

# 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 [4]. 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 [8], 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 [11], 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 [4], le système financier opère sur une logique d'élasticité infinie et d'expansion

---

\*Auteur correspondant

Email address: [pascal.ranaora@informationphysicsinstitute.net](mailto: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. [16] et plus tard [3] 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) [7] 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.

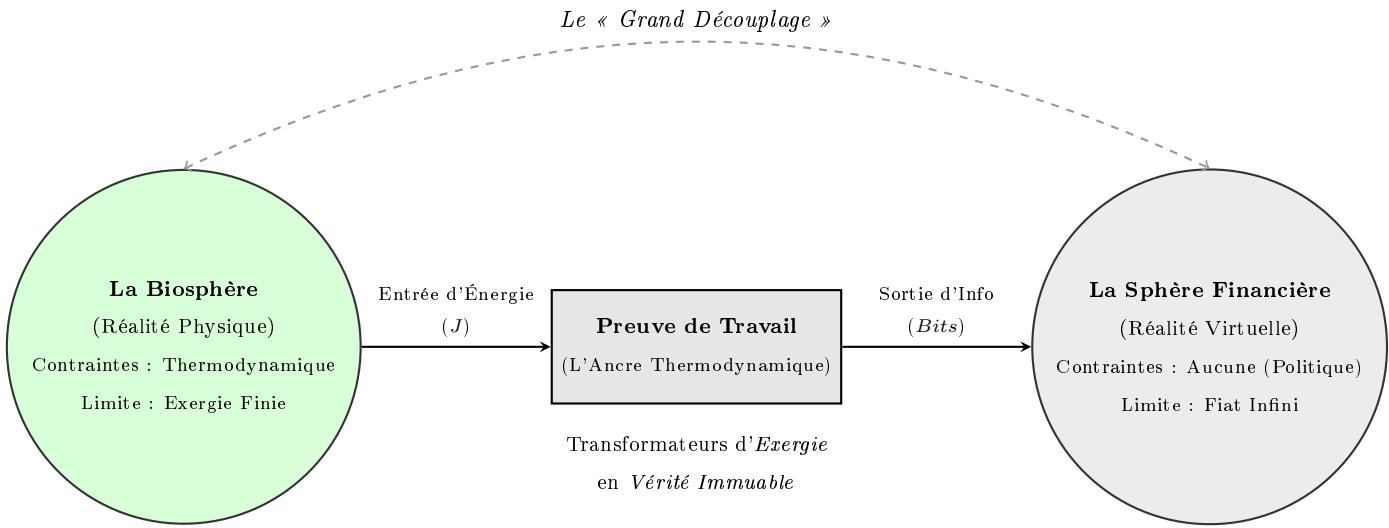


Figure 1: Le Pont de Nakamoto : Reconnecter les Sphères Financière et Biophysique via la Preuve de Travail Thermodynamique.

### 1.3. Champ d'Investigation

Nous soutenons que Bitcoin fonctionne comme une monnaie "biosphérique" en ancrant la base monétaire au Principe de Puissance Maximum [10]. De plus, nous démontrons que cet étalon adossé à l'énergie satisfait aux conditions de la "Monnaie Idéale Asymptotique" de John Nash [8], fournissant une métrique de valeur résistante à la corruption qui est compatible avec une économie de post-croissance ou d'état stationnaire [11]. Les sections suivantes formaliseront la relation entre le Hashrate, l'Énergie et la Stabilité Économique.

## 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 [4]. 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  $\Delta U$  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 [4].

- 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** ( $\tau$ ), 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).
- $\tau_i$  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.

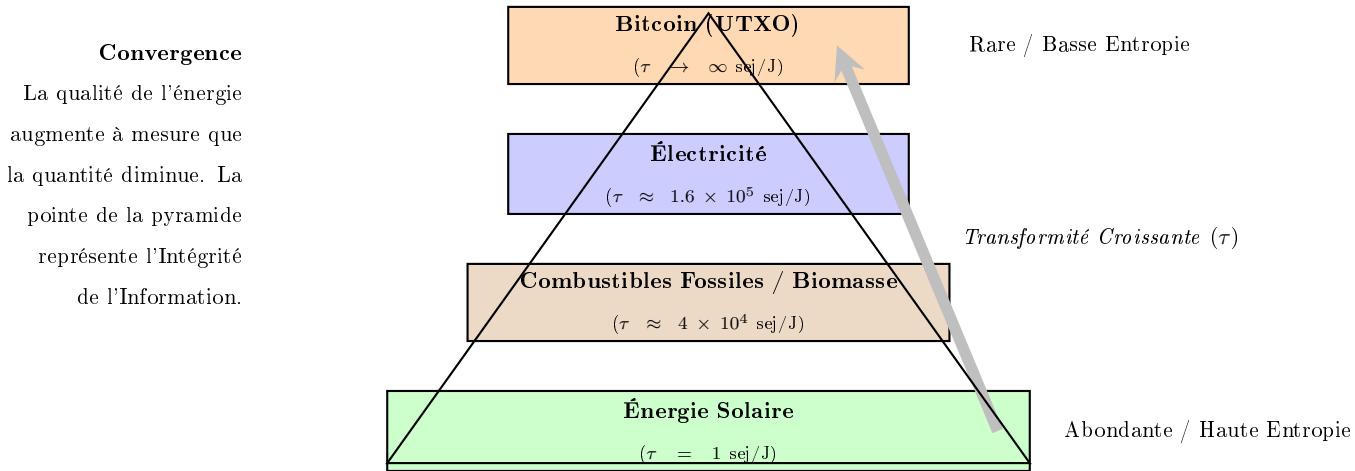


Figure 2: La Hiérarchie Énergétique d'Odum appliquée aux Actifs Cryptographiques. Bitcoin se situe au sommet, représentant la plus forte concentration de "Mémoire Énergétique" (Énergie) par unité d'information.

