

L'économie circulaire du minage de Bitcoin : une analyse complète de la gestion du cycle de vie des ASIC et de la récupération des ressources

Introduction : La convergence de la sécurité cryptographique et de la durabilité matérielle

L'infrastructure mondiale qui sécurise le réseau Bitcoin représente l'un des systèmes informatiques distribués les plus spécialisés, énergivores et gourmands en ressources de l'histoire. Début 2026, la puissance de calcul cumulée du réseau avait atteint des niveaux sans précédent, fonctionnant largement dans la zone des zettahash et nécessitant une consommation électrique constante de l'ordre du gigawatt.¹ Cependant, la conception économique du mécanisme de consensus Proof-of-Work (PoW) engendre intrinsèquement une course effrénée et continue aux armements matériels. Les mineurs à l'échelle industrielle rivalisent pour obtenir les récompenses algorithmiques liées aux blocs en utilisant des circuits intégrés spécifiques à une application (ASIC) : des puces de silicium hautement spécialisées, conçues pour effectuer le hachage cryptographique SHA-256 avec une efficacité maximale.³ Ces appareils étant câblés au niveau du silicium et ne possédant aucune utilité de calcul secondaire en dehors du minage de Bitcoin, ils deviennent économiquement obsolètes bien avant de subir une dégradation physique ou une panne mécanique catastrophique.³

Historiquement, la durée de vie rentable d'une plateforme de minage ASIC variait entre 1,5 et 3 ans seulement.⁶ Ce cycle d'obsolescence rapide était dicté par le rythme implacable de la loi de Moore, ainsi que par la réduction algorithmique périodique de moitié des récompenses de bloc Bitcoin, ce qui a considérablement modifié les indicateurs de rentabilité de base.² Ce renouvellement rapide a historiquement engendré une quantité considérable et très localisée de déchets électroniques. Des estimations empiriques antérieures suggéraient que le réseau Bitcoin générait chaque année des dizaines de milliers de tonnes de déchets électroniques hautement spécialisés, certains modèles indiquant jusqu'à 10 948 tonnes de déchets par an pour la seule génération Antminer S9.⁷ Le matériel minier mis hors service, s'il est mal géré, contribue de manière significative à l'escalade de la crise mondiale des déchets électroniques – une crise qui a vu plus de 62 millions de tonnes de déchets électroniques divers produits dans le monde ces dernières années, dont seule une fraction a été officiellement documentée comme étant recyclée en toute sécurité.⁹ Sans une gestion rigoureuse du cycle de vie, l'élimination linéaire des ASIC libère des matières dangereuses dans l'environnement tout en

gaspillant des métaux critiques et précieux hautement raffinés.¹⁰

La conceptualisation et la mise en œuvre d'une économie circulaire pour le minage de Bitcoin visent à découpler complètement l'expansion informatique du secteur de l'extraction de ressources vierges et de la production linéaire de déchets.¹¹ Un système en boucle fermée au sein de ce secteur industriel très spécifique exige un changement de paradigme fondamental reposant sur de multiples piliers opérationnels interconnectés. Il s'agit notamment de l'écoconception physique du matériel permettant des mises à niveau modulaires des composants ; du déploiement de techniques logicielles d'extension de la durée de vie ; de la symbiose industrielle d'unités minières actives pour capter et valoriser les déchets thermiques de faible qualité ; de la mise en œuvre de réglementations strictes en matière de responsabilité élargie des producteurs (REP) à l'échelle mondiale ; et enfin, du déploiement de techniques avancées de récupération des matériaux à faibles émissions, telles que la lixiviation biologique (biohydrométallurgie), pour récupérer en toute sécurité les minéraux critiques contenus dans les cartes de circuits imprimés (PCB) en fin de vie.¹²

Le secteur du minage de cryptomonnaies connaît actuellement une transformation structurelle majeure qui favorise cette transition circulaire. Les limitations physiques de la fabrication des semi-conducteurs — notamment les défis posés par l'effet tunnel quantique des électrons et les importantes fuites de chaleur au niveau des transistors de 3 à 5 nanomètres (nm) — ont fondamentalement ralenti le rythme des gains d'efficacité des générations de matériel.¹⁶ Alors que les premières générations de matériel de minage bénéficiaient régulièrement de gains d'efficacité de 50 % à 100 % par cycle, les versions modernes n'offrent que des améliorations marginales de 20 % à 30 %.¹⁶ Ce ralentissement de l'obsolescence du matériel informatique offre une opportunité cruciale au secteur. Il permet aux opérateurs de réseau de ne plus considérer les ASIC comme des composants électroniques grand public jetables à court terme, mais plutôt comme une infrastructure industrielle durable à long terme.¹⁷ Grâce à des interventions stratégiques en matière de modularité, de réutilisation de la chaleur et de récupération biologique des métaux, l'industrie du minage de Bitcoin peut établir un modèle opérationnel hautement résilient, économiquement viable et zéro déchet.

Analyse des flux de matières et évaluation des ressources du matériel minier

Pour concevoir une économie circulaire fonctionnelle pour les ASIC, il est impératif de comprendre précisément et en détail leur composition matérielle. Les systèmes de minage de Bitcoin modernes sont des assemblages denses, lourds et très complexes de métaux de base, de minéraux critiques, de terres rares et de plastiques spéciaux. L'analyse du matériel leader du marché fournit des informations cruciales sur les profils exacts de masse et de matériaux qui doivent être gérés en fin de vie.

Le secteur manufacturier de l'industrie est actuellement dominé par un oligopole bien établi,

Bitmain détenant une part de marché mondiale estimée à 82 %, suivi de près par MicroBT (producteur de la série Whatsminer) et Canaan (producteur de la série Avalon), qui contrôlent ensemble plus de 99 % du marché mondial du matériel ASIC.⁸ L'analyse des spécifications des modèles phares de Bitmain, notamment l'Antminer S19 et la série S21 de génération actuelle, révèle l'ampleur physique du matériel déployé dans les centres de données du monde entier.

Modèle de mineur ASIC	Débit de hachage	Consommation d'énergie	efficacité énergétique	Poids net unitaire	Dimensions physiques (L x l x H)
Bitmain Antminer S19	95 TH/s	3250 W	~34,0 J/TH	14,2 kg	400 x 195,5 x 290 mm
Bitmain Antminer S19j XP	151 TH/s	3247 W	~21,5 J/TH	14,9 kg	400 x 195 x 290 mm
Bitmain Antminer S21 (Air)	200 TH/s	3500 W	17,5 J/TH	15,4 kg	400 x 195 x 290 mm
Bitmain Antminer S21 XP	270 TH/s	3645 W	13,5 J/TH	18,7 kg	449 x 219 x 293 mm
Canaan Avalon A1566	212 TH/s	~3400 W	~16,0 J/TH	~16,0 kg	Varie selon le déploiement

Données compilées à partir des spécifications du fabricant, des manuels techniques et des analyses opérationnelles du secteur.¹⁹

Un mineur ASIC moderne standard pèse entre 14,2 et 18,7 kilogrammes, ce qui représente un

bloc très dense de matériaux industriels.¹⁹ Cette masse n'est pas homogène ; elle est répartie sur plusieurs sous-systèmes électromécaniques clés : la carte de contrôle (faisant office de centre logique et de réseau), le bloc d'alimentation intégré, d'imposants ventilateurs de refroidissement à haut régime et les cartes de hachage internes contenant des centaines de puces de silicium individuelles.²⁵

Les matières premières utilisées dans la construction de ces installations présentent à la fois un risque environnemental lors de leur élimination et un marché des ressources secondaires très lucratif lorsqu'elles sont récupérées efficacement.

