

Valeur Thermodynamique : Réconcilier le Consensus de Nakamoto avec l'Énergie d'Odum et la Monnaie Idéale de Nash

Pascal Ranaora*

Information Physics Institute - Chercheur Indépendant, Sydney, Australie

Abstract

L'économie dominante a longtemps fonctionné comme un système clos, ignorant les contraintes thermodynamiques mises en évidence par Nicholas Georgescu-Roegen [2]. Cet article propose une définition biophysique de la valeur monétaire, intégrant le concept d'*Énergie* (énergie incorporée) de Howard T. Odum au mécanisme cryptographique de preuve de travail introduit par Satoshi Nakamoto. Nous soutenons que Bitcoin fonctionne comme une **monnaie biophysique** en ancrant la base monétaire aux lois de la thermodynamique, en particulier le Principe de Puissance Maximale. De plus, nous démontrons que cet étalon adossé à l'énergie satisfait aux conditions de la "Monnaie Idéale Asymptotique" de John Nash [6], fournissant une métrique de valeur stable et résistante à la corruption. Enfin, nous discutons des implications de cette monnaie thermodynamique dans le contexte de l'économie de la décroissance et de la post-croissance [8], en suggérant qu'une masse monétaire finie est un prérequis pour une économie finie.

Keywords: Économie Biophysique, Bitcoin, Énergie, Entropie, Monnaie Idéale, Décroissance

1. Introduction : Le Schisme Thermodynamique

La pathologie centrale de l'Anthropocène n'est pas seulement industrielle ; elle est monétaire. Depuis un demi-siècle, l'économie mondiale fonctionne sur un système de monnaie "fiat" — une monnaie créée par décret, détachée de la réalité physique. Cela a créé un schisme ontologique fondamental : alors que la biosphère fonctionne selon les lois strictes et non négociables de la thermodynamique [2], le système financier opère sur une logique d'élasticité infinie et d'expansion

*Auteur correspondant

Email address: pascal.ranaora@informationphysicsinstitute.net (Pascal Ranaora)

abstraite. Cet article postule que la crise environnementale est, à la base, une crise comptable. Lorsque l'unité de compte (la monnaie) peut être étendue sans dépense d'énergie correspondante, les signaux de prix se détachent des contraintes physiques. Ce détachement alimente un "impératif de croissance" qui ignore la loi de l'entropie, conduisant à l'épuisement rapide des stocks à faible entropie (ressources) et à l'accumulation de flux à forte entropie (pollution).

1.1. La Critique Biophysique et le Problème du Stockage

Les économistes écologiques ont depuis longtemps reconnu cette dissonance. [13] et plus tard [1] ont soutenu que la monnaie agit comme un droit de tirage sur l'énergie. Si ces droits croissent de manière exponentielle (via les intérêts composés et l'émission de dette) alors que le flux d'énergie du soleil reste constant, une rupture est inévitable. Pour résoudre cela, des chercheurs comme Howard T. Odum ont proposé "l'Étalon-Énergie" — une monnaie basée sur le Joule ou le Watt-heure. La logique était saine : si la monnaie représente l'énergie, personne ne peut réclamer plus de richesse que l'écosystème ne peut en fournir. Cependant, cette proposition s'est heurtée à un obstacle logistique insurmontable : **L'énergie est difficile à stocker et à transporter sans perte.** La deuxième loi de la thermodynamique dicte que l'énergie se dissipe. Une monnaie basée sur l'électricité stockée (batteries) "pourrait" (perdrait sa charge), ce qui en ferait une mauvaise réserve de valeur comparée à l'or inerte ou à la monnaie fiat abstraite.

1.2. La Transformation de Nakamoto

Cet article explore l'hypothèse selon laquelle la solution à ce dilemme biophysique est apparue le 31 octobre 2008, non pas dans le domaine de l'économie, mais dans celui de la cryptographie. L'invention par Satoshi Nakamoto du mécanisme de consensus par "Preuve de Travail" (Proof-of-Work) [5] fournit le pont technologique manquant. En exigeant une dépense vérifiable d'énergie (cycles CPU) pour écrire dans un registre, Nakamoto n'a pas créé une nouvelle forme de stockage d'énergie ; il a créé un mécanisme pour *cristalliser* l'énergie en information. Ce processus transforme le travail cinétique et électrique en durabilité numérique, créant effectivement une "marchandise synthétique" dont le ratio stock-flux est régi par la physique plutôt que par la politique.

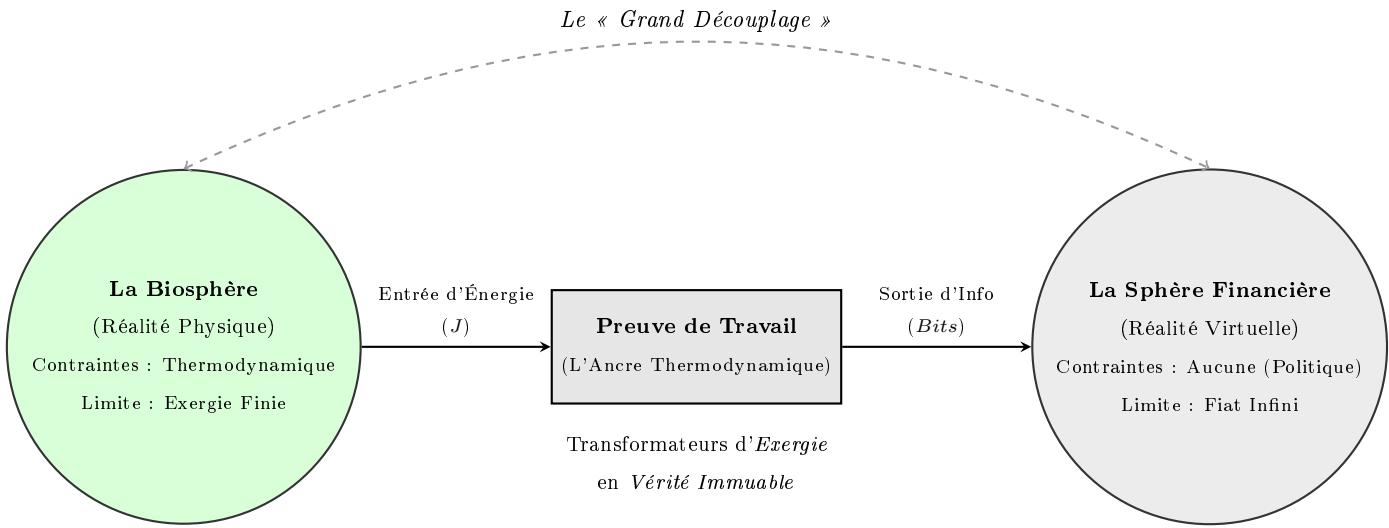


Figure 1: Le Pont de Nakamoto : Reconnecter les Sphères Financière et Biophysique via la Preuve de Travail Thermodynamique.

1.3. Champ d'Investigation

Nous soutenons que Bitcoin fonctionne comme une monnaie "biosphérique" en ancrant la base monétaire au Principe de Puissance Maximum [7]. De plus, nous démontrons que cet étalon adossé à l'énergie satisfait aux conditions de la "Monnaie Idéale Asymptotique" de John Nash [6], fourni ssant une métrique de valeur résistante à la corruption qui est compatible avec une économie de post-croissance ou d'état stationnaire [8]. Les sections suivantes formaliseront la relation entre le Hashrate, l'Énergie et la Stabilité Économique.

40 2. Thermodynamique et Valeur Économique

La proposition fondamentale de l'économie biophysique est que le processus économique n'est pas une boucle fermée d'échange abstrait de valeur, mais un système thermodynamique ouvert encastré dans la biosphère [2]. Pour définir rigoureusement la "valeur" sans interférence politique, nous devons nous replier sur les lois absolues de la physique.