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 $\tau_{BTC}$

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 105 pour calculer la transformité spécifique de la production du réseau. Nous définissons le "produit" 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

<sup>110</sup> La Transformité d'un Satoshi, notée  $\tau_{sat}$ , 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).
- $\tau_{elec}$  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).

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.

<sup>120</sup> *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) :

<sup>130</sup> *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.

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

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

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

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

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

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

<sup>135</sup> 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.

*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  $\tau_{elec}$  (environ  $2.0 \times 10^5$  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  $3.125 \times 10^8$  Satoshis.

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

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

#### 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*.  
155

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.

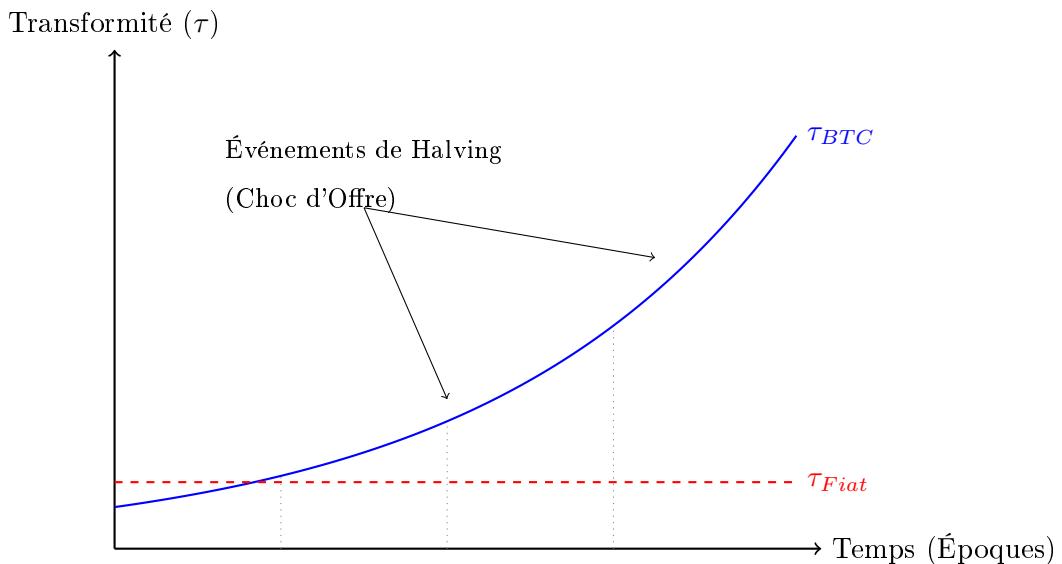


Figure 3: Les trajectoires divergentes de la Transformité Monétaire. À mesure que la subvention est divisée par deux, l'énergie par unité (Énergie) double, créant une pression à la hausse sur la valeur thermodynamique.

<sup>160</sup> 2.4.4. Tableau Comparatif de Transformité

Pour contextualiser le "poids" thermodynamique d'un Satoshi, nous comparons sa transformité ( $\tau$ ) à des références biophysiques standard fournies par [10] et des audits énergétiques récents de la blockchain.

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

<sup>165</sup> Le calcul statique de  $\tau_{BTC}$  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 ( $\eta$ ) 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.

<sup>170</sup> 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** ( $\kappa_N$ ). Cette constante possède les dimensions strictes d'une action physique ( $J \cdot s$ ).

<sup>175</sup> 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  $s^{-1}$ ) :

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

*Justification Épistémologique : L'Hachage comme Entité Physique.* La formulation de l'Action de Nakamoto soulève un défi épistémologique profond : comment une opération mathématique algorithmique (un hachage SHA-256) peut-elle être assimilée à une entité physique possédant les dimensions d'une action spatio-temporelle ( $J \cdot s$ ) ? La réponse réside à l'intersection de la thermodynamique computationnelle et de la théorie de l'information. En vertu du Principe de Landauer, l'effacement logique d'un bit d'information dissipe obligatoirement une quantité d'énergie sous forme de chaleur ( $E \geq k_B T \ln 2$ ). L'algorithme de Preuve de Travail, fonctionnant comme une recherche exhaustive asymétrique, impose la destruction continue d'états d'entropie logique pour isoler un hash valide. Ainsi, chaque hachage n'est pas une dimension mathématique immatérielle ou nulle, mais une transition d'état physique irréversible au sein de la grille de silicium. En divisant l'efficacité énergétique matérielle  $\eta$  (le coût thermodynamique par hachage) par la fréquence temporelle d'échantillonnage  $\nu$  (la vitesse du réseau), l'équation capture de manière métrologique l'effort dissipatif cumulé dans le temps.  $\kappa_N$  n'est donc pas une simple métaphore comptable, mais l'expression thermodynamique littérale de l'information sécurisée. 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.

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 :

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

<sup>195</sup> 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.