- **Aluminium:**L'aluminium, qui constitue la grande majorité de la masse totale de la machine, est largement utilisé dans le boîtier externe du châssis et dans les lourds dissipateurs thermiques internes nécessaires pour dissiper rapidement l'énorme dégagement de chaleur généré par les puces de traitement.²⁷ Certains modèles spécialisés utilisent spécifiquement des substrats en aluminium pour les cartes de hachage elles-mêmes, choisis pour leurs valeurs de conductivité thermique supérieures à celles des matériaux de circuits imprimés standard à base de cuivre.²⁸
- **Cuivre:**Le cuivre est un métal de base essentiel pour la distribution d'énergie au sein du système, constituant les barres omnibus internes, le câblage de gros calibre reliant l'alimentation à forte consommation aux cartes de hachage, et les pistes conductrices complexes intégrées aux circuits imprimés.²⁹
- **Silicium de haute pureté :**La puissance de calcul cryptographique de la machine dépend entièrement de la pureté des plaquettes de silicium utilisées. Une seule unité moderne, comme l'Antminer S21, contient jusqu'à 324 puces ASIC spécialisées de 5 nm réparties sur ses cartes de hachage.²⁶
- **Métaux précieux et métaux du groupe platine :**Les circuits imprimés et les points de contact électriques spécifiques utilisent des traces de métaux précieux, tels que l'or, l'argent et le palladium. Ces éléments sont indispensables pour garantir une grande stabilité électrique, une transmission rapide des données et une résistance optimale à la corrosion dans des environnements d'exploitation à haute température.¹⁰

D'un point de vue économique et environnemental, le recyclage physique du matériel de minage de cryptomonnaies présente un potentiel immense. Chaque puce ASIC contient environ 50 à 100 grammes de métaux précieux, permettant d'obtenir des matériaux secondaires d'une valeur estimée entre 200 et 800 dollars la tonne une fois correctement triés et valorisés.³⁰ Les calculs écologiques sont tout aussi convaincants : le recyclage d'une seule tonne métrique de circuits intégrés spécifiques (ASIC) permet d'économiser l'équivalent environnemental de l'extraction et du raffinage de 17 tonnes de minerai vierge, réduisant ainsi l'empreinte carbone globale de l'approvisionnement en matières premières d'environ 70 %.³⁰ Cependant, la réalisation de cette valeur intrinsèque nécessite le démantèlement des machines et le traitement chimique ou biologique des PCB très complexes – une étape qui s'est historiquement appuyée sur des techniques pyrométallurgiques (fusion) très polluantes ou hydrométallurgiques (lixiviation acide) dangereuses.¹⁰

La première boucle : diagnostic, réparation, remise à neuf et optimisation logicielle

Avant d'envisager le recyclage des matériaux en fin de vie, la stratégie la plus efficace dans une économie circulaire consiste à prolonger leur durée de vie. Le mouvement du « droit à la réparation » et la mise en place de marchés secondaires dédiés sont essentiels au maintien en condition opérationnelle des ASIC. Lorsqu'une machine cesse de fonctionner, la panne est rarement catastrophique pour tous les composants ; généralement, un seul ventilateur tombe en panne, une alimentation électrique se dégrade ou certaines puces d'une carte de hachage grillent sous l'effet de la chaleur.³¹

Pour répondre à ce besoin, un solide écosystème d'ateliers de réparation de circuits intégrés spécifiques (ASIC) s'est développé à l'échelle mondiale. Des entreprises telles que Connect-IT, Revolve Labs, D-Central et ZeusBTC proposent des services de remise à neuf hautement techniques.³² Ces services vont de la maintenance préventive de base, comme le nettoyage en profondeur de la poussière et le remplacement des ventilateurs, à la micro-soudure avancée au niveau de la carte, la réparation des pistes et le remplacement des puces de silicium individuelles dégradées sur les cartes de hachage.³¹ En isolant et en réparant des défauts spécifiques, comme le remplacement d'une carte de contrôle défectueuse sur un Antminer S19, les techniciens peuvent remettre une machine en pleine capacité opérationnelle pour une fraction du coût d'une nouvelle unité, évitant ainsi que 15 kilogrammes d'électronique complexe ne finissent dans les déchets.³² De plus, des entreprises comme D-Central utilisent l'impression 3D locale pour fabriquer des pièces de rechange, telles que des supports d'alimentation et des carénages de ventilateurs personnalisés, réduisant ainsi davantage la dépendance aux chaînes d'approvisionnement internationales pour les composants mineurs du châssis.³⁴

Parallèlement, l'optimisation logicielle constitue un outil essentiel pour prolonger la durée de vie économique du matériel vieillissant. À mesure que la complexité du réseau augmente, les anciens modèles comme l'Antminer S19 ou le Whatsminer M50 deviennent naturellement moins rentables avec leurs paramètres d'usine.²⁵ Cependant, les opérateurs utilisent des firmwares personnalisés, open source ou tiers — tels que NiceHash Firmware, Vnish ou Brains OS — pour modifier fondamentalement la dynamique de puissance des machines.¹⁸ Ces solutions de firmware permettent un réglage automatique algorithmique, permettant aux mineurs de sous-cadencer leurs ASIC.³⁸ En abaissant la tension et la fréquence des puces, le taux de hachage global de la machine diminue, mais son efficacité énergétique (mesurée en joules par térahash) s'améliore considérablement.³⁸ Ce gain d'efficacité grâce au logiciel permet aux puces en silicium traditionnelles de rester économiquement viables — et physiquement opérationnelles — pendant des marchés baissiers prolongés ou des périodes de coûts d'électricité élevés, retardant ainsi le besoin ultime de recyclage physique.³⁸

La deuxième boucle : écoconception, modularité et révolution des prototypes de plateformes d'essai

Le fondement même d'une économie circulaire mature repose sur l'écoconception : concevoir des produits industriels de manière à ce que leur maintenance, leur réparation et leur future mise à niveau soient intégrées dès leur conception. Historiquement, l'industrie du minage de Bitcoin a souffert d'une philosophie de conception monolithique et extrêmement gaspilleuse. Des appareils comme les Antminers traditionnels, de type « boîte à chaussures », étaient conçus comme des dispositifs à usage unique.¹³ Lorsqu'un nouveau nœud de silicium plus efficace était mis sur le marché par un fondeur comme TSMC ou Samsung, les opérateurs étaient contraints de remplacer l'unité entière.¹³ Cela impliquait de se débarrasser de dissipateurs thermiques en aluminium massif parfaitement fonctionnels, de châssis en acier, de ventilateurs de refroidissement durables et d'alimentations complexes simplement parce que les puces de silicium spécifiques soudées sur les cartes de hachage internes n'étaient plus économiquement compétitives au niveau de difficulté du réseau actuel.¹³

Ce paradigme obsolète est actuellement fortement bouleversé par des conceptions modulaires avancées, notamment défendues par le « Proto Rig » de Block Inc. Lancé fin 2025 en partenariat stratégique avec le grand opérateur minier Core Scientific, le Proto Rig représente la première refonte fondamentale et complète du format ASIC depuis plus d'une décennie.¹⁷ Rompant avec la domination établie de Bitmain, le système est doté d'un châssis personnalisé, compatible avec les racks de serveurs et conçu spécifiquement pour la densité des centres de données.⁴⁰ L'unité affiche une efficacité de 14,1 J/TH et une puissance de calcul d'environ 800 TH/s, mais sa véritable innovation réside dans sa construction physique.¹⁷ Le système comprend neuf cartes de hachage distinctes, trois unités d'alimentation modulaires et des modules de ventilateurs amovibles et remplaçables sans outil et très accessibles.⁴⁰

Les implications économiques et environnementales de deuxième et troisième ordre de cette modularité spécifique sont profondes pour la gestion du cycle de vie :

1. **Découplage des mises à niveau de silicium et de l'infrastructure** : En utilisant des cartes de hachage interchangeables indépendamment, les opérateurs peuvent passer à la puce de nouvelle génération (par exemple, en passant d'une architecture de nœud 5 nm à une architecture de nœud 3 nm) sans se débarrasser de l'infrastructure environnante.¹³ Cela transforme fondamentalement une installation minière, d'un actif jetable d'une durée de vie de 3 à 5 ans, en un investissement d'infrastructure stable sur 10 ans.¹³
2. **Réduction des dépenses d'investissement et des déchets électroniques de masse** : L'équipe d'ingénierie matérielle de Block estime que cette approche modulaire de remplacement des composants réduit les coûts de mise à niveau du parc de 15 % à 20 % par cycle de renouvellement matériel.¹³ Parallèlement, la masse totale de déchets électroniques générés par térahash diminue de façon spectaculaire, car seules les cartes de hachage spécifiques contenant le silicium obsolète sont mises hors service et

recyclées, plutôt que le châssis lourd en aluminium et les composants robustes d'alimentation.¹⁷

- 3. Réparation sur site sans outil et optimisation du temps de fonctionnement :** La philosophie de conception, qui privilégie le remplacement des composants sur place, permet des réparations sans outil directement sur la baie de serveurs en moins de 90 secondes.⁴² Cela réduit considérablement les temps d'arrêt opérationnels et empêche la mise au rebut prématurée de machines entières en raison de défaillances mineures de composants, alignant ainsi le matériel de minage sur les meilleures pratiques établies des centres de données d'entreprise traditionnels.¹³

Parallèlement à cette modularité matérielle, Block a introduit Proto Fleet, un outil de gestion logiciel open source qui fournit des diagnostics approfondis des unités et une mise à l'échelle de la puissance à l'échelle de la flotte.¹⁷ En créant un écosystème ouvert où les composants matériels peuvent être remplacés à chaud et où le logiciel peut ajuster dynamiquement la consommation d'énergie, l'industrie évolue vers une norme où l'enveloppe physique du mineur reste permanente, tandis que seuls les éléments de calcul principaux passent par le flux de recyclage.

