data Center Energy Use."
21. Goldman Sachs, "Generational Growth: AI, Data Centers and the Coming US Power Demand Surge."
22. Luxor, "Bitcoin Hashprice Index," accessed July 21, 2024, <https://data.hashrateindex.com>.
23. Meredith Fowlie, Duncan Callaway, and Gavin McCormick, "Location, Location, Location: The Variable Value of Renewable Energy and Demand-Side Efficiency Resources," *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 5, August 4, 2017, <https://doi.org/10.1086/694179>; David Luke Oates and Kathleen Spees, "Locational Marginal Emissions: A Force Multiplier for the Carbon Impact of Clean Energy Programs," n.d.
24. Ingrid Lunden, "Alphabet Spin-off SIP Launches Verrus, a Data Center Concept Built around Battery 'Microgrids,'" TechCrunch, March 11, 2024, <https://techcrunch.com/2024/03/11/sip-verrus-data-center/>.
25. Arman Shehabi and Sarah Smith, "Report to Congress on U.S. Data Center Energy Use."
26. Joseph Rand et al., "Queued Up: 2024 Edition Characteristics of Power Plants Seeking Transmission Interconnection As of the End of 2023" (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2024), https://emp.lbl.gov/sites/default/files/2024-04/Queued%20Up%202024%20Edition_1.pdf.
27. Rich Miller, "The Gigawatt Data Center Campus Is Coming," *Data Center Frontier*, April 29, 2024, <https://www.datacenterfrontier.com/hyperscale/article/55021675/the-gigawatt-data-center-campus-is-coming>.
28. Sai, A. R. and Vranken, H., "Promoting Rigor in Blockchain Energy and Environmental Footprint Research: A Systematic Literature Review," *Blockchain: Research and Applications*, 100169, October 24, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.bcr.2023.100169>; David Mytton and Masao Ashtine, "Sources of Data Center Energy Estimates: A Comprehensive Review," *Joule* 6, no. 9 (September 2022): 2032–56, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.07.011>; Anthony Cuthbertson, "Bitcoin's Meteoric Rise Is Very Bad News for the Environment," *Newsweek*, December 11, 2017, <https://www.newsweek.com/bitcoin-mining-track-consume-worlds-energy-2020-744036>.
29. Mytton and Ashtine, "Sources of Data Center Energy Estimates."
30. "Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI)."
31. Ryan James, "Bitcoin Post-Halving: Miners Could Move to AI, CoinShares Report," BeInCrypto, April 22, 2024, <https://beincrypto.com/bitcoin-post-halving-miners-move-to-ai/>.
32. Arman Shehabi and Sarah Smith, "Report to Congress on U.S. Data Center Energy Use."
33. Goldman Sachs, "Generational Growth: AI, Data Centers and the Coming US Power Demand Surge."
34. Dylan Patel, "AI Datacenter Energy Dilemma - Race for AI Datacenter Space," accessed May 15, 2024, <https://www.semianalysis.com/p/ai-datacenter-energy-dilemma-race>; International Energy Association, "Electricity 2024 - Analysis and Forecast to 2026"; Victor Avelar and Patrick Donovan, "The AI Disruption: Challenges and Guidance for Data Center Design," 2024; "America Is Running Out of Power, Are Data Centers to Blame?," *Data Center Knowledge*, March 7, 2024, <https://syndication.washingtonpost.com/nss/stories/KT72KBNISBGHLGNN24L5Z5J7GU>; John D Wilson and Zach Zimmerman, "The Era of Flat Power Demand Is Over," *Washington Post*, 2023; Vivian Lee, "The Impact of GenAI on Electricity: How GenAI Is Fueling the Data Center Boom in the U.S.," accessed July 21, 2024, <https://www.linkedin.com/pulse/impact-genai-electricity-how-fueling-data-center-boom-vivian-lee/?trackingId=T5jn8dQ%2FRKKNFY06iK5uow%3D%3D>.
35. ERCOT, "2024 RTP Update," May 2024, https://www.ercot.com/files/docs/2024/05/14/2024_RTP_Update_May_2024_RPG.pdf.

À propos des auteurs et du BPI

Le Bitcoin Policy Institute est un think tank non partisan et à but non lucrative qui étudie les impacts de Bitcoin et d'autres réseaux monétaires émergents. Créé sous les statuts 501(c)3, le BPI fournit des ressources éducatives aux décideurs politiques et soutient plus d'une douzaine de chercheurs associés à travers le pays pour mener des recherches académiques originales sur les questions de politique en matière de cryptomonnaie et de technologie.



Margot Paez
Fellow

Margot Paez est doctorante au Georgia Institute of Technology. Elle est lauréate de la bourse du BPI en études supérieures Bitcoin et énergie, et récipiendaire d'une subvention du Bitcoin Development Fund de la Human Rights Foundation, qui soutient la recherche sur le développement énergétique durable via le minage de Bitcoin dans les pays du Sud. Elle est la première chercheuse à avoir réussi à collecter des données auprès de l'industrie du minage de Bitcoin et à les présenter aux décideurs politiques à Washington D.C.



Troy Cross
Fellow

Troy Cross est professeur de philosophie et sciences humaines au Reed College, où il enseigne des cours sur la philosophie de la religion, de la couleur et de l'esprit, ainsi que dans le programme des sciences humaines. Avant de rejoindre Reed en 2010, il a occupé des postes à Yale et au Merton College d'Oxford. Les intérêts de recherche philosophique de Cross se concentrent sur les questions fondamentales en métaphysique et épistémologie, mais il s'intéresse également à Bitcoin depuis 2011, développant un intérêt notamment l'impact environnemental actuel et futur du minage de Bitcoin.



www.btcpolicy.org



[@btcpolicyorg](https://twitter.com/btcpolicyorg)