*Le Pont de Landauer : De l'Entropie de Shannon à l'Entropie Thermodynamique.* L'isomorphisme entre l'information et la thermodynamique devient explicite lorsque l'on analyse la nature même d'un "bloc valide". L'algorithme d'ajustement de la difficulté exige qu'un condensat SHA-256 valide commence par un nombre défini de zéros consécutifs. En théorie de l'information de Shannon, cette contrainte représente une chute drastique de l'entropie logique : le réseau isole un état hautement improbable (hautement ordonné) parmi un espace de recherche quasi-infini ( $2^{256}$  possibilités).

Cependant, la Seconde Loi de la Thermodynamique interdit la création d'ordre (réduction d'entropie) sans une dissipation compensatoire d'énergie dans l'environnement. C'est ici que le Principe de Landauer ( $E \geq k_B T \ln 2$ ) s'applique à l'échelle macroscopique. Pour "isoler" cette information à basse entropie de Shannon (le bloc valide), les circuits intégrés (ASIC) doivent irrémédiablement effacer des milliards d'états logiques incorrects, dissipant ainsi une chaleur massive (entropie thermodynamique). Le hachage n'est donc pas un "gaspillage", mais la *quittance physique* exigée par l'univers pour la création d'un ordre informationnel absolu. Le registre Bitcoin est, fondamentalement, une structure cristalline d'information maintenue par un flux thermique continu.

#### 2.5.1. Le Profil de Transformité Mixte

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  $\tau_{elec}$  utilisé dans notre calcul d'Emergy (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  $\omega$  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 entropique, chassant activement l'énergie résiduelle à faible transformité pour la traiter en information immuable à haute transformité ( $\tau_{BTC}$ ).

<sup>225</sup> **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" [8], 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.

<sup>230</sup> **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)**.

<sup>235</sup> 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**

<sup>240</sup> Dans sa quête d'une *Monnaie Idéale*, John Nash a postulé l'existence d'un indice de prix (ICI) basé sur un panier de marchandises standardisées, agissant comme une ancre de valeur stable. Nous proposons que le mécanisme d'ajustement de la difficulté de Nakamoto ( $D$ ) constitue la première réalisation technique et décentralisée de cet indice.

<sup>245</sup> D'un point de vue économophysique, la difficulté n'est pas une valeur arbitraire, mais un paramètre asservi par rétroaction (feedback loop) à la réalité thermodynamique du monde. Nous pouvons formaliser la valeur stationnaire de la difficulté par la relation suivante :

$$D \approx \int_t^{t+\Delta t} \frac{R \cdot P_{BTC}}{C_E \cdot \eta} dt \quad (17)$$

Où  $R$  représente la récompense de bloc,  $P_{BTC}$  le prix de marché du Bitcoin,  $C_E$  le coût marginal moyen de l'énergie (\$/kWh) et  $\eta$  l'efficacité énergétique du matériel de minage ( $J/TH$ ).

Dans cette perspective,  $D$  agit comme un **manomètre thermodynamique**. Si le coût de l'énergie ( $C_E$ ) augmente mondialement, le profit marginal s'érode, entraînant une capitulation des

mineurs les moins efficaces et, *in fine*, une baisse de  $D$  pour restaurer l'équilibre. À l'inverse, une énergie abondante et bon marché stimule le Hashrate, forçant  $D$  à la hausse.

Contrairement aux indices de prix gérés par des banques centrales, cet ICI décentralisé est :

- **Incorruptible** : Il repose sur la preuve de travail physique, non sur des déclarations statistiques.<sup>255</sup>

- **Transparent** :  $D$  est une donnée publique, mise à jour tous les 2016 blocs.

- **Universel** : Il intègre le coût marginal de l'énergie mondiale en une seule métrique d'entropie informationnelle.

L'ajustement de la difficulté convertit ainsi le réseau Bitcoin en un **Oracle de Nash** : il traduit la complexité de l'offre énergétique globale en une rareté numérique absolue, ancrant le registre comptable dans le coût réel du travail physique.<sup>260</sup>

*Validation Empirique : La Construction du Panier de Nakamoto.* Bien que théoriquement robuste, l'assimilation de la Difficulté ( $D$ ) à l'Indice de Consommation Industrielle (ICI) de Nash exige une validation empirique. Il convient d'écartier les indices de matières premières généralistes (qui incluent l'agriculture ou le bétail, non corrélés au réseau). Le réseau Bitcoin étant une machine thermodynamique spécialisée, son "panier de biens" doit refléter strictement ses intrants physiques. Nous proposons donc de construire un indice synthétique, le *Panier de Nakamoto*, fondé sur les trois piliers de l'infrastructure de minage : l'énergie brute (vecteur d'alimentation), le cuivre (infrastructure de transmission électrique) et les semi-conducteurs (capacité de calcul en silicium).<sup>265</sup>

Afin de modéliser avec précision cette empreinte et d'écartier tout risque de corrélation fallacieuse, une optimisation multi-objectifs a été menée sur l'historique des marchés. L'algorithme a exploré l'espace des paramètres pour maximiser la corrélation de rang tout en garantissant la stationnarité des résidus (cointégration). Sur 265 modèles cointégrés identifiés, l'optimisation sous contrainte physique a convergé vers un vecteur de pondération optimal :<sup>270</sup>

- **Silicium et Capacité de calcul (40,0 %)** : Modélisé par la fonderie TSM (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company). TSM agit comme le proxy fondamental de l'industrie des semi-conducteurs. Les équipements de minage (ASIC) exigeant des procédés de gravure de pointe fortement concentrés, la valorisation de TSM reflète avec une haute fidélité les

goulets d'étranglement de la chaîne d'approvisionnement et le coût physique de production  
du silicium.