45 2.1. *La Constitution Thermodynamique*

L'économie néoclassique traditionnelle modélise l'économie comme un pendule oscillant vers l'équilibre. En contraste, la bioéconomie traite l'économie comme une structure dissipative. Nous postulons qu'un système monétaire sain doit être compatible avec les quatre lois fondamentales de la thermodynamique :

- 50 1. **Le Principe Zéro (Équilibre)** : Si deux systèmes sont en équilibre thermique avec un troisième système, ils sont en équilibre l'un avec l'autre. *Corollaire Économique* : La découverte des prix agit comme mécanisme d'équilibrage. Cependant, dans un système fiat, le "troisième système" (le registre de la banque centrale) est variable, empêchant un véritable équilibre entre les biens et la monnaie.
- 55 2. **La Première Loi (Conservation)** : L'énergie ne peut être ni créée ni détruite, seulement transformée.

$$\Delta U = Q - W \quad (1)$$

Où ΔU est la variation de l'énergie interne, Q est la chaleur ajoutée, et W est le travail effectué. *Corollaire Économique* : La valeur ne peut pas être créée *ex nihilo*. L'émission de monnaie fiat ($\Delta M > 0$) sans dépense d'énergie correspondante ($\Delta E = 0$) viole la conservation de la valeur, entraînant la dilution des créances existantes (inflation).

- 60 3. **La Deuxième Loi (Entropie)** : L'entropie d'un système isolé augmente toujours.

$$\Delta S_{total} \geq 0 \quad (2)$$

Corollaire Économique : Toute activité économique produit des déchets. Les déchets à haute entropie sont le sous-produit inévitable de la mise en ordre des ressources à basse entropie. Un système monétaire qui exige une croissance infinie sur une planète finie ignore la barrière de l'entropie décrite par [2].

- 65 4. **La Troisième Loi (Zéro Absolu)** : L'entropie d'un système s'approche d'une valeur constante à mesure que la température s'approche du zéro absolu. *Corollaire Économique* : L'information parfaite (entropie nulle) nécessite une énergie infinie pour être acquise. Le mécanisme de consensus de Bitcoin reconnaît cela en exigeant une dépense d'énergie strictement non nulle pour approximer un historique de registre "vrai".

2.2. L'Énergie d'Odum et l'Emjoule Solaire (sej)

Alors que la thermodynamique décrit les contraintes, Howard T. Odum a fourni la métrique comptable : **L'Énergie** (Écrite avec un 'm', pour "Energy Memory" / Mémoire Énergétique). Odum a soutenu que toutes les formes d'énergie ne sont pas égales. Un Joule de lumière solaire n'est pas équivalent à un Joule d'électricité, ni à un Joule de travail humain. Pour les comparer, nous devons retracer toute énergie jusqu'à sa source : le Soleil. Cela nous donne l'**Emjoule Solaire (sej)**.

2.2.1. Définition de l'Unité

L'Emjoule Solaire est l'unité d'énergie disponible (exergie) d'un type (généralement solaire) qui est requise, directement et indirectement, pour fabriquer un produit ou un service. La relation est définie par la **Transformité** (τ), qui mesure la "qualité" ou la concentration de l'énergie :

$$Em = \sum_{i=1}^n (E_i \times \tau_i) \quad (3)$$

Où :

- Em est l'Énergie (en sej).
- E_i est l'énergie disponible de l'intrant i (en Joules).
- τ_i est la Transformité de l'intrant i (en sej/J).

Par exemple, les transformités moyennes mondiales sont approximativement :

- Lumière Solaire : 1 sej/J (Par définition).
- Énergie Chimique (Charbon) : $\approx 40,000 sej/J$.
- Énergie Électrique : $\approx 160,000 sej/J$.

90 2.3. Le Principe de Puissance Maximum comme Consensus

Odum a proposé une "Quatrième Loi" de la thermodynamique pour les systèmes auto-organisés : le **Principe de Puissance Maximum**. Il stipule que les systèmes qui prévalent sont ceux qui développent des conceptions pour maximiser l'absorption d'énergie et l'utiliser efficacement.

$$P_{max} = \frac{d(Em)}{dt} \quad (4)$$

L'algorithme de Preuve de Travail de Bitcoin est une application directe de ce principe. Le réseau
95 crée un marché compétitif pour l'énergie "échouée" ou "gaspillée" (haute entropie), l'améliorant en "espace de registre immuable" (basse entropie). L'Algorithme d'Ajustement de la Difficulté garantit que le système s'organise pour absorber le maximum de puissance disponible afin de sécuriser son historique.

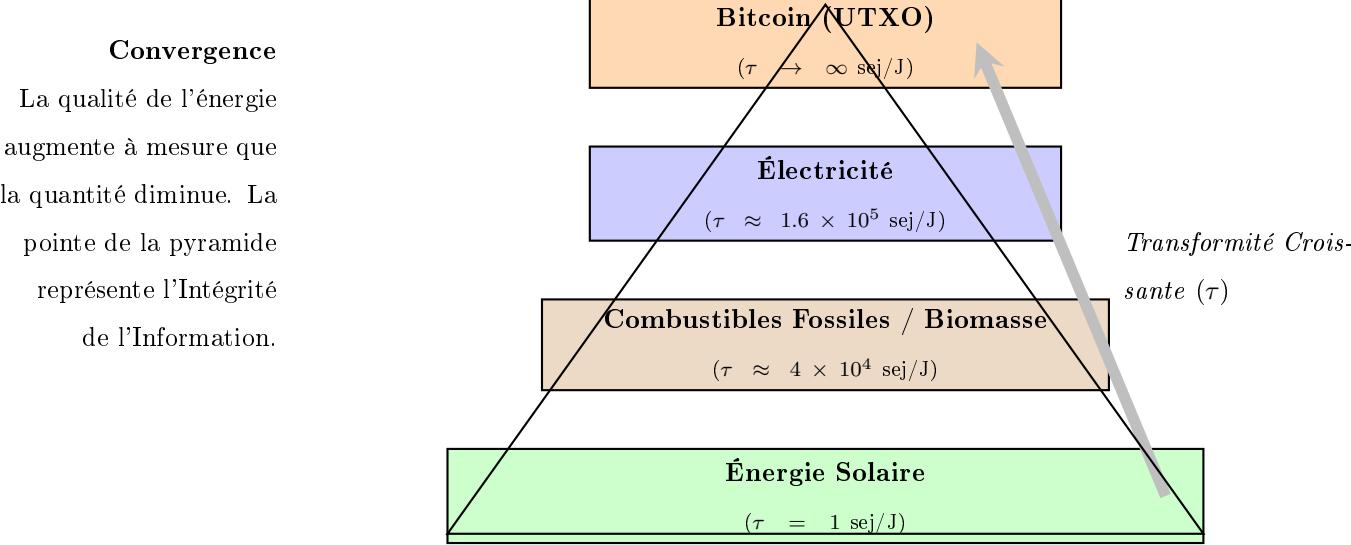


Figure 2: La Hiérarchie Énergétique d'Odum appliquée aux Actifs Cryptographiques. Bitcoin se situe au sommet, représentant la plus forte concentration de "Mémoire Énergétique" (Énergie) par unité d'information.

En analysant Bitcoin à travers le prisme d'Odum, nous conceptualisons sa transformité :

$$\tau_{BTC} \propto \frac{\text{Entrée Totale d'Emergy (sej)}}{\text{Sortie d'Information (Satoshis)}} \quad (5)$$

100 Cela établit Bitcoin non pas comme une monnaie "virtuelle", mais comme **l'une des matières premières les plus denses en énergie de l'histoire de la civilisation humaine.**

2.4. Calcul de la Bit-Énergie : Dérivation de τ_{BTC}

Pour valider l'affirmation selon laquelle Bitcoin est un étalon énergétique, nous devons passer de la description qualitative à l'analyse quantitative. Nous appliquons l'*Algèbre de l'Énergie* d'Odum pour calculer la transformité spécifique de la production du réseau. Nous définissons le "produit"
105

du réseau Bitcoin non pas comme les blocs eux-mêmes (qui ne sont que des conteneurs), mais comme l'**ensemble des Sorties de Transactions Non Dépensées (UTXO)** — l'état sécurisé du registre. La plus petite unité de cet état est le Satoshi (10^{-8} BTC).