La troisième boucle : circularité thermodynamique et symbiose industrielle

Une économie circulaire complète ne se limite pas à la gestion des matériaux solides et des métaux ; elle doit également prendre en compte les flux et l'utilisation de l'énergie. Selon les lois fondamentales de la thermodynamique, la quasi-totalité de l'énergie électrique consommée par un mineur ASIC est finalement convertie en énergie thermique de basse qualité (chaleur).⁴⁴ Historiquement, cette chaleur était considérée comme un sous-produit dangereux et irritant, évacuée inutilement dans l'atmosphère via d'immenses tours de refroidissement industrielles, un processus qui nécessitait lui-même une consommation supplémentaire d'énergie et d'eau pour être géré en toute sécurité.¹⁴

Cependant, dans les régions au climat froid et les municipalités visionnaires, les opérateurs évoluent rapidement vers un modèle de symbiose industrielle. Ce cadre redéfinit les mineurs ASIC, non plus comme de simples processeurs cryptographiques, mais comme des résistances électriques modulaires et hautement efficaces qui produisent un sous-produit financier très liquide (le Bitcoin).⁴⁴ Étant donné que les chaudières à eau électriques à résistance utilisent la même quantité d'énergie pour générer de la chaleur que les chaudières à eau électriques traditionnelles, leur utilisation comme sources d'énergie thermique principales ou secondaires modifie fondamentalement le calcul économique et environnemental de l'ensemble de l'exploitation minière.⁴⁴

Intégration de la chaleur dans l'agriculture et les serres

L'une des applications les plus prometteuses et à la croissance la plus rapide de la récupération et de l'utilisation de cette chaleur résiduelle à basse température concerne l'agriculture en environnement contrôlé. Les serres commerciales, notamment celles situées aux hautes latitudes nordiques, dépendent fortement des chaudières à gaz naturel ou à biomasse, sources importantes d'émissions de carbone, pour maintenir des températures de culture optimales durant les hivers rigoureux. Ce besoin en chauffage représente un coût d'exploitation et un impact environnemental considérables.⁴⁷

Des programmes pilotes récents ont permis de combler avec succès le fossé entre l'exploitation minière numérique et l'agriculture. Au Manitoba, au Canada, le grand fabricant de matériel informatique Canaan a déployé, en collaboration directe avec Bitforest Investment, un projet pilote de 3 mégawatts visant à chauffer des serres de tomates commerciales toute l'année.¹⁴ Pour obtenir le transfert de chaleur hautement efficace requis pour les applications agricoles à l'échelle industrielle, l'opération utilise 360 serveurs informatiques Avalon A1566HA-460T refroidis par liquide plutôt que des unités traditionnelles refroidies par air.¹⁴ Le refroidissement liquide, qu'il soit réalisé par des blocs d'eau directement sur la puce ou par immersion complète dans des fluides diélectriques spécialisés, capture l'énergie thermique de manière beaucoup plus efficace et à des températures nettement plus élevées et plus stables (le fluide sortant souvent entre 50 °C et 78 °C) que les mécanismes de refroidissement par air traditionnels.⁴⁶

Dans ce système intégré en boucle fermée, le fluide chauffé provenant des champs miniers est acheminé directement à travers un échangeur de chaleur industriel afin de préchauffer en continu l'eau d'admission des systèmes de chaudières électriques existants de la serre.¹⁴ Les estimations techniques de Canaan indiquent que jusqu'à 90 % de l'électricité consommée par les serveurs miniers est captée et transférée avec succès au système de chauffage agricole.¹⁴ Une modélisation mathématique et technico-économique poussée appuie ces résultats empiriques sur le terrain ; des modèles thermiques quasi-stationnaires complets appliqués à diverses configurations de serres au Canada et aux États-Unis démontrent que la compensation du chauffage traditionnel au gaz naturel par la chaleur résiduelle des cryptomonnaies est très rentable et réduit considérablement l'empreinte carbone globale de la production alimentaire locale.⁴⁷

Chauffage urbain résidentiel et intégration municipale

L'économie circulaire thermique du minage de Bitcoin dépasse largement le cadre de l'agriculture et s'intègre directement aux infrastructures municipales. En Finlande, la société minière MARA Holdings a intégré avec succès des installations de minage de Bitcoin directement dans les réseaux de chauffage urbain existants.⁴⁴ Stockés dans des unités métalliques insonorisées et décentralisées situées dans les centres-villes, les mineurs refroidis par liquide chauffent l'eau en circulation à des températures atteignant 172 degrés Fahrenheit (78 degrés Celsius).⁴⁹ Cette eau chaude est ensuite pompée sous terre à travers des canalisations de chauffage urbain isolées préexistantes afin de fournir la climatisation et l'eau

chaude à environ 80 000 foyers résidentiels.⁴⁹

Les conséquences environnementales de cette symbiose municipale sont considérables. Malgré leur réputation d'énergie propre, de nombreux réseaux de chauffage urbain en Europe du Nord dépendent encore fortement de la combustion de tourbe, de copeaux de bois ou de combustibles fossiles.⁴⁴ En remplaçant ces sources de combustible émettrices de carbone par la production thermique zéro émission des mineurs de Bitcoin — eux-mêmes alimentés par le réseau électrique finlandais, majoritairement propre, nucléaire et hydroélectrique —, les opérations de MARA ont permis d'atténuer avec succès près de 5 000 tonnes d'émissions de gaz à effet de serre au cours de leurs 18 premiers mois d'exploitation.⁴⁴

Des initiatives similaires de réutilisation de la chaleur sont coordonnées à l'échelle mondiale dans divers secteurs industriels. On peut citer, par exemple, les opérations de séchage de la biomasse menées par l'institut de recherche RISE en Suède, qui utilise la chaleur des serveurs pour réduire de 10 % le taux d'humidité des copeaux de bois industriels, ainsi que le chauffage à grande échelle d'installations mis en œuvre par HIVE Digital Technologies au Québec, qui utilise la chaleur dégagée par les circuits intégrés spécifiques (ASIC) pour chauffer des usines de fabrication voisines.⁵⁰

Projet de symbiose thermique	Emplacement	Technologie / Matériel	Application d'utilisation finale	Impact environnemental et économique
Canaan et Bitforest	Manitoba, Canada	ASIC Avalon refroidis par liquide de 3 MW	chauffage des serres commerciales de tomates	Il transfère 90 % de l'énergie consommée au préchauffage de l'eau de la chaudière, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles. ¹⁴
MARA Holdings	Finlande	Unités décentralisées refroidies par	Chauffage urbain (80 000 logements)	Réduction des émissions de 5 000 tonnes de GES en 1,5 an ;

		liquide		remplacement de la combustion de la tourbe et du bois. ⁴⁴
Institut RISE	Suède	Centres de données ASIC refroidis par air	Séchage industriel de biomasse/copeaux de bois	Réduit l'humidité du bois de 10 %, améliorant ainsi le rendement énergétique des industries secondaires. ⁵⁰
HIVE Digital Technologies	Québec, Canada	Installation ASIC alimentée par l'énergie hydroélectrique	Chauffage du bâtiment industriel adjacent	Valoriser la chaleur résiduelle pour subventionner les coûts d'électricité opérationnels primaires. ⁵¹

En créant un marché secondaire robuste pour l'énergie thermique générée par le hachage, les opérateurs subventionnent efficacement leurs coûts d'électricité considérables. Cela leur permet de rester très rentables dans des environnements de minage à haute difficulté sans recourir à des sources d'énergie bon marché et très polluantes, bouclant ainsi le cycle énergétique avant même que le matériel n'atteigne la fin de son cycle de vie physique.³⁸

L'environnement réglementaire et la responsabilité élargie du producteur (REP)

Malgré une modularité avancée, le sous-cadencement logiciel et la réutilisation thermique, les puces de silicium et les composants de circuits imprimés non évolutifs deviendront inévitablement obsolètes. À ce stade, la mise au rebut du matériel devra être gérée avec la plus grande rigueur. Le cadre réglementaire mondial relatif aux déchets électroniques industriels se durcit rapidement, contraignant l'industrie du minage de Bitcoin à formaliser et financer ses protocoles de fin de vie.