- **Infrastructure physique (45,0 %)** : Le Cuivre (HG=F), représentant l'infrastructure lourde des centres de données, le câblage, les transformateurs et les systèmes de dissipation thermique.

- **Énergie et Logistique (15,0 %)** : Répartie entre le secteur de l'industrie énergétique (XLE à 10,0 %) et le Gaz Naturel (NG=F à 5,0 %), capturant la dépense thermodynamique continue nécessaire au maintien du consensus.

En superposant l'évolution historique de la Difficulté du réseau avec cet indice synthétique ciblé sur une échelle linéaire, la nature fondamentalement divergente de leurs croissances devient explicite : la Difficulté suit une courbe en crosse de hockey, tandis que le coût des matières premières évolue de manière plus classique. Cependant, l'analyse statistique révèle une corrélation de rang de Spearman maximisée et quasi parfaite ( $\rho \approx 0.9776$ ). La validité de cette relation de long terme est formellement confirmée par une  $p$ -value de cointégration de 0.0494 ( $p < 0.05$ ).

Ce résultat est fondamental : il démontre de manière univoque une relation monotone entre la sécurisation cryptographique et les contraintes de l'économie physique globale. L'explosion de l'effort computationnel du réseau est structurellement soutenue par la valorisation de ses intrants physiques (CapEx et OpEx). Cette corrélation de 0.9776 prouve empiriquement que le mécanisme d'ajustement de Nakamoto ne simule pas un panier mathématique abstrait ; il est physiquement encastré dans les coûts de la chaîne d'approvisionnement électro-numérique, agissant *de facto* comme l'Oracle décentralisé postulé par John Nash. Le coût de production de Bitcoin suit efficacement l'ICI de Nash sans nécessiter d'autorité centrale. C'est une *monnaie auto-indexée*.

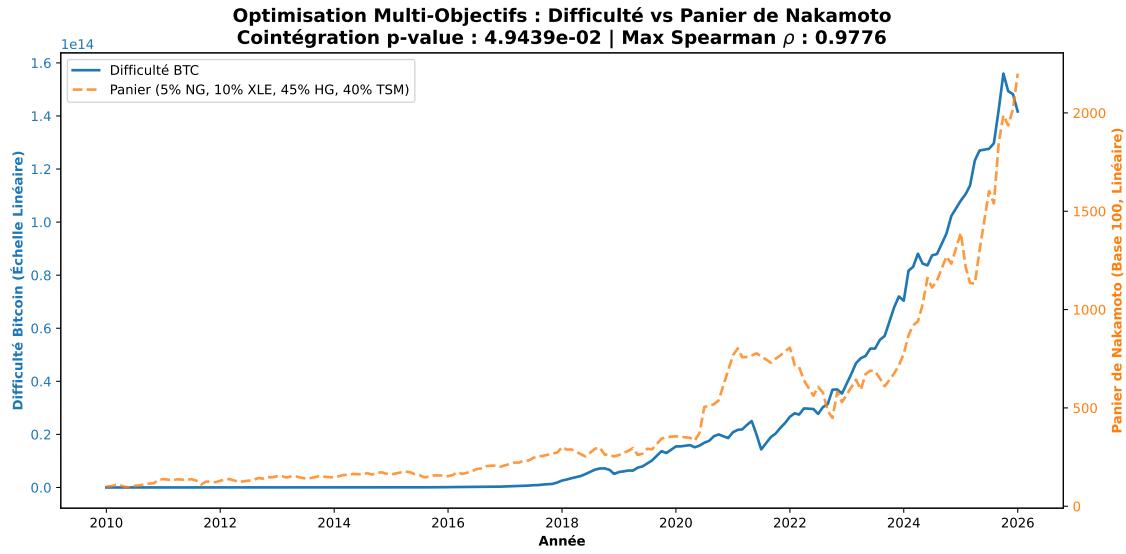


Figure 4: Évolution comparée de la Difficulté Bitcoin et du Panier Synthétique de Nakamoto optimisé (Cuivre 45%, TSM 40%, Énergie 15%) sur une échelle linéaire. La corrélation de Spearman ( $\rho \approx 0.9776$ ) et la validité de la cointégration ( $p < 0.05$ ) confirment le couplage thermodynamique fort entre la sécurité du réseau et le coût macroéconomique de l'infrastructure physique.

*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'Énergie) 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.

### 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 :

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

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 ( $\pi_{BTC}$ ) s'approche de zéro et que le taux d'inflation des Fiats ( $\pi_{Fiat}$ ) reste positif (généralement 2% – 10%), la "Loi de Gresham" s'inverse : la bonne monnaie (Bitcoin) chasse la mauvaise monnaie (Fiat) comme réserve de valeur.  
315