2.4.1. La Dérivation de la Transformité

¹¹⁰ La Transformité d'un Satoshi, notée τ_{sat} , est le rapport entre l'afflux total d'Énergie du système et la production informationnelle spécifique.

$$\tau_{sat} = \frac{\dot{E}_{net} \times \tau_{elec}}{\dot{Q}_{BTC}} \quad (6)$$

Où :

- \dot{E}_{net} est la consommation d'énergie continue du réseau (Watts ou Joules/sec).
- τ_{elec} est la transformité solaire du mix électrique alimentant le réseau (sej/J).
- \dot{Q}_{BTC} est le taux d'émission de nouvelles unités (Satoshis/sec).

¹¹⁵ Cependant, parce que le taux d'émission (\dot{Q}_{BTC}) est fondamentalement déflationniste (réduit de moitié tous les 210 000 blocs), tandis que l'apport énergétique a tendance à augmenter ou à se stabiliser, la transformité de Bitcoin est conçue pour augmenter de manière asymptotique au fil du temps. Cela en fait une réserve de valeur *hyper-déflationniste* en termes thermodynamiques.

¹²⁰ *La Transition vers le Marché des Frais (Fee Market).* Un scepticisme légitime concerne la pérennité de cette transformité lorsque $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{Q}_{BTC} = 0$. Il est crucial de préciser que dans notre modèle, l'apport énergétique global (E_{net}) ne s'effondrera pas avec la fin de la subvention de bloc. À mesure que l'émission se tarit, la sécurité thermodynamique sera maintenue par la vitesse et le coût de l'espace de bloc (les frais de transaction). L'espace de bloc étant strictement limité, la demande pour enregistrer des informations sur ce registre biocentrique prendra le relais de la subvention, maintenant ainsi la barrière d'Énergie.

2.4.2. Estimation Empirique (Époque 2026)

Nous utilisons les conditions aux limites et les points de données caractéristiques suivants de l'ère post-4ème Halving (2024-2028) :

Paramètre	Symbole	Valeur (Approx)
Hashrate du Réseau	H	650 EH/s ($6.5 \times 10^{20} \text{ h/s}$)
Efficacité Moy. du Parc	η	26 J/TH ($2.6 \times 10^{-11} \text{ J/h}$)
Transformité Réseau Mondial	τ_{elec}	$2.0 \times 10^5 \text{ sej/J}$ [7]
Récompense de Bloc	R	3.125 BTC
Intervalle de Bloc	t	600 secondes

Table 1: Paramètres thermodynamiques pour le Réseau Bitcoin (2026).

¹³⁰ *Étape 1 : Calcul de la Consommation Totale d'Énergie (P).* La consommation d'énergie est le produit du nombre total de hachages par seconde et des joules requis par hachage.

$$P = H \times \eta \quad (7)$$

$$P = (6.5 \times 10^{20} \text{ h/s}) \times (2.6 \times 10^{-11} \text{ J/h}) = 1.69 \times 10^{10} \text{ W} \approx 16.9 \text{ GW} \quad (8)$$

Étape 2 : Calcul de l'Énergie par Bloc (E_{block}). Sur l'intervalle standardisé de blocs de 10 minutes ($t = 600s$) :

$$E_{block} = P \times t = 1.69 \times 10^{10} \text{ J/s} \times 600 \text{ s} = 1.014 \times 10^{13} \text{ Joules} \quad (9)$$

¹³⁵ Pour mettre cela en perspective, sécuriser un seul bloc nécessite l'équivalent énergétique d'environ 1,7 kilotonne de TNT, ou la consommation électrique quotidienne d'une petite ville.

¹⁴⁰ *Étape 3 : Conversion en Emjoules Solaires (Em_{block}).* Nous appliquons maintenant le facteur de transformité. Puisque l'électricité est un vecteur énergétique de haute qualité dérivé de sources de moindre qualité (charbon, hydroélectricité, solaire), nous multiplions par τ_{elec} (environ $2.0 \times 10^5 \text{ sej/J}$).

$$Em_{block} = E_{block} \times \tau_{elec} \quad (10)$$

$$Em_{block} = (1.014 \times 10^{13} \text{ J}) \times (2.0 \times 10^5 \text{ sej/J}) = 2.028 \times 10^{18} \text{ sej} \quad (11)$$

Étape 4 : L'Énergie Solaire d'un Satoshi. Enfin, nous distribuons cette "Mémoire Énergétique" massive sur l'offre nouvellement émise. La récompense de bloc est de 3.125 BTC, ce qui équivaut à 3.125×10^8 Satoshis.

$$\text{sej/sat} = \frac{Em_{block}}{3.125 \times 10^8} \quad (12)$$

145

$$\text{sej/sat} = \frac{2.028 \times 10^{18}}{3.125 \times 10^8} \approx 6.49 \times 10^9 \text{ sej/sat} \quad (13)$$

2.4.3. Résultat et Interprétation

Notre calcul donne un résultat saisissant :

1 Satoshi \approx 6,5 Milliards d'Emjoules Solaires

Ce nombre est le "Prix Thermodynamique" de la monnaie. Il représente la quantité de lumière solaire ancienne, de pression géologique et de raffinage industriel requise pour forger une seule unité de vérité numérique. Contrairement à la monnaie fiat, où le coût de production est négligeable (de l'encre sur du papier ou des décalages d'entiers dans une base de données SQL), le Satoshi possède un "poids" biophysique intrinsèque. Dans la hiérarchie d'Odum, cela place Bitcoin loin au-dessus de l'or ($\tau_{or} \approx 10^9$ sej/g) en termes de densité énergétique. C'est, effectivement, de la *lumière solaire cristallisée*.

Cette haute transformité explique la "Dureté" de la monnaie. Pour forger un bloc contrefait, un attaquant doit générer une quantité équivalente d'Énergie (10^{18} sej), une tâche qui devient exponentiellement plus difficile à mesure que le réseau évolue, satisfaisant ainsi l'exigence d'irréversibilité de la Deuxième Loi de la Thermodynamique.

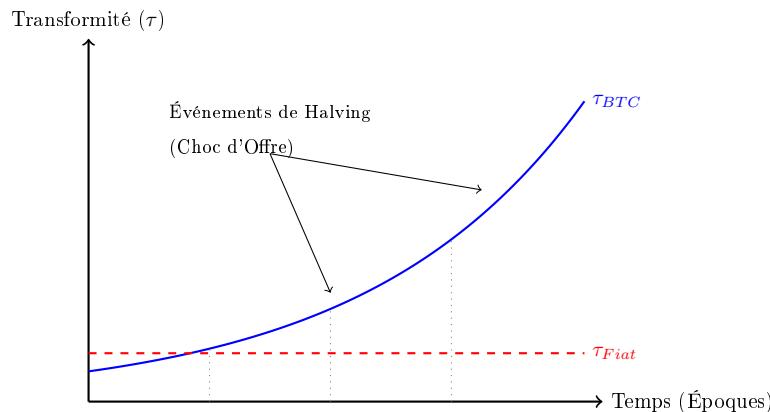


Figure 3: Les trajectoires divergentes de la Transformité Monétaire. À mesure que la subvention est divisée par deux, l'énergie par unité (Énergie) double, créant une pression à la hausse sur la valeur thermodynamique.