En Australie, la volonté législative affirmée de mettre en place une économie circulaire obligatoire offre un modèle rigoureux pour la réglementation du matériel minier à l'échelle mondiale dans les années à venir. Le Programme national de recyclage des téléviseurs et des ordinateurs (NCRS), initialement créé en 2011 et ultérieurement mis à jour par le gouvernement fédéral, en est un bon exemple. *Règlement de 2021 sur le recyclage et la réduction des déchets (responsabilité des produits – téléviseurs et ordinateurs)*, impose une responsabilité élargie du producteur (REP) stricte à tous les fabricants, distributeurs et importateurs de produits électroniques.⁵² Dans le cadre de ce dispositif législatif complet, les parties responsables sont légalement tenues de financer des mécanismes de corégulation destinés à collecter et à recycler les déchets électroniques, avec un objectif national de recyclage croissant visant à garantir la récupération de 80 % de tous les déchets électroniques produits d'ici l'exercice financier 2026-2027.⁵²

La classification des mineurs ASIC dans le cadre de ces dispositifs représente une nuance réglementaire cruciale. Bien que très spécialisés, les ASIC relèvent de la définition juridique générale des composants informatiques, des serveurs et des périphériques de traitement. Par conséquent, les exploitants de minage industriel et les importateurs de matériel opérant dans des juridictions comme l'Australie sont légalement tenus d'assurer un suivi rigoureux, une gestion sécurisée et un recyclage certifié de leurs parcs de machines mis hors service.⁵³

De plus, les autorités étatiques telles que la New South Wales Environment Protection Authority (NSW EPA) ont considérablement accéléré ces efforts grâce à l'introduction de *Loi de 2025 sur la responsabilité du cycle de vie des produits* et sa réglementation opérationnelle ultérieure prévue pour 2026.¹⁵ Bien que cette législation ait été initialement conçue pour cibler les risques d'incendie importants liés aux batteries lithium-ion intégrées, ce cadre EPR obligatoire établit un précédent réglementaire majeur : les propriétaires de marques et les importateurs industriels sont désormais tenus strictement et financièrement responsables de l'impact environnemental total de leurs produits, de leur conception initiale jusqu'à leur élimination en fin de vie.¹⁵ La législation stipule explicitement que les articles électroniques concernés ne peuvent pas simplement être jetés dans les décharges municipales.¹⁵ Pour faire respecter cette mesure, l'Agence de protection de l'environnement de Nouvelle-Galles du Sud (NSW EPA) utilise des taxes agressives sur les déchets, facturant des frais d'entrée élevés par tonne pour l'élimination

des déchets mixtes, ce qui rend le déversement massif de châssis ASIC en métal lourd économiquement pénalisant par rapport aux filières de recyclage certifiées.⁵⁷

De plus, des mesures internationales majeures, telles que les amendements rigoureux à la Convention de Bâle (entrés pleinement en vigueur en janvier 2025), réglementent et contrôlent désormais strictement les mouvements transfrontaliers de déchets électroniques dangereux et non dangereux.⁵⁸ Ce cadre juridique international restreint considérablement la pratique historique et hautement contraire à l'éthique qui consistait pour les riches nations occidentales à exporter leurs flottes d'ASIC obsolètes vers des pays en développement aux normes environnementales laxistes, où les machines étaient souvent soumises à des bains d'acide rudimentaires à ciel ouvert et à une incinération toxique pour en extraire des traces d'or.⁹

Par conséquent, les infrastructures de recyclage nationales conformes aux normes doivent se développer rapidement pour absorber ces équipements. Les prestataires de recyclage industriel opérant dans des régions comme la Nouvelle-Galles du Sud, tels que Sims Metal Management et Veolia, ont mis en place des filières de démantèlement de centres de données très spécifiques.⁵⁹ Ces installations gigantesques utilisent des technologies de tri optique avancées et de puissantes technologies de séparation magnétique pour isoler physiquement les plastiques ABS des boîtiers lourds en acier et en aluminium.⁵⁹ Cependant, bien que ces techniques de séparation mécanique soient très efficaces pour récupérer les composants volumineux en acier et en aluminium, l'extraction des métaux précieux essentiels incorporés dans les circuits imprimés complexes reste le principal goulot d'étranglement technologique de l'industrie.⁶²

La boucle finale : récupération avancée des matériaux et biohydrométallurgie

Les cartes de circuits imprimés (PCB) situées au cœur des mineurs ASIC forment une matrice dense et complexe de fibre de verre tissée, de pistes de cuivre, de puces logiques en silicium et de traces de métaux précieux. Les méthodes industrielles traditionnelles de récupération de ces cartes sont fondamentalement linéaires, très inefficaces et polluantes. La pyrométallurgie (fusion industrielle) est extrêmement énergivore et rejette régulièrement dans l'atmosphère des dioxines et des furanes hautement toxiques lors de la combustion des résines plastiques et époxy des PCB.⁶³ À l'inverse, l'hydrométallurgie chimique traditionnelle repose largement sur des acides hautement corrosifs et des lixiviants toxiques, notamment le cyanure, pour dissoudre et récupérer l'or avec succès.⁶⁴ Bien que la cyanuration industrielle soit très sélective et efficace pour la récupération de l'or, l'extrême toxicité du produit chimique pose de graves risques pour la santé publique, des dangers pour la sécurité des travailleurs et la menace constante d'une contamination environnementale catastrophique, ce qui incite à une recherche scientifique urgente d'alternatives plus écologiques.¹⁰

La biohydrométallurgie, et plus particulièrement le procédé de biolixiviation, s'est rapidement

imposée comme la voie technologique la plus prometteuse et la plus facilement industrialisable pour boucler en toute sécurité le cycle du recyclage des PCB. La biolixiviation exploite les processus métaboliques naturels et évolutifs de micro-organismes spécialisés (bactéries et champignons) pour mobiliser et extraire chimiquement les métaux cibles contenus dans les déchets électroniques solides, puis les dissoudre dans une solution aqueuse facilement récupérable.¹² Des recherches universitaires et industrielles récentes, qui se sont rapidement développées jusqu'en 2024 et 2025, ont démontré une efficacité remarquable dans l'application directe de ces systèmes biologiques à du matériel informatique complexe.

Mécanismes biologiques et solubilisation des métaux

Les micro-organismes accomplissent cette extraction complexe de métaux grâce à deux mécanismes biochimiques principaux : la sécrétion massive d'acides organiques hautement réactifs et la synthèse biologique de lixiviants spécifiques comme le cyanure biogénique ou le thiosulfate.

De nombreuses recherches contemporaines se sont concentrées sur l'utilisation des champignons hétérotrophes, en particulier des souches *Aspergillus niger* et *Aspergillus nivos*. Cultivée dans un milieu riche en nutriments contenant une source de carbone simple comme le glucose, *Aspergillus niger* métabolise rapidement les sucres pour produire un mélange puissant d'acides organiques, notamment des concentrations élevées d'acides oxalique, citrique et gluconique.⁶⁶ Ces acides produits biologiquement abaissent naturellement le pH de la solution aqueuse et agissent comme de puissants agents chélateurs, dissolvant efficacement les métaux de base et précieux piégés dans les déchets de PCB broyés.

Un procédé industriel standard et optimisé repose sur une méthode contrôlée en deux étapes : les micro-organismes sélectionnés sont d'abord cultivés dans un bioréacteur afin de maximiser leur croissance cellulaire et la production de métabolites (acides). Ce n'est qu'une fois la concentration en acides optimale atteinte que les déchets de PCB stérilisés et broyés mécaniquement sont introduits dans le réacteur.⁶⁶ Cette approche par étapes est essentielle, car elle empêche les concentrations initialement élevées de métaux lourds toxiques présents dans les déchets électroniques d'assommer ou de tuer les champignons pendant leur phase de croissance initiale vulnérable.⁶⁷

Efficacité, cinétique et taux de récupération

Des essais récents en laboratoire à l'échelle pilote, utilisant des réacteurs à cuve agitée en continu, ont définitivement prouvé la viabilité commerciale de ces voies fongiques et bactériennes pour le traitement du matériel minier.