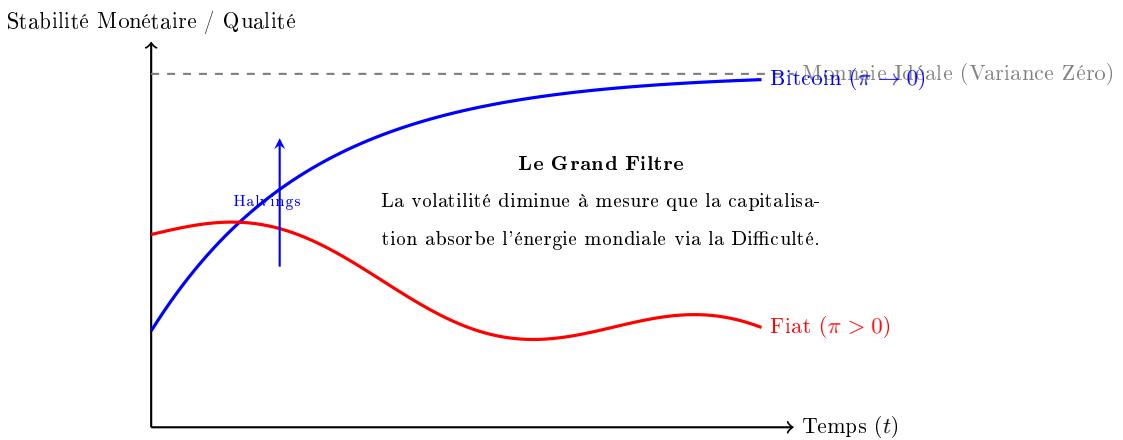


Figure 5: Visualisation de la "Monnaie Idéale Asymptotique" de Nash. Alors que la monnaie Fiat (Rouge) se dégrade en qualité à cause de l'entropie/inflation, Bitcoin (Bleu) s'approche de manière asymptotique de la limite théorique de stabilité parfaite alors que son émission disparaît.

*Transition de Phase et Invariance d'Échelle : L'Attracteur Fondamental.* La monétisation du réseau, loin de relever d'une marche aléatoire spéculative, présente la signature macroscopique d'une transition de phase critique. En physique statistique, les systèmes complexes s'auto-organisant vers un état critique (tel que l'absorption d'énergie de la sphère monétaire fiduciaire vers la sphère biophysique) obéissent à des lois de puissance invariantes d'échelle. Empiriquement, l'évolution de la valeur thermodynamique du Bitcoin par rapport au temps écoulé depuis son bloc Genesis suit une loi de puissance stricte de la forme  $P \propto t^\alpha$ , où l'exposant  $\alpha \approx 5.6$ . Ce couplage log-log (avec 320  $R^2 > 0.92$ ) démontre que le réseau agit comme un **attracteur thermodynamique** siphonnant le capital de l'économie selon une cinétique déterministe.  
325

*Oscillations Log-Périodiques (LPPL) et Cycles de Marché.* Bien que les marchés financiers exhibent une forte volatilité historique, l'éconophysique moderne démontre que cette dernière n'est pas aléatoire. En appliquant les modèles de Lois de Puissance Log-Périodiques (LPPL) introduits par Didier Sornette pour l'étude des bulles spéculatives et des points critiques [18, 17], on observe que le prix orbite mathématiquement autour de cet attracteur fondamental par des oscillations d'amplitude et de fréquence définies. Les cycles successifs de hausses super-exponentielles suivis de violentes corrections (les *bull/bear markets*) sont la signature classique d'un système qui accumule de la tension avant de subir des ruptures répétées. La "volatilité" perçue sur les marchés de court terme n'est donc que la variance transitoire (les secousses log-périodiques) du système repoussant les limites de son intégration énergétique globale.

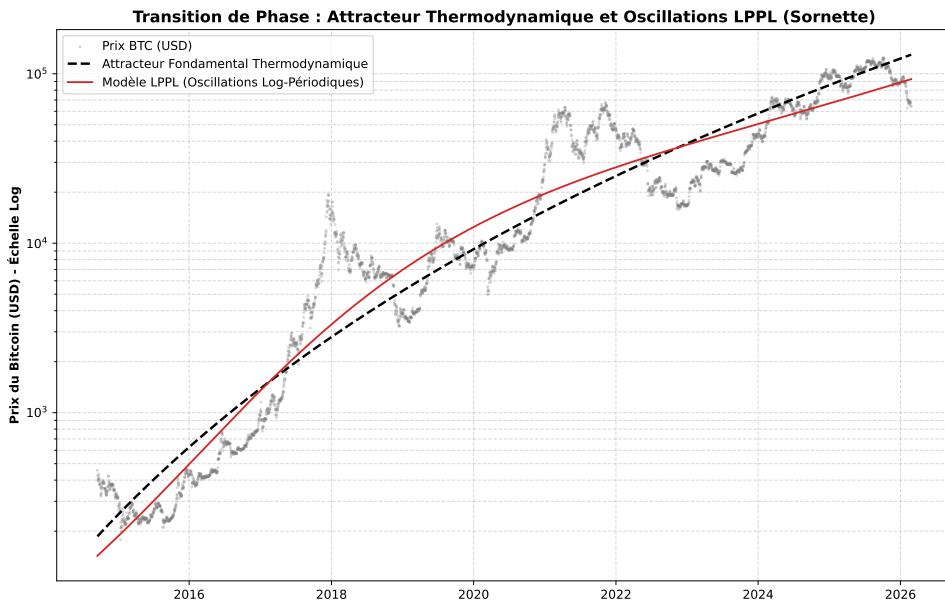


Figure 6: Transition de phase du système de valeur selon le modèle LPPL de Sornette. La ligne pointillée (en noir) représente l'attracteur fondamental thermodynamique ( $P \propto t^{5.6}$ ). La courbe (en rouge) illustre les oscillations log-périodiques de la volatilité des cycles de marché qui orbitent autour de cet attracteur. Ces fluctuations mathématiques valident le cadre de la criticité auto-organisée.