¹⁶⁰ 2.4.4. Tableau Comparatif de Transformité

Pour contextualiser le "poids" thermodynamique d'un Satoshi, nous comparons sa transformité (τ) à des références biophysiques standard fournies par [7] et des audits énergétiques récents de la blockchain.

Type de Ressource	Transformité (τ) [sej/J]	Description Thermodynamique
Insolation Solaire	1.0	L'unité de base. Basse qualité, haute entropie.
Énergie Éolienne	$\approx 1.5 \times 10^3$	Concentration cinétique des gradients de chaleur solaire.
Combustibles Fossiles (Charbon)	$\approx 4.0 \times 10^4$	Compression géologique de la biomasse ancienne.
Énergie Électrique	$\approx 1.7 \times 10^5$	Vecteur énergétique raffiné, basse entropie.
Or (Extraction)	$\approx 3.4 \times 10^9$	Rareté crustale élevée, coût d'extraction mécanique.
Travail Humain	$\approx 6.8 \times 10^6$	Complexité métabolique et investissement éducatif.
Monnaie Fiat (\$)	$\approx 1.0 \times 10^2$	Négligeable. Coût du papier/encre ou des ticks de serveur.
Bitcoin (2026)	$\approx 6.5 \times 10^9$	L'apex. Information pure sécurisée par la convergence électrique mondiale.

Table 2: La Hiérarchie de la Qualité de l'Énergie. Notez que Bitcoin surpassé l'Or en transformité, indiquant qu'il est une réserve de valeur plus "condensée" par unité.

2.5. Action de Nakamoto et Mise à l'Échelle Dimensionnelle

¹⁶⁵ Le calcul statique de τ_{BTC} se heurte à un paradoxe physique : à mesure que la lithographie des semi-conducteurs s'améliore selon la loi de Moore (et s'approche de la limite de Landauer), les joules requis par hash (η) diminuent de manière exponentielle. Pour prouver que le réseau maintient sa densité thermodynamique en dépit des avancées matérielles, nous devons formaliser le couplage

énergie-temps du système.

¹⁷⁰ Afin d'établir un isomorphisme physique strict et de définir l'échelle énergétique du système, nous introduisons la constante fondamentale de cette théorie, l'**Action de Nakamoto** (κ_N). Cette constante possède les dimensions strictes d'une action physique ($J \cdot s$).

¹⁷⁵ Par analogie avec la relation de Planck ($E = h\nu$), nous relions l'**Énergie d'État** macroscopique effective $E_{eff}(t)$ du réseau de consensus à sa fréquence calculatoire globale, le Hashrate $\nu(t)$ (mesuré en s^{-1}) :

$$E_{eff}(t) = \kappa_N(t) \cdot \nu(t) \quad [\text{Joules}] \quad (14)$$

Ici, la dimensionnalité est strictement cohérente : $(J \cdot s) \times (s^{-1}) = \text{Joules}$. L'Action de Nakamoto $\kappa_N(t)$ agit comme une constante de couplage courante qui reflète l'efficacité thermodynamique de la couche matérielle sous-jacente, s'ajustant à la baisse à mesure que l'efficacité du matériel s'améliore.

¹⁸⁰ Nous pouvons alors définir formellement l'**Action de Consensus** \mathcal{S}_{PoW} , évaluée le long de l'historique de la chaîne \mathcal{C} , comme l'intégrale temporelle de cette énergie effective :

$$\mathcal{S}_{PoW} = \int_{\mathcal{C}} E_{eff}(t) dt = \int_{\mathcal{C}} \kappa_N(t) \cdot \nu(t) dt \quad [J \cdot s] \quad (15)$$

¹⁸⁵ Cette formulation démontre que le registre ne se contente pas d'accumuler des blocs de données discrets ; il accumule de l'**Action**. En dissipant de la chaleur, le protocole abaisse l'entropie logique du système. La "Chaîne la plus lourde" (Heaviest Chain) est donc physiquement équivalente à la trajectoire de phase qui maximise cette action accumulée, créant une barrière thermodynamique infranchissable contre la réorganisation de l'historique, indépendamment des futures efficacités matérielles.

2.5.1. Le Profil de Transformité Mixte

¹⁹⁰ De plus, à mesure que $\kappa_N(t)$ diminue, le coût marginal de production du réseau pousse les mineurs à rechercher l'énergie la moins chère possible. Comme discuté dans la Section 4, il s'agit principalement d'énergie fatale (surplus non valorisable). Par conséquent, le τ_{elec} utilisé dans notre calcul d'Energy (Équation 6) n'est pas une moyenne statique du réseau électrique, mais un ratio dynamique et mixte :

$$\tau_{mix}(t) = (\omega_{reseau} \times \tau_{reseau}) + (\omega_{fatale} \times \tau_{fatale}) \quad (16)$$

Où ω représente la proportion adimensionnelle du mix énergétique du réseau, soumise à la contrainte $\omega_{reseau} + \omega_{fatale} = 1$. Étant donné que $\tau_{fatale} \ll \tau_{reseau}$, le réseau agit comme un charognard en-

¹⁹⁵ tropique, chassant activement l'énergie résiduelle à faible transformité pour la traiter en information immuable à haute transformité (τ_{BTC}).

3. Stabilité Asymptotique : De Nash à Nakamoto

Alors qu'Odum fournit le cadre physique pour la valeur, le lauréat du prix Nobel John Nash a fourni le cadre de la théorie des jeux pour la stabilité. Dans sa conférence fondatrice "Ideal Money" [6], Nash a critiqué le régime post-1971 des monnaies fiat flottantes, arguant que la monnaie sujette à la "falsification politique" empêche un véritable équilibre coopératif.

3.1. La Quête de l'Indice de Consommation Industrielle (ICI)

Nash a soutenu que la valeur d'une monnaie ne devrait pas être ciblée par rapport à un indice des prix à la consommation (IPC) — qui est facilement manipulable en substituant des biens — mais par rapport à un "panier standardisé de marchandises". Il a appelé cela l'**Indice de Consommation Industrielle (ICI)**.

Sa logique était que le coût de la production industrielle mondiale est la seule métrique "réelle" de la valeur. Cependant, il a été confronté à un problème : la construction d'un tel indice nécessite une autorité centrale internationale pour le mesurer, ce qui réintroduit le problème de l'"agent politique" (Le Dilemme de Triffin).

3.2. L'Ajustement de la Difficulté comme ICI Décentralisé

Nous postulons que Satoshi Nakamoto a résolu le problème de Nash en l'inversant. Au lieu qu'une banque centrale mesure le coût d'un panier de biens, le réseau Bitcoin *devient* le panier. L'**Algorithmus d'Ajustement de la Difficulté (D)** agit comme un arpenteur implacable et autonome des coûts énergétiques mondiaux.

$$D_{new} = D_{old} \times \frac{T_{actual}}{T_{target}} \quad (17)$$

Où T_{target} est fixé à 2016 blocs (environ 2 semaines). Si le coût mondial de l'énergie baisse (la technologie s'améliore), les mineurs ajoutent du hashrate, et la Difficulté augmente. Si le coût de l'énergie augmente, les mineurs capitulent, et la Difficulté diminue. Par conséquent, la **Difficulté est une approximation du coût marginal de la production d'énergie à l'échelle mondiale**.

²²⁰ Puisque l'énergie est le principal intrant pour toute consommation industrielle, le coût de production de Bitcoin suit efficacement l'ICI de Nash sans nécessiter d'autorité centrale. C'est une monnaie *auto-indexée*.

²²⁵ *Distinction entre Valeur Thermodynamique et Prix Spéculatif.* Bien que le réseau agisse comme un Indice de Consommation Industrielle, la volatilité extrême du prix du Bitcoin sur les marchés d'échange semble contredire cette stabilité. Cette contradiction n'est qu'apparente. Il est impératif de distinguer la **valeur thermodynamique** (qui est une fonction cumulative et stable de l'Émergie) du **prix spéculatif** (qui est mesuré par rapport à des monnaies fiat élastiques). La volatilité actuelle n'est pas un attribut intrinsèque du réseau, mais le symptôme d'une transition de phase historique entre un système de valeur subjectif et un système de valeur objectif.