Souche de micro-organis	Mécanisme de biolixiviation	Métaux cibles	Rendement de récupération	Délai de
-------------------------	-----------------------------	---------------	---------------------------	----------

me	primaire	recupérés	maximal	traitement
Aspergillus niger	Acides organiques (citrique, oxalique, gluconique)	Cuivre (Cu), Or (Au)	100 % Cu, 42,5 % Au	14 jours
Aspergillus nivos	Acides organiques (itaconique, oxalique)	Cuivre, zinc, nickel	80,25 % Cu, 75,6 % Zn	12 à 15 jours
Chromobacterium violaceum	Production de cyanure biogénique	Cuivre (Cu), Or (Au)	87,5 % Cu, 73,6 % Au	Variable
Penicillium expansum	Acides organiques et contrôle du pH	Éléments des terres rares (ETR)	~70% (Pr, Nd, Gd)	24 heures

Données issues de publications récentes sur la biolixiviation, évaluées par des pairs, et d'essais industriels.⁶⁶

En utilisant une méthode en deux étapes hautement contrôlée avec une faible densité de pulpe de déchets de PCB (2,5 grammes par litre), *Aspergillus niger* ont réussi à extraire 100 % du cuivre disponible et 42,5 % de l'or incorporé en un cycle de 14 jours.⁶⁶ Lorsque les chercheurs ont transposé ce procédé à un réacteur à cuve agitée plus grand simulant les conditions industrielles, le système biologique a maintenu un taux de récupération du cuivre très respectable de 83 % et un taux de récupération de l'or de 24 %.⁶⁶ Notamment, l'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et par microscopie électronique à transmission (MET) a révélé que ce processus biologique facilitait également la synthèse naturelle de nanoparticules métalliques à morphologie sphérique, ajoutant ainsi une immense valeur secondaire aux matériaux récupérés pour une utilisation dans la fabrication avancée.⁶⁶

Pour obtenir des rendements nettement supérieurs en or précieux, les chercheurs ont utilisé des bactéries naturellement cyanogènes telles que *Chromobacterium violaceum* et *Pseudomonas aeruginosa*. Ces bactéries hautement spécialisées possèdent la capacité unique de métaboliser naturellement des molécules précurseurs, telles que l'acide aminé glycine, pour synthétiser l'acide cyanhydrique biologique.⁶⁵ Bien que ce procédé repose encore fondamentalement sur le cyanure pour dissoudre l'or, la réaction se déroule dans des réacteurs biologiques dilués et hautement contrôlés, ce qui atténue considérablement les risques environnementaux et professionnels graves associés à la cyanuration chimique industrielle traditionnelle.⁶⁵ Optimisation de *C. violaceum* Une culture à un pH alcalin de 9,0 et à une température de 30°C a permis de récupérer un impressionnant taux de 87,5 % de cuivre et de 73,6 % d'or à partir de déchets de PCB bruts.⁶⁹

Le principal obstacle opérationnel empêchant la commercialisation immédiate et à grande échelle de la biolixiviation dans le secteur du recyclage est la cinétique de réaction.⁷² Alors qu'un four de fusion industriel peut fondre et séparer les métaux en quelques heures, la lixiviation biologique nécessite des jours, voire des semaines, d'incubation pour atteindre des rendements élémentaires maximaux.⁶⁸ Toutefois, la réduction drastique de la consommation énergétique totale, l'élimination complète des polluants atmosphériques secondaires graves et la capacité unique de faire fonctionner ces réacteurs à température ambiante standard font de la biolixiviation un élément absolument essentiel de la stratégie d'économie circulaire à long terme pour les déchets électroniques.⁶³

Récupération secondaire : Synthèse de puces en silicium et de micro-usines

Bien que la récupération du cuivre de base et de l'or précieux offre le rendement financier immédiat le plus élevé aux recycleurs, un véritable système en boucle fermée et sans compromis doit également prendre en compte le volume massif de puces logiques en silicium et les fractions non métalliques complexes des ASIC, principalement la fibre de verre tissée et les résines époxy thermodurcissables qui constituent le substrat structurel des PCB.

Récupération de silicium de haute pureté

Les milliards de transistors de calcul microscopiques d'une carte de hachage ASIC moderne sont gravés avec une grande précision dans des plaquettes de silicium de haute qualité. Historiquement, le recyclage du silicium issu des déchets électroniques en fin de vie était considéré comme totalement non rentable comparé au procédé établi d'extraction et de traitement du quartz vierge. Cependant, de nouvelles méthodes chimiques, telles que la gravure saline à basse énergie, ont fondamentalement changé la donne. En soumettant les puces de silicium mises hors service à un procédé de gravure saline chimique spécialisé, combiné à des traitements alcalins ultérieurs, les chercheurs en matériaux ont réussi à récupérer jusqu'à 98 % du silicium intégré, avec un niveau de pureté exceptionnel, quasi parfait, de 99,999 %.⁷⁴

Ce silicium secondaire de haute pureté permet de s'affranchir totalement des phases de raffinage primaire, très énergivores et fortement consommatrices de carbone, nécessaires à la production de silicium vierge. La réaction de gravure saline, qui se déroule à température ambiante et utilise des réactifs chimiques relativement peu coûteux et facilement disponibles, constitue une alternative à faible empreinte carbone, facilement industrialisable, aux procédés de lixiviation agressifs traditionnels.⁷⁵ Ce procédé offre un flux vital et durable de matières premières de silicium de haute qualité aux industries mondiales de fabrication de semi-conducteurs ou photovoltaïques (panneaux solaires), bouclant ainsi la boucle sur l'un des éléments les plus critiques de l'économie technologique moderne.⁷⁴

Micro-usines Technologies de synthèse des plastiques et des céramiques

Le boîtier en plastique ABS, les carters de ventilateurs rigides et l'important volume de déchets de circuits imprimés non métalliques posent un défi de recyclage bien différent, car ces plastiques mixtes et résines durcies sont notoirement difficiles à décomposer et à recycler par les méthodes municipales traditionnelles. Pour relever ce défi spécifique, le Centre de recherche et de technologie sur les matériaux durables (SMaRT Centre) de l'Université de Nouvelle-Galles du Sud (UNSW) a mis au point le concept novateur de « micro-usine ».⁷⁶

Plutôt que de s'appuyer sur des usines de recyclage massives, centralisées et nécessitant

d'importants capitaux, les micro-usines sont conçues comme des unités de traitement modulaires et hautement localisées qui utilisent un procédé appelé désengagement thermique et une science avancée du microrecyclage pour synthétiser des produits à valeur ajoutée entièrement nouveaux directement à partir des déchets électroniques.⁷⁶ Dans ces modules, les plastiques complexes récupérés du flux de déchets électroniques sont fondus et reformés en un filament continu de haute qualité destiné spécifiquement à la fabrication d'impressions 3D commerciales.⁷⁶ De plus, les fractions non métalliques résiduelles complexes des PCB broyés (le mélange problématique de fibre de verre et de résines durcies) sont pulvérisées et transformées thermiquement en « céramiques vertes » — des matériaux très durables et esthétiquement agréables, adaptés à une utilisation dans l'environnement bâti et l'architecture commerciale.⁷⁹

En transformant avec succès ce que l'industrie du recyclage considérait auparavant comme des scories toxiques non recyclables en céramiques architecturales de grande valeur et en filaments de fabrication essentiels, le concept de micro-usine élimine élégamment les derniers vecteurs de déchets les plus tenaces de l'extraction de circuits intégrés spécifiques (ASIC), conduisant l'ensemble de l'opération minière vers une véritable réalité zéro déchet en décharge.⁷⁶

La réalité économique et la diversification des entreprises

La transition mondiale vers une économie circulaire est fondamentalement régie non seulement par un idéal environnemental, mais aussi par de dures réalités économiques. En 2026, les marges bénéficiaires du minage de Bitcoin seront extrêmement faibles. Avec une difficulté du réseau mondial avoisinant des sommets historiques et des récompenses par bloc réduites de moitié à 3,125 BTC de façon permanente, le maintien de la rentabilité exige une ingénierie de précision, des tarifs d'électricité au plus bas et une monétisation intensive de tous les aspects possibles de l'activité.²

La valeur intrinsèque de récupération d'un mineur ASIC mis hors service n'offre qu'une incitation financière relativement faible au recyclage avancé. Les machines haut de gamme comme l'Antminer S21 ou S21 XP se vendent à plusieurs milliers de dollars en tant qu'investissements.²² La récupération ultérieure de quelques dollars de cuivre et d'or bruts par machine ne peut pas compenser les coûts élevés de transport logistique et de traitement chimique complexe du processus de recyclage sur une base unitaire.⁸² Sans subventions publiques directes pour les infrastructures, sans interdiction stricte de la mise en décharge, ni sans application rigoureuse des réglementations sur la responsabilité élargie des producteurs (REP) évoquées précédemment, le recyclage physique brut fonctionne avec une marge financière très faible, voire négative.⁸⁴

Par conséquent, pour que l'économie circulaire fonctionne concrètement, la phase de recyclage en fin de vie doit être fortement subventionnée par un allongement massif de la durée de vie et une maximisation extrême de l'utilisation du matériel pendant sa phase d'exploitation. Les principaux opérateurs miniers institutionnels atteignent actuellement cette stabilité financière requise grâce à une diversification agressive de leurs activités.