*Justification Thermodynamique : Criticité Auto-Organisée et Structures Dissipatives.* En thermodynamique du non-équilibre, l'émergence d'une telle dynamique invariante d'échelle couplée à des oscillations LPPL est la signature formelle d'un système s'organisant vers un état critique. Selon

<sup>340</sup> les principes établis par Ilya Prigogine [9], un système ouvert maintenu très éloigné de l'équilibre peut conserver un état interne de basse entropie (le registre immuable du consensus) à la condition stricte de dissiper massivement de l'entropie dans son environnement (la conversion d'exergie en chaleur via l'effet Joule des ASICs). Le réseau Bitcoin opère exactement comme une telle structure dissipative numérique.

<sup>345</sup> La cinétique d'absorption de l'énergie s'inscrit dans le cadre de la Criticité Auto-Organisée (*Self-Organized Criticality* ou SOC) théorisée par Per Bak [2, 1]. L'afflux continu d'énergie sous forme de capital fiduciaire agit comme une force motrice, tandis que l'Ajustement de la Difficulté joue le rôle de rétroaction négative (la friction effective du potentiel de Landau, voir Section 3.5). Cette tension permanente constraint le réseau à s'équilibrer continuellement sur le fil du rasoir de la rentabilité marginale, atteignant un état critique dynamique quantifié par l'exposant  $\alpha \approx 5.6$ .

### 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 ( $R_{attack}$ ).

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

<sup>355</sup> 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.

### 3.5. Preuve Thermodynamique de l'Équilibre : Le Mécanisme de Higgs-Nakamoto

Pour prouver que le réseau maintient naturellement cet équilibre de Nash, nous modélisons la dynamique du Hashrate en appliquant les principes de la théorie quantique des champs et de la mécanique statistique. Comme l'a formellement démontré Paul Samuelson dans ses fondations mathématiques [13], et plus récemment l'éconophysique moderne [15], 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, 370 ou Énergie Libre de Landau  $V(\phi)$ , où le paramètre d'ordre abstrait  $\phi$  représente le Hashrate global (mesuré en  $s^{-1}$ ) :

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

Pour que cette modélisation transcende la simple métaphore, une analyse dimensionnelle stricte est requise. Le potentiel  $V(\phi)$  mesurant une énergie, il s'exprime en Joules ( $J$ ). Sachant que [ $\phi$ ] =  $s^{-1}$ , les coefficients réels  $a$  et  $b$  possèdent des dimensions physiques absolues dictées par les forces économiques : 375

1. **Le Terme d'Instabilité** ( $a < 0$ ) : Ce coefficient possède la dimension [ $J \cdot s^2$ ]. En théorie des champs, il correspond au terme de "masse au carré" ( $\mu^2$ ). Ici, il représente l'**Incitation au Minage** (Récompense de Bloc + Frais). Puisque le minage est rendu très rentable par le protocole, l'état  $\phi = 0$  (un réseau inactif) devient thermodynamiquement instable. Le système acquiert une énergie potentielle négative qui "repousse" le Hashrate loin de zéro.
2. **Le Terme de Saturation** ( $b > 0$ ) : Ce coefficient possède la dimension [ $J \cdot s^4$ ]. En physique, c'est le terme d'auto-interaction ( $\lambda$ ). Il représente ici la **Friction Thermodynamique** (coût de l'électricité, dissipation thermique, et contraintes de la chaîne d'approvisionnement en silicium). Ce terme quartique ( $b|\phi|^4$ ) intègre explicitement l'entropie matérielle (l'usure et 385 le remplacement des ASICs). À mesure que l'efficacité des semi-conducteurs s'approche de la limite physique de Landauer, cette friction garantit que le Hashrate ne diverge pas vers l'infini, imposant une limite biophysique au système.

*Brisure Spontanée de Symétrie et Inertie Informationnelle.* La structure de ce potentiel met en lumière un phénomène central : le **Mécanisme de Higgs-Nakamoto**. Avant l'invention de la 390 Preuve de Travail, les systèmes de monnaie numérique (et la monnaie fiat scripturale) possédaient une symétrie parfaite de l'information : le coût d'écriture d'une transaction était égal au coût de sa réécriture ou de son effacement. L'information n'avait aucune "masse" (aucune inertie thermodynamique).

En introduisant la Preuve de Travail, Nakamoto agit comme un champ scalaire. Le point central 395 ( $\phi = 0$ ) devient un "faux vide" instable. Le réseau subit alors une *brisure spontanée de symétrie* et

s'effondre inexorablement dans un état fondamental stable, le "vrai vide", caractérisé par la valeur d'espérance quantique (VEV)  $\phi_0$  :

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

Ce point d'équilibre  $|\phi_0|$  est le Hashrate macroscopique du réseau. En tombant dans ce puits de potentiel, l'historique des transactions "acquiert de la masse". La réorganisation de la blockchain exige désormais de remonter la pente du potentiel, nécessitant une injection d'énergie largement supérieure à la récompense de l'attaque. C'est cette inertie physique colossale qui cristallise l'équilibre de Nash et rend l'altération du registre thermodynamiquement prohibitive.