²³⁰ *3.3. L'Idéalité Asymptotique*

Nash n'a pas prétendu que la monnaie pouvait être instantanément parfaite. Il a utilisé le terme "Asymptotiquement Idéale." Il décrivait une monnaie qui, au fil du temps, réduirait son taux d'inflation à zéro, forçant les autres monnaies à concurrencer ou à périr. Nous modélisons l'émission monétaire de Bitcoin comme une fonction limite discrète s'approchant de zéro :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dQ}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} S(t) = 21,000,000 \quad (18)$$

²³⁵ En économie keynésienne standard, une monnaie déflationniste est perçue comme une "trappe à liquidité." Dans la Théorie des Jeux Nashienne, c'est la **stratégie dominante**. Alors que le taux d'inflation de Bitcoin (π_{BTC}) s'approche de zéro et que le taux d'inflation des Fiats (π_{Fiat}) reste positif (généralement 2% – 10%), la "Loi de Gresham" s'inverse : la bonne monnaie (Bitcoin) chasse la mauvaise monnaie (Fiat) comme réserve de valeur.

²⁴⁰ *3.4. L'Équilibre de Nash de l'Honnêteté*

Pourquoi ce système est-il stable ? Pourquoi un mineur ne triche-t-il pas ? Nakamoto a conçu le protocole de sorte que le coût d'attaque du réseau (C_{attack}) soit toujours supérieur à la récompense potentielle (R_{attack}).

$$C_{attack} = \int_{t_0}^{t_1} \nu_{51\%}(t) \cdot \eta(t) \cdot c(t) dt \quad (19)$$

Où $\nu_{51\%}(t)$ est la fréquence calculatoire nécessaire pour obtenir la majorité, $\eta(t)$ est l'efficacité du matériel de minage (en J/h), et $c(t)$ est le coût marginal de l'énergie (coût/J).

Parce que le réseau fonctionne sur le Principe de Puissance Maximum (Section 2.3), le hashrate est si élevé que C_{attack} dépasse le PIB de la plupart des États-nations. Cela crée un **Équilibre de Nash** où le seul mouvement rationnel est de coopérer (miner honnêtement). Contrairement au "Dilemme du Prisonnier" où faire défection est souvent optimal, Bitcoin impose un "Dilemme du Mineur" où la coopération est mathématiquement renforcée par la thermodynamique.

Stabilité Monétaire / Qualité

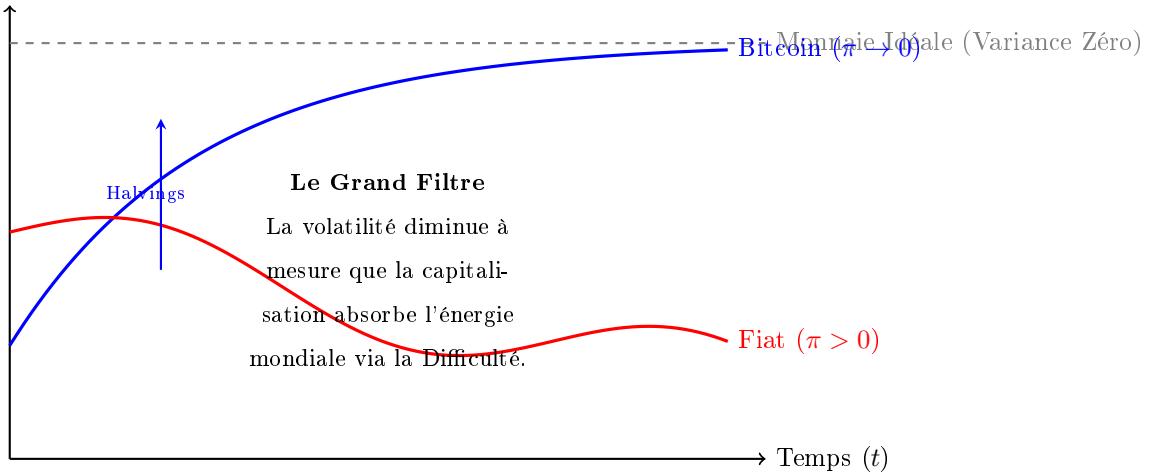


Figure 4: Visualisation de la "Monnaie Idéale Asymptotique" de Nash. Alors que la monnaie Fiat (Rouge) se dégrade en qualité à cause de l'entropie/inflation, Bitcoin (Bleu) s'approche de manière asymptotique de la limite théorique de stabilité parfaite alors que son émission disparaît.

3.5. Preuve Thermodynamique de l'Équilibre : L'Énergie Libre de Landau

Pour prouver que le réseau maintient naturellement cet équilibre de Nash, nous pouvons modéliser la dynamique du Hashrate en utilisant l'Énergie Libre de Landau. Comme l'a formellement démontré Paul Samuelson dans ses fondations mathématiques [10], et plus récemment l'éconophysique moderne [12], la recherche du profit maximum par les acteurs d'un marché est l'isomorphisme mathématique exact de la recherche de l'énergie minimum par un système physique (où le Profit $U \equiv -E$).

La dynamique du système est donc régie par la minimisation de la densité de potentiel effectif $V(\phi)$, où le paramètre d'ordre ϕ représente le Hashrate global :

$$V(\phi) = a|\phi|^2 + b|\phi|^4 \quad (20)$$

Il s'agit du potentiel standard utilisé en physique pour décrire les transitions de phase et les brisures spontanées de symétrie. Les coefficients sont déterminés par les forces économiques :

1. **Le Terme d'Instabilité ($a < 0$)** : Ce terme représente l'**Incitation au Minage** (Récompense de Bloc + Frais). Puisque la récompense rend le minage rentable, l'état $\phi = 0$ (un réseau à l'arrêt) est thermodynamiquement instable. Le système "repousse" le Hashrate loin de zéro.
2. **Le Terme de Saturation ($b > 0$)** : Ce terme représente le **Coût Thermodynamique** (Électricité + Dissipation Thermique + Matériel). Il est fondamental de noter que ce terme de friction quartique ($b|\phi|^4$) intègre explicitement l'entropie matérielle (l'usure, le remplacement des ASICs et la gestion des déchets électroniques). De plus, à mesure que l'efficacité des semi-conducteurs s'approche de la limite physique de Landauer, l'obsolescence technologique ralentit mécaniquement, allongeant la durée de vie du matériel et réduisant de manière asymptotique l'empreinte matérielle du réseau. Le terme quartique empêche le Hashrate de diverger vers l'infini.

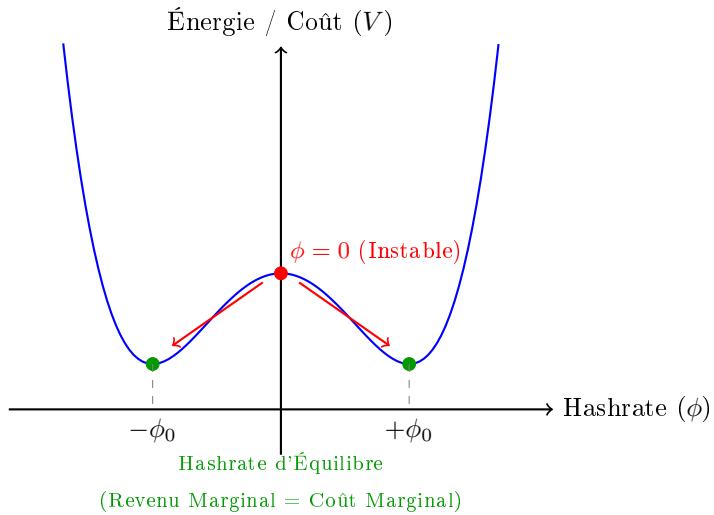


Figure 5: Le Potentiel de Landau modélisant la dynamique du Hashrate. L'incitation économique rend l'arrêt du réseau instable, forçant le système à s'effondrer dans un puits d'énergie stable (ϕ_0) où le coût d'attaque devient prohibitif.