1. **Diversification du cloud IA et du HPC** :La tendance la plus marquante du secteur minier moderne est la transition rapide d'infrastructures énergétiques robustes et renouvelables vers les centres de données de calcul haute performance (HPC) et d'intelligence artificielle. Des entreprises comme Iris Energy (IREN) exploitent leur vaste infrastructure électrique 100 % renouvelable et leurs terrains existants pour déployer des clusters de milliers de GPU NVIDIA (comme la série Blackwell) en complément de leurs parcs ASIC traditionnels.⁸⁵ En proposant des services cloud basés sur l'IA, ces opérateurs augmentent considérablement leur chiffre d'affaires total par mégawatt d'énergie consommée.⁸⁶ Ces revenus informatiques à forte marge fournissent les importants capitaux nécessaires pour financer de manière responsable la mise au rebut écologique du matériel et des initiatives ESG complètes.⁸⁶
2. **Marchés dynamiques de puissance de hachage** :Plutôt que de s'appuyer sur des paiements statiques et traditionnels de pools de minage, les opérateurs utilisent de plus en plus des plateformes dynamiques qui permettent aux acheteurs d'enchérir activement sur la puissance de hachage de leur machine.³⁸ Ce système d'enchères fait souvent grimper le taux de rémunération au-dessus de la valeur de base standard du réseau Bitcoin, permettant aux opérateurs d'obtenir le rendement financier maximum possible d'un matériel vieillissant et moins efficace avant qu'il ne soit finalement contraint à la phase de mise hors service et de recyclage.³⁸

Ce n'est que lorsque le cycle de vie économique du matériel est poussé à sa limite maximale absolue — grâce à des mises à niveau modulaires du châssis, un sous-cadencement rigoureux du firmware et la vente lucrative de la chaleur résiduelle — que la dernière étape, coûteuse, du recyclage biologique et mécanique devient une conclusion économiquement harmonieuse et durable à la vie de l'actif.

Conclusion

L'industrie du minage de Bitcoin est actuellement idéalement placée pour opérer une transition radicale, passant du statut de l'un des plus importants producteurs mondiaux de déchets électroniques à un fer de lance technologique de l'économie circulaire moderne. Cette transformation essentielle ne repose pas sur la découverte d'une solution technologique miracle, mais plutôt sur l'intégration systématique et rigoureuse d'un système en boucle fermée hautement multidisciplinaire.

Dès les prémices du cycle de vie du matériel informatique, des initiatives d'éco conception novatrices – illustrées par l'architecture modulaire et interchangeable de la carte mère du Proto

Rig – évitent la destruction prématurée et inutile des châssis métalliques lourds et des infrastructures d'alimentation électrique essentielles. Durant la phase opérationnelle, l'adoption croissante du refroidissement liquide avancé favorise une profonde symbiose industrielle. Ceci permet aux fermes de minage massives, d'une puissance de plusieurs gigawatts, de décarboner activement les réseaux de chauffage urbain et de soutenir les activités agricoles commerciales en captant, en acheminant et en valorisant leurs déchets thermiques.

Lorsque les puces de silicium atteignent finalement le seuil inévitable de l'obsolescence économique irréversible, un réseau de plus en plus dense de cadres mondiaux de responsabilité élargie des producteurs (REP) et de traités internationaux garantit que ces machines ne finissent pas par pourrir dans les décharges ou être exportées vers des pays en développement vulnérables. À ce stade critique de fin de vie, la biohydrométallurgie avancée – qui exploite le pouvoir biologique de souches microbiennes spécialisées comme *Aspergillus niger* et *Chromobacterium violaceum* Ce procédé remplace la fusion et les bains d'acide hautement toxiques, permettant de récupérer de manière sûre et propre le cuivre, l'or et les terres rares. Parallèlement, des micro-usines universitaires locales transforment les résidus plastiques et la fibre de verre les plus tenaces en filaments d'impression 3D de haute qualité et en céramiques écologiques durables, tandis que la gravure saline à basse énergie permet de récupérer efficacement du silicium de haute pureté pour la prochaine génération de microprocesseurs.

En synchronisant avec soin la conception modulaire du matériel, la réutilisation de l'énergie thermodynamique, le strict respect des réglementations et la valorisation des matières biologiques, le secteur mondial du minage de cryptomonnaies peut boucler la boucle de son infrastructure matérielle de manière efficace et permanente. Ce faisant, il garantit non seulement l'intégrité cryptographique d'un réseau financier mondial décentralisé, mais aussi, fondamentalement, la préservation à long terme des ressources planétaires limitées sur lesquelles il repose.

Sources des citations

1. Le minage de Bitcoin est-il rentable en 2026 ? Coûts, matériel et retour sur investissement réel | Coincub, consulté le 1er mars 2026. <https://coincub.com/mining/bitcoin-mining-2026/>
2. Combien coûte le minage de bitcoins : revenus du minage en 2026. - Binance, consulté le 1er mars 2026. <https://www.binance.com/en/square/post/35785014254762>
3. Bitcoin Electronic Waste Monitor - Digiconomist, consulté le 1er mars 2026, <https://digiconomist.net/bitcoin-electronic-waste-monitor/>
4. ASIC - Bitcoin Wiki, consulté le 1er mars 2026. <https://en.bitcoin.it/wiki/ASIC>
5. Une étude sur les technologies qui rendent le Bitcoin plus écologique ou plus justifié - IEEE Xplore, consulté le 1er mars 2026. <https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6287639/9668973/09829550.pdf>
6. Le problème des déchets électroniques liés au Bitcoin est sous nos yeux -

- Greenpeace, consulté le 1er mars 2026, <https://www.greenpeace.org/usa/bitcoins-e-waste-problem-is-hiding-in-plain-sight/>
7. Apprentissage automatique de l'empreinte carbone du minage de Bitcoin - MDPI, consulté le 1er mars 2026, <https://www.mdpi.com/1911-8074/15/2/71>
 8. Le minage de Bitcoin favorise le développement durable avec plus de 50 % de l'énergie produite à partir de sources renouvelables - CryptoRank, consulté le 1er mars 2026, <https://cryptorank.io/news/feed/6c11e-bitcoin-mining-pushes-sustainability-agenda-with-over-50-of-energy-generated-from-renewables>
 9. Déchets électroniques (D3E) - Organisation mondiale de la santé (OMS), consulté le 1er mars 2026, [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-\(e-waste\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-(e-waste))
 10. Défis et opportunités liés à la récupération de l'or à partir des déchets électroniques - PMC, consulté le 1er mars 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9049023/>
 11. Aperçu de la transformation numérique et de la durabilité environnementale : menaces, opportunités et solutions - MDPI, consulté le 1er mars 2026, <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/24/11079>
 12. Biolixiviation : une option d'exploitation minière urbaine pour endiguer le défi des déchets électroniques - PMC, consulté le 1er mars 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8291872/>
 13. Block dévoile Proto Rig et Proto Fleet, marquant une nouvelle ère dans le minage de Bitcoin, consulté le 1er mars 2026, <https://www.businesswire.com/news/home/20250814809089/en/Block-Unveils-Proto-Rig-and-Proto-Fleet-Marking-a-New-Era-in-Bitcoin-Mining>
 14. La nouvelle initiative de Canaan prévoit de cultiver des tomates grâce à la chaleur générée par le minage de Bitcoin, consulté le 1er mars 2026, <https://www.theblock.co/post/384452/canaan-bitcoin-mining-greenhouse-efficiency-initiative>
 15. Comprendre la loi de 2025 sur la responsabilité du cycle de vie des produits en Nouvelle-Galles du Sud - Conformité et risques, consulté le 1er mars 2026, <https://www.complianceandrisk.com/blog/understanding-new-south-wales-product-lifecycle-responsibility-act-2025-mandatory-extended-producer-responsibility-and-its-reach-beyond-nsw/>
 16. Limitations du silicium, innovations en matière de matériaux pour le minage de BTC - CoinGeek, consulté le 1er mars 2026, <https://coingeek.com/silicon-limitations-new-material-innovations-in-btc-mining/>
 17. Block's Proto dévoile Rig, un mineur ASIC de 14,1 J/TH avec puces interchangeables..., consulté le 1er mars 2026, <https://blockspace.media/insight/blocks-proto-unveils-rig-a-14-1-j-th-asic-miner-with-swappable-hashboards/>
 18. Cambridge Digital Mining Industry Report - Issu, consulté le mars 1, 2026,