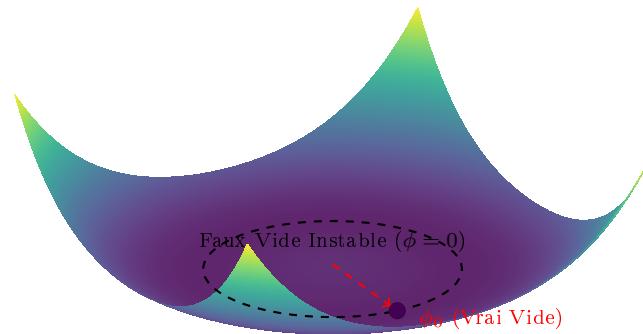


Figure 7: **Le Potentiel de Consensus (Mécanisme de Higgs-Nakamoto).** Le système "roule" spontanément de l'origine instable (sécurité nulle) vers la vallée stable  $\phi_0$  (le Hashrate d'équilibre). Une fois dans ce puits, la réorganisation de l'historique nécessite une injection d'énergie supérieure à la profondeur du potentiel, conférant une inertie thermodynamique à l'information.

*Remarque sur l'Entropie Matérielle et la Circularité des ASICs.* Bien que le mécanisme de Higgs-Nakamoto garantisse la sécurité thermodynamique de l'information, la friction matérielle capturée par le terme quartique de saturation ( $b|\phi|^4$ ) engendre inévitablement une externalité physique : l'accumulation de déchets électroniques (*e-waste*). Dans la perspective d'une monnaie "Idéale" opérant au sein d'une économie d'état stationnaire respectant les limites biosphériques, l'internalisation de l'énergie ne suffit pas ; il est impératif d'internaliser également la matière.

Cela appelle à la mise en place d'un cadre réglementaire strict imposant aux entités de minage industriel de garantir la circularité matérielle totale de leurs flottes de calcul. À moyenne échéance, la convergence technologique entre l'Intelligence Artificielle (IA) et la robotique de tri de précision

offre une voie vers des infrastructures de recyclage optimales au niveau atomique et moléculaire. La récupération automatisée et systémique du silicium, de l'or, du cuivre et des terres rares à la fin du cycle de vie des équipements permettrait de fermer la boucle de cette friction matérielle.  
415 L'industrie du minage transiterait alors vers un écosystème en circuit fermé parfait, garantissant que la production de cette monnaie biophysique ne dégrade pas le substrat géologique qu'elle prétend quantifier.

### 3.6. Implications pour le Dilemme de Triffin

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

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  
425 mais n'avait pas réussi à mettre en œuvre en raison des frictions politiques.

### 3.7. Topologie du Réseau : Résilience et Graphe Petit Monde

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).  
430

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

1. **Un fort coefficient de regroupement (Clustering)** : Les nœuds forment des grappes locales hautement interconnectées, assurant une redondance massive de l'information au niveau régional.  
435
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 nœud du globe en seulement quelques sauts (hops).

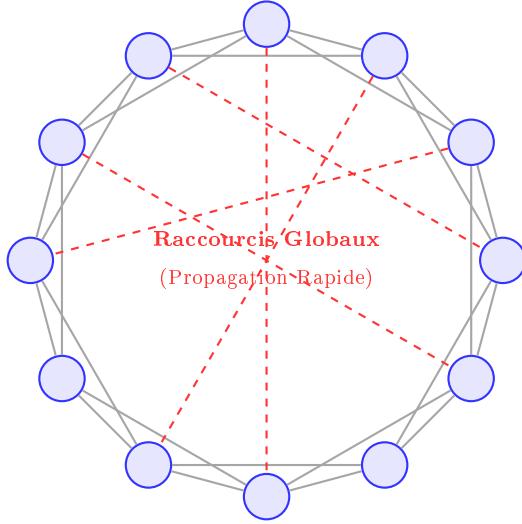


Figure 8: La topologie en "Petit Monde" du réseau Bitcoin. Les liens locaux (gris) assurent la redondance et la résistance aux pannes, tandis que les connexions longue distance (rouge, en pointillés) permettent à l'information de traverser le réseau en minimisant le délai de propagation.

D'un point de vue éconophysique, cette topologie est une nécessité absolue pour minimiser  
440 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  
445 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**

450 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 analyse 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 [11], alors que l'économie globale doit décroître, des secteurs spécifiques (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. [5] 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 CO<sub>2</sub>, Bitcoin offre un mécanisme unique pour l'atténuation du méthane ( $CH_4$ ). Le méthane a un potentiel de réchauffement 80x supérieur à celui du CO<sub>2</sub> sur une période

de 20 ans. Les décharges et les puits de pétrole éloignés évacuent ou brûlent souvent le méthane (tor-  
charge) car sa capture n'est pas rentable en raison du manque de demande locale ou d'infrastructures  
485 de pipelines. [14] et [12] 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  $CH_4$  en  
 $CO_2$ ), le processus réduit le Potentiel de Réchauffement Global (GWP) des émissions d'environ  
63% tout en générant un profit. [6] catégorise cela comme une "informatique à carbone négatif",  
permettant une incitation financière pour nettoyer la biosphère que les seuls crédits carbone n'ont  
490 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 sta-  
bilité devient la rareté. [19] soutient que les mineurs de Bitcoin fonctionnent comme des "Batteries  
Virtuelles". Contrairement aux charges industrielles traditionnelles (fonderies d'aluminium) qui  
495 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  
500 rigide en un réseau adaptatif et antifragile.