Le réseau se relaxe et s'effondre inexorablement dans un état fondamental stable avec une valeur
275 d'équilibre ϕ_0 :

$$|\phi_0| = \sqrt{\frac{-a}{2b}} \propto \sqrt{\frac{\text{Incitation Économique}}{\text{Friction Thermodynamique}}} \quad (21)$$

Ce point d'équilibre $|\phi_0|$ est le **Hashrate d'Équilibre** du réseau. En termes microéconomiques,
c'est l'exact point où le Revenu Marginal égale le Coût Marginal. Cette modélisation prouve que
la sécurité de Bitcoin n'est pas une simple conjecture : elle est l'attracteur mathématique naturel
d'un système dissipatif. Le réseau acquiert ainsi une "masse" (une inertie sécuritaire) qui rend la
280 réorganisation de l'historique physiquement insurmontable.

3.6. Implications pour le Dilemme de Triffin

Le système de réserve mondial actuel repose sur le Dollar Américain, créant le Dilemme de Triffin (un conflit entre la politique intérieure et la liquidité mondiale). Nash voyait la "Monnaie Idéale" comme un standard apolitique neutre.

285 Bitcoin, en se liant à la constante universelle de l'énergie, supprime le "Privilège Exorbitant" de toute nation unique. Il devient une métrique neutre et géodésiquement saine pour le règlement du commerce international — un *Bancor Énergétique* — réalisant la vision que Keynes avait en 1944 mais n'avait pas réussi à mettre en œuvre en raison des frictions politiques.

3.7. Topologie du Réseau : Résilience et Graphe Petit Monde

290 Bien que la thermodynamique garantisse le coût de la sécurité (Section 3.5), c'est la topologie du réseau pair-à-pair (P2P) qui assure sa résilience face aux perturbations géopolitiques ou infrastructurelles. Le réseau d'information de Bitcoin opère selon la dynamique d'un **Graphe Petit Monde** (Modèle de Watts-Strogatz).

Cette architecture se caractérise par deux propriétés physiques et mathématiques fondamentales
295 :

1. **Un fort coefficient de regroupement (Clustering)** : Les noeuds forment des grappes locales hautement interconnectées, assurant une redondance massive de l'information au niveau régional.
2. **Une distance moyenne très courte (Shortcuts)** : Quelques connexions aléatoires à longue distance relient des grappes éloignées. En moyenne, une transaction ou un nouveau bloc peut atteindre n'importe quel noeud du globe en seulement quelques sauts (hops).

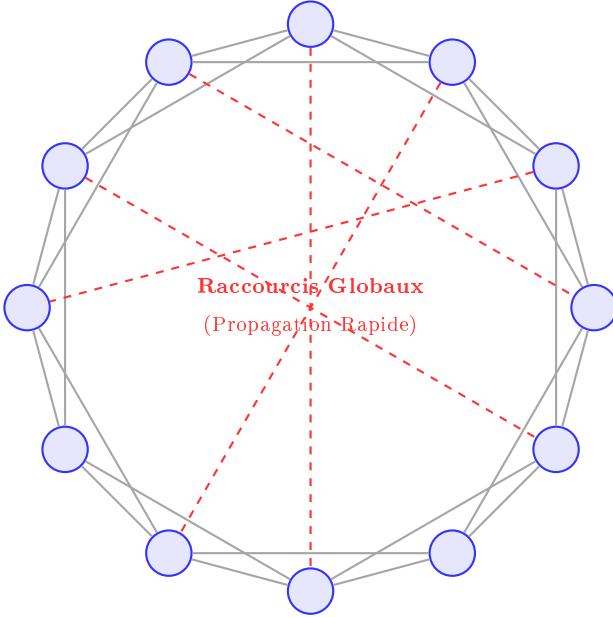


Figure 6: La topologie en "Petit Monde" du réseau Bitcoin. Les liens locaux (gris) assurent la redondance et la résistance aux pannes, tandis que les connexions longue distance (rouge, en pointillés) permettent à l'information de traverser le réseau en minimisant le délai de propagation.

D'un point de vue éconophysique, cette topologie est une nécessité absolue pour minimiser la dissipation entropique. Un délai de propagation de l'information trop long entraînerait des désaccords fréquents sur l'état de la chaîne, générant un taux élevé de "blocs orphelins" (de l'énergie dépensée en vain qui n'ajoute aucune sécurité à l'historique principal).

La structure en "Petit Monde" garantit une convergence quasi instantanée du consensus à l'échelle planétaire. De plus, elle confère au réseau une véritable antifragilité face aux attaques étatiques : la suppression arbitraire ou la censure d'un grand nombre de nœuds (par exemple, lors d'une coupure internet localisée) n'isole jamais totalement le reste du système, car les raccourcis globaux survivants suffisent à maintenir la cohésion et la synchronisation de l'ensemble du registre.

4. Monnaie Biophysique : Économie de la Décroissance et Accélération de la Transition Renouvelable

La critique dominante de la Preuve de Travail (PoW) est que sa consommation d'énergie est "gaspillée" et incompatible avec les objectifs climatiques. Cependant, cette vue repose sur une anal-

³¹⁵ yse statique qui ignore la relation dynamique entre la charge flexible et l'économie de la production d'énergie. La littérature empirique récente suggère que le minage de Bitcoin n'agit pas comme un parasite, mais comme une *Charge Catalytique* — un acheteur en dernier ressort unique qui résout les problèmes d'"Intermittence" et de "Cannibalisation" inhérents aux réseaux d'énergies renouvelables. Du point de vue de [8], alors que l'économie globale doit décroître, des secteurs spécifiques ³²⁰ (comme la capacité d'énergie verte) doivent croître rapidement. Bitcoin fournit le mécanisme de marché pour financer cette croissance spécifique sans nécessiter de subventions étatiques.

4.1. Résoudre la "Vallée de la Mort" du Financement Renouvelable

Le principal obstacle au déploiement des énergies renouvelables n'est pas la technologie, mais la finance. Les projets solaires et éoliens font souvent face à un "Effet de Cannibalisation" où une forte production est corrélée avec des prix d'électricité bas (ou négatifs), détruisant l'économie unitaire du projet. [3] a démontré que la co-localisation du minage de Bitcoin avec des installations solaires modifie considérablement le profil financier de l'infrastructure verte. En monétisant l'énergie excédentaire qui serait autrement perdue, le minage agit comme un prix plancher. Leurs données indiquent que le minage intégré réduit la période de retour sur investissement (ROI) des fermes solaires de **8,1 ans à 3,5 ans**. Cette liquidité accélérée attire des capitaux privés qui étaient auparavant averses au risque, accélérant efficacement le rythme de la transition.

$$R_{Project} = \int_{t_0}^{t_{end}} (P_{Grid}(t) \times Q_{Grid}(t) + P_{BTC}(D, H) \times Q_{Curtail}(t)) dt \quad (22)$$

Où $Q_{Curtail}$ représente l'énergie qui aurait été gaspillée (valeur = 0) mais qui est maintenant convertie en actifs numériques (valeur > 0).

L'Évitement du Paradoxe de Jevons. Une critique courante suggère que l'appétit énergétique du réseau pourrait relancer des infrastructures fossiles obsolètes (le Paradoxe de Jevons). Cependant, cette vue ignore la nature à "somme nulle" de l'Ajustement de la Difficulté. Les mineurs opèrent dans une compétition mondiale impitoyable. À mesure que le Hashrate augmente, les mineurs branchés sur des énergies fossiles coûteuses sont mathématiquement évincés par ceux qui monétisent de l'énergie fatale ou excédentaire (dont le coût marginal est proche de zéro). Le réseau ne se contente pas de consommer de l'énergie ; il chasse activement l'énergie à la transformité la plus basse, agissant comme un filtre darwinien en faveur des énergies renouvelables.