- https://issuu.com/cambridgejbs/docs/cambridge_digital_mining_industry_report
19. S19 Specifications - BITMAIN Support, consulté le mars 1, 2026, <https://support.bitmain.com/hc/en-us/articles/900000253583-S19-Specifications>
 20. \$3,000 Bitcoin Miner Review, 4 Month Update - Canaan A1566 - YouTube, consulté le mars 1, 2026, <https://www.youtube.com/watch?v=e6FwQckrn6c>
 21. S21 Specification - BITMAIN Support, consulté le mars 1, 2026, <https://support.bitmain.com/hc/en-us/articles/23794895251609-S21-Specification>
 22. Bitmain Antminer S21 Bitcoin Miner (200Th/s) - CryptoMinerBros, consulté le mars 1, 2026, <https://www.cryptominerbros.com/product/bitmain-antminer-s21-bitcoin-asic-miner/>
 23. Test de l'Antminer S21 XP 270 TH/s : Performances, efficacité et rentabilité - ECOS, consulté le 1er mars 2026. <https://ecos.am/en/blog/antminer-s21-xp-270-th-s-review-performance-efficiency-and-profitability>
 24. Bitmain Antminer S19j XP 151T Bitcoin Miner - Zeus Mining, consulté le mars 1, 2026, <https://www.zeusbtc.com/Asic-Miner/Asic-Miner-Details.asp?ID=3109>
 25. 2024 Bitcoin Home Mining Guide - Hashrate Index, consulté le mars 1, 2026, <https://hashrateindex.com/blog/bitcoin-home-mining-guide-2024/>
 26. Antminer S21 Technical Deep Dive | Braiins, consulté le mars 1, 2026, <https://braiins.com/blog/antminer-s21-technical-deep-dive>
 27. La ruée vers l'or numérique dépend de l'or traditionnel | U.S. Geological Survey - USGS.gov, consulté le 1er mars 2026. <https://www.usgs.gov/news/featured-story/digital-gold-rush-depends-traditional-gold>
 28. Dissiper la confusion : Guide des substrats en aluminium pour Antminer de Bitmain - D-Central, consulté le 1er mars 2026. <https://d-central.tech/sorting-the-confusion-a-guide-to-bitmain-antminer-aluminum-substrates/>
 29. Compositions représentatives des PCB en pourcentage massique - ResearchGate, consulté le 1er mars 2026. https://www.researchgate.net/figure/Representative-material-compositions-of-PCBs-in-weight-percent_tbl1_248934015
 30. Comment recycler le matériel de cryptomonnaie : Guide du mineur..., consulté le 1er mars 2026. <https://bigdatasupply.com/how-to-recycle-cryptocurrency-hardware/>
 31. Comment réparer un mineur ASIC - YouTube, consulté le 1er mars 2026. <https://www.youtube.com/watch?v=xgM1cGk0ZE8>
 32. Asic miner repair services in Australia - Melbourne - Connect IT, consulté le mars 1, 2026, <https://connectit.com.au/asic-miner-repairs/>
 33. ASIC Repair | Revolve Labs, consulté le mars 1, 2026, <https://www.revovelabs.ai/repairs>
 34. D-Central présente des solutions innovantes de chauffage domestique intégrant le minage de Bitcoin, consulté le 1er mars 2026. <https://www.einpresswire.com/article/757212332/d-central-showcases-inno>

- [vative-home-heating-solutions-with-bitcoin-mining-integration](#)
35. Asic Miner Repair Center Australia - Zeus Mining, consulté le mars 1, 2026, <https://www.zeusbtc.com/RepairCenter/Australie/>
 36. Réparation d'une carte de contrôle - Guide de remplacement de la carte de contrôle d'un mineur ASIC - YouTube, consulté le 1er mars 2026. <https://www.youtube.com/watch?v=Sekb9DbCEw8>
 37. Faut-il acheter un S19 ? Le légendaire mineur Bitmain Antminer vaut-il toujours le coup ? - YouTube, consulté le 1er mars 2026. <https://www.youtube.com/watch?v=7il1RGsrqA0>
 38. Comment les mineurs de Bitcoin peuvent rester rentables en 2026 - NiceHash, consulté le 1er mars 2026. <https://www.nicehash.com/blog/post/how-bitcoin-miners-can-stay-profitable-in-2026>
 39. Antminer S21 - Les réalités du minage de Bitcoin en 2024 - YouTube, consulté le 1er mars 2026. <https://www.youtube.com/watch?v=Aowl1w5dQXs>
 40. Block Inc. lance Proto Rig : un mineur de Bitcoin modulaire qui défie la domination de Bitmain, consulté le 1er mars 2026. <https://bitcoinmagazine.com/bitcoin-mining/block-inc-launches-proto-rig-modular-bitcoin-miner-challenging-bitmains-dominance>
 41. The Mining Pod | Blockspace Media podcast episode list - Podnews, consulté le mars 1, 2026, <https://podnews.net/podcast/i92p/episodes>
 42. Rig - Proto, consulté le mars 1, 2026, <https://proto.xyz/products/rig>
 43. Block dévoile un système modulaire de minage de bitcoins et un logiciel de gestion de flotte, consulté le 1er mars 2026. <https://za.investing.com/news/company-news/block-unveils-modular-bitcoin-mining-system-and-fleet-management-software-93CH-3840639>
 44. Ces maisons finlandaises sont chauffées par une source surprenante : le Bitcoin | Grist, consulté le 1er mars 2026. <https://grist.org/buildings/bitcoin-cryptocurrency-district-heat-finland/>
 45. Au-delà de la blockchain : comment le minage de bitcoins alimente un chauffage urbain propre et à faible coût, consulté le 1er mars 2026. <https://www.mara.com/posts/beyond-the-blockchain-how-bitcoin-mining-powers-clean-low-cost-district-heating>
 46. for blockchain mining applications - Shell, consulté le mars 1, 2026, https://www.shell.com/what-we-do/technology-and-innovation/shell-techxplorer-digest/2024-2-shell-techxplorer-digest/_jcr_content/root/main/section_1944918422/text_52551135_copy.multi.stream/1733905937706/9fd4662bd944feff58b1b5f08ab89e570e99c4ac/STCHDigest2024_12_shivaprasad.pdf
 47. Modélisation énergétique et analyse de faisabilité technico-économique de serres pour la culture de tomates utilisant la chaleur résiduelle des mineurs de cryptomonnaies - MDPI, consulté le 1er mars 2026. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1331>
 48. Bitcoin Mining Heats Greenhouses in Canada - BITmarkets, consulté le mars 1, 2026, <https://bitmarkets.com/en/insights/article/bitcoin-mining-heats-canadian-greenh>

ouses

49. Le minage de bitcoins chauffe des milliers de foyers en Finlande, consulté le 1er mars 2026. <https://www.districtenergy.org/blogs/district-energy/2026/01/21/bitcoin-mining-is-heating-thousands-of-homes-in-fi>
50. Le Bitcoin présente-t-il un avantage environnemental ? - RISE, consulté le 1er mars 2026. <https://www.ri.se/en/is-there-an-environmental-upside-to-bitcoin>
51. HIVE se développe et innove avec une croissance de 4x du Bitcoin suite à l'acquisition au Québec en 2020 pour miner du Bitcoin à partir d'hydroélectricité et recycler l'énergie pour chauffer un bâtiment de fabrication adjacent, consulté le 1er mars 2026. <https://www.hivedigitaltechnologies.com/news/hive-expands-and-innovates-with-4x-bitcoin-growth-from-the-quebec-acquisition-in-2020-to-mine-bitcoin-from-hydro-electricity-and-recycle-the-energy-to-heat-adjacent-manufacturing-building/>
52. Programmes de gestion responsable des produits | EPA - NSW Environment Protection Authority, consulté le 1er mars 2026. <https://www.epa.nsw.gov.au/Your-environment/Recycling-and-reuse/warr-s-trategy/product-stewardship-schemes>
53. Programme national de recyclage des téléviseurs et des ordinateurs – rôles et responsabilités, consulté le 1er mars 2026. <https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/waste/product-stewardship/products-schemes/television-computer-recycling-scheme>
54. Actes du colloque de recherche sur les politiques socio-économiques États-Unis-Japon : L'essor du télétravail dans le contexte de la COVID-19 et la croissance des cryptomonnaies - RAND, consulté le 1er mars 2026. https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/conf_proceedings/CFA1500/CFA1556-1/RAND_CFA1556-1.pdf
55. Co-regulatory arrangements - NTCRS - DCCEEW, consulté le mars 1, 2026, <https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/waste/product-stewardship/products-schemes/television-computer-recycling-scheme/coreg-arrangements>
56. Projet de règlement sur la responsabilité du cycle de vie des produits | Autorité de protection de l'environnement de Nouvelle-Galles du Sud, consulté le 1er mars 2026. <https://yoursay.epa.nsw.gov.au/draft-product-lifecycle-responsibility-regulation>
57. Impacts de la taxe sur les déchets sur les recycleurs - Autorité de protection de l'environnement de Nouvelle-Galles du Sud, consulté le 1er mars 2026. <https://www.epa.nsw.gov.au/sites/default/files/cie-waste-levy-recyclers.pdf>
58. Nouvelles exigences internationales relatives aux déchets électriques et électroniques | Agence américaine de protection de l'environnement (EPA), consulté le 1er mars 2026. <https://www.epa.gov/hwgenerators/new-international-requirements-electrical-and-electronic-waste>
59. Recyclage des déchets électroniques - Veolia Australie et Nouvelle-Zélande, consulté le 1er mars