4.2. L'Atténuation du Méthane : L'Énigme des Émissions Négatives

Au-delà de la neutralité CO₂, Bitcoin offre un mécanisme unique pour l'atténuation du méthane (CH₄). Le méthane a un potentiel de réchauffement 80x supérieur à celui du CO₂ sur une période de 20 ans. Les décharges et les puits de pétrole éloignés évacuent ou brûlent souvent le méthane (tor-chage) car sa capture n'est pas rentable en raison du manque de demande locale ou d'infrastructures de pipelines. [11] et [9] identifient le minage de Bitcoin comme la seule charge industrielle modulaire et agnostique quant à son emplacement capable de monétiser ce gaz échoué sur place. En brûlant le méthane dans un générateur pour alimenter les plateformes de minage (convertissant le CH₄ en CO₂), le processus réduit le Potentiel de Réchauffement Global (GWP) des émissions d'environ 63% tout en générant un profit. [4] catégorise cela comme une "informatique à carbone négatif", permettant une incitation financière pour nettoyer la biosphère que les seuls crédits carbone n'ont pas réussi à fournir.

4.3. Stabilisation du Réseau et Réponse à la Demande

Alors que les réseaux font la transition vers les énergies renouvelables variables (VRE), la stabilité devient la rareté. [14] soutient que les mineurs de Bitcoin fonctionnent comme des "Batteries Virtuelles". Contrairement aux charges industrielles traditionnelles (fonderies d'aluminium) qui sont lentes à s'éteindre, les mineurs de Bitcoin peuvent réduire leur consommation en quelques secondes via le protocole stratum. Cela crée une **Ressource de Charge Contrôlable (CLR)** très réactive. Dans des marchés comme l'ERCOT (Texas), les mineurs fournissent des services de régulation de fréquence, stabilisant la fréquence du réseau à 60Hz en absorbant les chocs de l'intermittence du vent. Cette relation symbiotique transforme le réseau d'un système fragile et rigide en un réseau adaptatif et antifragile.

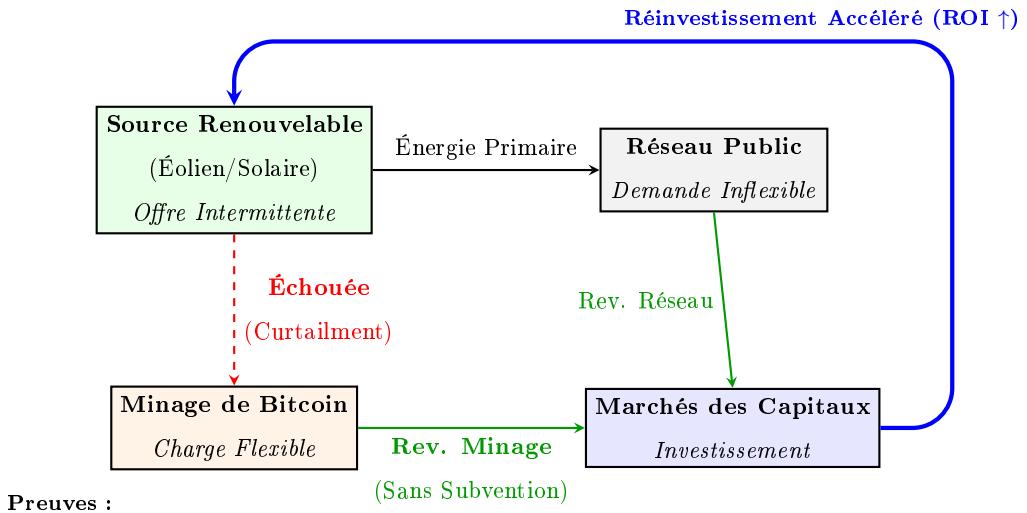


Figure 7: La Boucle de Rétroaction Bitcoin-Renouvelable. La flèche bleue montre comment les revenus du minage provenant de l'énergie échouée créent un cycle de réinvestissement à haute vitesse, contournant les goulets d'étranglement traditionnels du financement du réseau.

4.4. Conclusion : Le Budget Physique

[1] a célébrément appelé aux "limites de la croissance." Mais les limites ne peuvent être légitimées si l'unité de compte est illimitée. La monnaie molle (fiat) permet à l'économie d'halluciner des ressources qui n'existent pas. La monnaie dure (Bitcoin) impose un "Principe de Réalité." En liant l'émission monétaire à la dépense d'énergie, Bitcoin réaligne la sphère financière avec la sphère biophysique. Il force la civilisation à équilibrer son budget énergétique, s'assurant que la croissance future ne dérive pas de la dette, mais de l'efficacité et de l'innovation thermodynamique.

5. Conclusion : Vers un Registre Universel du Vivant

La dissociation entre la carte économique (prix) et le territoire biophysique (valeur) a conduit la civilisation au bord de l'effondrement écologique. En ancrant la monnaie dans la Preuve de Travail Thermodynamique, nous ne faisons pas que mettre à jour une technologie de paiement ; nous comblons ce fossé ontologique. Nous concluons que l'adoption d'un étalon énergétique de type

375

Bitcoin offre la voie la plus viable vers une économie de civilisation de "Type I" — une économie qui mesure la valeur non pas par décret politique, mais par la dépense objective de l'énergie stellaire.

5.1. Standardisation de la Valeur : Le Joule Planétaire

Pour la première fois dans l'histoire, nous possédons une métrique décentralisée et immuable de la valeur qui est cohérente par-delà les frontières et les espèces : l'**Emjoule Solaire (sej)**. Tout comme le mètre a standardisé la longueur et la seconde a standardisé le temps, le "Hash" standardise l'effort thermodynamique. Et nous pouvons désormais transférer la valeur des Emjoules Solaires à la vitesse de l'information, réalisant la vision d'Odum. En adoptant cet étalon, nous nous éloignons de la "Tarification Anthropocentrique" (valeur déterminée uniquement par l'utilité humaine) vers une "Tarification Biocentrique" (valeur déterminée par la transformité de l'énergie). Cela permet un système comptable standardisé où le coût des biens reflète leur véritable coût planétaire — y compris l'entropie générée lors de leur production.

5.2. Comptabiliser le Travail du Vivant

L'implication la plus profonde de la synthèse de l'Émergie d'Odum est que **la Vie est de la matière à haute transformité**. Une forêt primaire ou un récif corallien n'est pas du "capital gratuit" ; il représente des millions d'années de R&D solaire et de calcul biologique.

$$\text{Valeur}_{Vie} = \int_{t=-10^6}^0 (Solaire_{Intrant} \times \tau_{Evolution}) dt \quad (23)$$

Sous un étalon fiat, ce travail accumulé est invisible car il n'a aucun coût marginal de production *aujourd'hui*. Sous un Étalon Énergétique, nous pouvons théoriquement attribuer une "Valeur en Satoshi" aux services écosystémiques en fonction de leur coût de remplacement en Joules. Si la monnaie est de l'énergie, alors détruire un écosystème devient explicitement identifié comme brûler du capital. Cela crée le cadre comptable nécessaire pour internaliser les externalités, forçant le marché à respecter le "travail passé" de l'évolution.