- 2026,<https://www.anz.veolia.com/en-au/services/recycling-waste-services/hazardous-waste/e-waste>
60. Que deviennent les équipements des centres de données après leur enlèvement ? – Sims Lifecycle Services, consulté le 1er mars 2026,<https://www.simslifecycle.com/data-center/faq/how-equipment-is-processed/>
 61. Comment les ordinateurs sont recyclés | Vidéo Recyclage des déchets électroniques – Sims Metal, consulté le 1er mars 2026,<https://www.simsmm.com/videos/computer-and-e-waste-recycling/>
 62. Recyclage des semi-conducteurs : la clé d'un avenir technologique plus vert – Microchip USA, consulté le 1er mars 2026,<https://www.microchipusa.com/industry-news/recycling-semiconductors-the-key-to-a-greener-tech-future>
 63. Optimisation de la biolixiviation pour la récupération du cuivre des cartes de circuits imprimés : une approche basée sur l'IA et le RGB – UPC Commons, consulté le 1er mars 2026,<https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/bf1c931a-357c-4497-8a66-f8ce298afc20/content>
 64. Biolixiviation de l'or des cartes de circuits imprimés : durabilité potentielle du thiosulfate, consulté le 1er mars 2026,<https://www.mdpi.com/2313-4321/10/3/87>
 65. Optimisation des procédés durables d'extraction des métaux précieux à partir de cartes de circuits imprimés en fin de vie | Chemical Engineering Transactions, consulté le 1er mars 2026,<https://www.cetjournal.it/index.php/cet/article/view/CET24111102>
 66. Biolixiviation des déchets de cartes de circuits imprimés pour obtenir des nanoparticules métalliques – MDPI, consulté le 1er mars 2026,<https://www.mdpi.com/2071-1050/16/22/9837>
 67. Biolixiviation améliorée du cuivre et de l'or à partir de déchets de cartes de circuits imprimés : procédé par étapes, stratégies de prétraitement, analyse métabolomique et rôle de la N8-acétylspérmidine | Demande de PDF – ResearchGate, consulté le 1er mars 2026,https://www.researchgate.net/publication/386474518_ENHANCED_BIOLEACHING_OF_COPPER_AND_GOLD_FROM_WASTE_PRINTED_CIRCUIT_BOARDS_STEP_WISE_PROCESS_PRETREATMENT_STRATEGIES_METABOLOMICS_ANALYSIS_AND_THE_ROLE_OF_N8-ACETYLSPERMIDINE
 68. Récupération de métaux précieux à partir de déchets de cartes de circuits imprimés à l'aide d'acides organiques synthétisés par *Aspergillus niger* – PMC, consulté le 1er mars 2026,<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8675819/>
 69. Biolixiviation des métaux à partir de déchets de cartes de circuits imprimés à l'aide d'isolats bactériens indigènes d'une mine d'or abandonnée, consulté le 1er mars 2026,<https://par.nsf.gov/servlets/purl/10336134>
 70. Façonner l'avenir : optimisation de la biolixiviation des terres rares issues des déchets électroniques par *Penicillium expansum* et aperçus de son mécanisme – PubMed, consulté le 1er mars 2026,<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38685515/>
 71. Biolixiviation pour la récupération des métaux de base et précieux contenus dans

- les déchets électroniques : une revue, consulté le 1er mars 2026, https://www.researchgate.net/publication/332250507_Bioleaching_for_recovery_of_base_and_precious_metals_from_electronic_waste_A_review
72. Procédé de récupération des métaux précieux à partir de cartes électroniques : étude de cas d'un organisme sans but lucratif (QC, Canada) - MDPI, consulté le 1er mars 2026. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/6/2509>
 73. (PDF) Lixiviation de l'or et du cuivre des cartes de circuits imprimés sous l'action du courant alternatif dans des électrolytes d'acide chlorhydrique - ResearchGate, consulté le 1er mars 2026, https://www.researchgate.net/publication/365465571_Leaching_of_Gold_and_Copper_from_Printed_Circuit_Boards_under_the_Alternating_Current_Action_in_Hydrochloric_Acid_Electrolytes
 74. Cycle de vie et recyclage du silicium dans l'industrie des semi-conducteurs - Aaltodoc, consulté le 1er mars 2026. <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstreams/313b7801-cf6d-4094-b4e6-7ece2f5e1b4a/download>
 75. Méthodes modernes de récupération du silicium à partir de composants électroniques usagés - TME.eu., consulté le 1er mars 2026. <https://www.tme.com/us/en-us/news/library-articles/page/63934/modern-methods-of-silicon-recovery-from-used-electronic-components/>
 76. Déchets électroniques | SMaRT@UNSW - UNSW Sydney, consulté le 1er mars 2026 <https://www.smart.unsw.edu.au/technologies-products/microfactorie-technologies/e-waste>
 77. Technologies & Products - SMaRT@UNSW, consulté le mars 1, 2026, <https://www.smart.unsw.edu.au/technologies-products>
 78. Des déchets aux ressources : une installation de recyclage inaugurée pour donner une nouvelle vie aux déchets électroniques - UNSW Sydney, consulté le 1er mars 2026. <https://www.unsw.edu.au/newsroom/news/2025/03/world-first-UNSW-designed-recycling-facility-launch>
 79. MICROfactorie technologies - SMaRT@UNSW, consulté le mars 1, 2026, <https://www.smart.unsw.edu.au/technologies-products/microfactorie-technologies>
 80. Green Ceramics video - SMaRT@UNSW, consulté le mars 1, 2026, <https://www.smart.unsw.edu.au/news-events/news/green-ceramics-video>
 81. Le minage de Bitcoin est-il rentable ou intéressant en 2026 ? - West Valley Utah News, consulté le 1er mars 2026. <https://pr.wvcjournal.com/article/Is-Bitcoin-Mining-Profitable-or-Worth-it-in-2026?storyId=69a087abe72bed00021e41b9>
 82. Australian Scrap market analysis, consulté le mars 1, 2026, https://acor.org.au/wp-content/uploads/2023/06/acor_scrap_market_analysis.pdf
 83. Le recyclage des déchets électroniques est-il réellement avantageux pour les gens ? - Reddit, consulté le 1er mars 2026. https://www.reddit.com/r/wastemanagement/comments/1qboiqk/do_people_actually_get_value_from_electronic/

84. Analyse coûts-avantages des options pour une interdiction de la mise en décharge des déchets électroniques en Australie-Occidentale - Ministère de l'Eau et de la Réglementation environnementale - Citizen Space, consulté le 1er mars 2026. https://consult.dwer.wa.gov.au/waste-policy/ban-on-e-waste-disposal-to-landfill-in-western-aus/user_uploads/cost-benefit-analysis-of-options-for-an-e-waste-landfill-ban-in-wa.pdf
85. IREN August 2025 Monthly Update, consulté le mars 1, 2026, <https://irisenergy.gcs-web.com/news-releases/news-release-details/iren-august-2025-monthly-update>
86. IREN Deep Dive: Profitable Bitcoin Mining Powering AI Infrastructure - MLQ.ai, consulté le mars 1, 2026, <https://mlq.ai/research/iren-deep-dive-profitable-bitcoin-mining-powering-ai-infrastructure/>
87. Iris Energy Limited (IREN) : Analyse approfondie de sa croissance à double moteur dans le minage de Bitcoin et les services cloud d'IA - Markets - The Chronicle-Journal, consulté le 1er mars 2026. <https://markets.chroniclejournal.com/chroniclejournal/article/predictstreet-2025-10-4-iris-energy-limited-iren-a-deep-dive-into-its-dual-engine-growth-in-bitcoin-mining-and-ai-cloud-services>