5.3. L'Alignement Pragmatique des Incitations Mondiales

Bien que des modèles théoriques pour une "Monnaie Adossée à la Nature" aient existé pendant des décennies, ils manquaient d'un mécanisme d'application sans confiance (trustless). Bitcoin résout le *Problème des Généraux Byzantins* de la coordination mondiale. Il est le seul système actuellement en existence qui :

- Ne peut pas être trompé** : Aucune nation ne peut imprimer de l'énergie.
- Est Sans Permission (Permissionless)** : Il ne nécessite aucun traité, aucune résolution de l'ONU, et aucune coopération de banque centrale pour fonctionner.
405
- Est Immédiatement Disponible** : Le réseau est en direct, mondial, et antifragile.
- Ne Gaspille Pas d'Énergie** : Mais met l'énergie gaspillée au travail.

Nous soutenons que c'est notre "meilleure chance" à court terme. Attendre un consensus politique parfait, descendant (top-down), sur l'action climatique est une stratégie qui a échoué pendant trente ans (de la COP1 à la COP28). En revanche, l'adoption ascendante (bottom-up) d'une monnaie dure aligne la cupidité individuelle sur la réalité thermodynamique. Elle force les agents à devenir efficaces sur le plan énergétique non pas par altruisme, mais par nécessité mathématique.
410

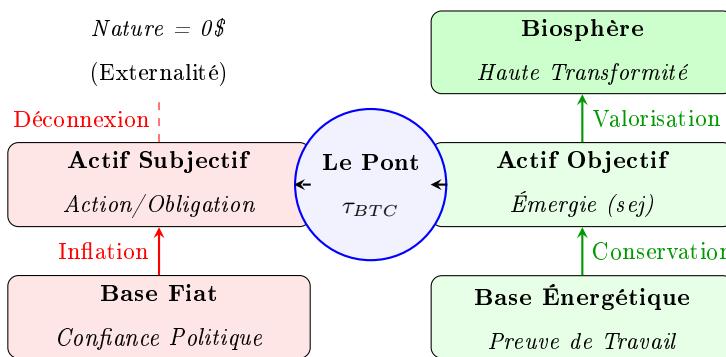


Figure 8: **La Réunification de la Valeur** : Transition d'un Registre Anthropocentrique à un Registre Biocentrique. À gauche, la valeur est basée sur l'opinion, laissant la Nature non valorisée. À droite, la valeur est basée sur l'énergie, permettant l'intégration du travail biologique (10^6 années de transformité) dans le registre économique.

5.4. La Synthèse Odum-Nash-Nakamoto

L'innovation majeure de cet article réside dans la triangulation inédite de trois lignées intellectuelles distinctes qui ont rarement, voire jamais, été fusionnées :
415

- Howard T. Odum** et ses lois de la comptabilité biophysique (Le "Pourquoi").
- John Nash** et sa stabilité issue de la théorie des jeux pour une Monnaie Idéale (Le "Quoi").
- Satoshi Nakamoto** et son implémentation cryptographique (Le "Comment").

À notre connaissance, cette synthèse spécifique — utilisant l'ajustement de la difficulté de Nakamoto pour résoudre le problème d'indexation de Nash au sein des contraintes énergétiques
420

d'Odum — constitue une contribution novatrice à la littérature. En quantifiant le mécanisme de consensus comme une accumulation littérale d'action physique ($J \cdot s$) par le biais de l'Action de Nakamoto (κ_N), nous comblons le fossé entre la stabilité abstraite de la théorie des jeux et les contraintes énergétiques strictes.

⁴²⁵ Nous sommes convaincus que cette approche "éconophysique" représente un vaste territoire inexploré. Nous encourageons instamment nos confrères scientifiques, écologues et économistes à dépasser leurs cloisonnements disciplinaires pour explorer l'unification mathématique de ces champs. Les réponses à notre crise écologique ne résident peut-être pas dans la politique, mais dans la physique de notre monnaie.

⁴³⁰ 5.5. *Le mot de la fin : Homo Biodiversitas*

La transition vers un étalon énergétique marque la fin de "l'Illusion de l'Alchimiste" — la croyance selon laquelle la richesse peut être créée sans travail, et qu'une économie peut s'étendre à l'infini indépendamment du budget thermodynamique de la biosphère.

⁴³⁵ Elle ouvre l'ère d'*Homo Biodiversitas*, une espèce qui reconnaît et intègre activement les limites physiques de son environnement dans son mécanisme de coordination primaire. En ancrant notre économie à un registre sécurisé par une action physique discrète — cette même dimensionnalité qui régit la computation biologique — nous ne bridons pas le potentiel humain ; nous le sauvegardons. Nous garantissons un avenir où la valeur est objectivement réelle, où le futur n'est pas volé au présent par la dilution fiduciaire, et où la carte économique s'aligne enfin avec le territoire biophysique.

⁴⁴⁰ La monnaie n'est plus une abstraction politique, elle redevient une propriété émergente de la physique. Pour prendre la pleine mesure de cette réalité, nous pouvons calculer empiriquement l'Action de Nakamoto (κ_N) pour l'époque actuelle (2026). Si nous posons l'énergie effective d'une transition d'état E_{eff} comme étant l'énergie requise pour un seul hash ($\eta \approx 2.6 \times 10^{-11} \text{ J}$) divisée par la fréquence globale du réseau ($\nu \approx 6.5 \times 10^{20} \text{ s}^{-1}$), la relation s'écrit :

$$\kappa_N = \frac{\eta}{\nu} = \frac{2.6 \times 10^{-11}}{6.5 \times 10^{20}} = 4.0 \times 10^{-32} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (24)$$

⁴⁴⁵ À l'échelle macroscopique, l'Action de Nakamoto — qui quantifie l'effort thermodynamique pour faire avancer le registre d'une unité de vérité — ne se situe actuellement qu'à deux ordres de grandeur de la constante de Planck ($h \approx 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$).

Face à l'accélération exponentielle du réseau et à l'optimisation implacable des semi-conducteurs vers la limite de Landauer, une perspective fascinante se dessine. *Qui sait, peut-être que l'Action de*

⁴⁵⁰ Nakamoto rejoindra la valeur de la constante de Planck un jour, unifiant définitivement le registre de l'économie humaine avec le tissu même de la mécanique quantique. La recherche de vérité est, elle aussi, peut-être, une constante de l'Univers. Que nous sommes tous des poussières d'étoiles. Et que le Soleil est notre guide.

References

- ⁴⁵⁵ [1] Daly, H.E., 1977. Steady-State Economics. San Francisco: WH Freeman.
- [2] Georgescu-Roegen, N., 1971. The Entropy Law and the Economic Process. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- [3] Hakimi, S., et al., 2024. Renewable energy and cryptocurrency: A dual approach to economic viability and environmental sustainability. *Heliyon* 10.
- ⁴⁶⁰ [4] Lal, A., You, S., 2023. From mining to mitigation: How bitcoin can support renewable energy development and climate action. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 11.
- [5] Nakamoto, S., 2008. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- ⁴⁶⁵ [6] Nash, J.F., 2002. Ideal money. *Southern Economic Journal* 69, 4–11. Also available as "Asymptotically Ideal Money".
- [7] Odum, H.T., 1996. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. John Wiley & Sons, New York.
- [8] Parrique, T., 2019. The Political Economy of Degrowth. Phd thesis. Stockholm University.
- ⁴⁷⁰ [9] Rudd, M.A., David, E., 2024. Harnessing bitcoin mining for methane mitigation. SSRN Electronic Journal Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4653061>.
- [10] Samuelson, P.A., 1947. Foundations of Economic Analysis. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- ⁴⁷⁵ [11] Semaan, G., et al., 2024. Harnessing bitcoin mining for methane mitigation. *Journal of Cleaner Production* 439.

- ⁴⁷⁵
- [12] Smith, E., Foley, D.K., 2008. Classical thermodynamics and economic general equilibrium theory. *Journal of Economic Dynamics and Control* 32, 7–65.
 - [13] Soddy, F., 1926. *Wealth, Virtual Wealth and Debt*. George Allen & Unwin, London.
 - [14] Velický, M., 2023. Renewable energy transition facilitated by bitcoin. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 11.