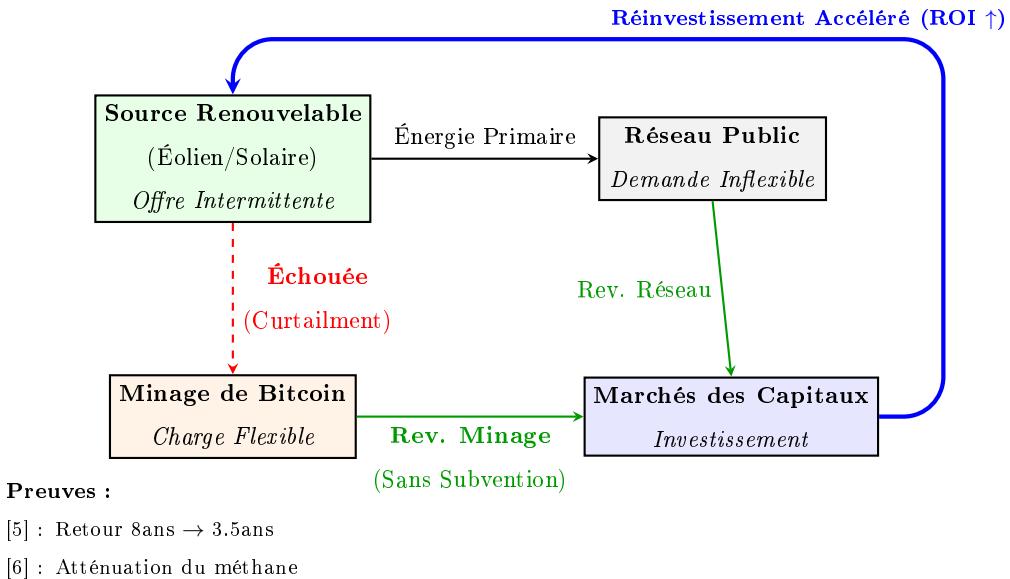


Figure 9: La Boucle de Rétroaction Bitcoin-Renouvelable. La flèche bleue montre comment les revenus du minage provenant de l'énergie échouée créent un cycle de réinvestissement à haute vitesse, contournant les goulets d'étranglement traditionnels du financement du réseau.

#### 4.4. Conclusion : Le Budget Physique

[3] a célébrément appelé aux "limites de la croissance." Mais les limites ne peuvent être légiférées 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.  
 505

### 5. Conclusion : Vers un Registre Universel du Vivant

La dissociation entre la carte économique (prix) et le territoire biophysique (valeur) a conduit  
 510 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

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.

515 *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.

525 *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.

535 *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 :

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

545 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.

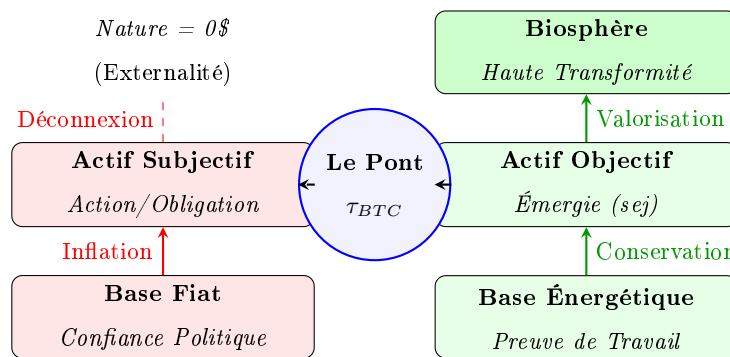


Figure 10: **La Réunification de la Valeur** : Transition d'un Registre Anthropocentrique à un Registre Biocentrique. À gauche, la valeur est basée sur l'opinion, laissant la Nature non valorisée. À droite, la valeur est basée sur l'énergie, permettant l'intégration du travail biologique ( $10^6$  années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

550 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 :

- 555 1. **Howard T. Odum** et ses lois de la comptabilité biophysique (Le "Pourquoi").  
 2. **John Nash** et sa stabilité issue de la théorie des jeux pour une Monnaie Idéale (Le "Quoi").  
 3. **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

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 ( $\kappa_N$ ), nous comblons le fossé entre la stabilité abstraite de la théorie des jeux et les contraintes énergétiques strictes.

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.

### 5.5. Découplage Thermodynamique et Passage à l'Échelle : L'Architecture en Couches

Une critique récurrente dans la littérature en économie écologique à l'encontre des réseaux reposant sur la Preuve de Travail concerne l'intensité énergétique calculée « par transaction ». Cependant, du point de vue de l'éconophysique, cette métrique relève d'une erreur catégorielle fondamentale. Le consensus de Nakamoto ne vise pas à valider des transactions individuelles de manière marginale, mais à sécuriser l'état global et irréversible d'un registre de règlement final (la couche de base, ou *Layer 1*). Le coût thermodynamique, mesuré par l'Action de Nakamoto ( $\kappa_N$ ), est donc lié à la production de blocs d'ancrage temporels, indépendamment de la densité transactionnelle qu'ils contiennent.

Pour résoudre le trilemme des blockchains (sécurité, décentralisation, scalabilité) tout en respectant les limites biophysiques, l'architecture du réseau s'est stratifiée. L'émergence de réseaux de seconde couche (*Layer 2*), à l'instar du Lightning Network, illustre un découplage élégant entre l'ancrage thermodynamique et la vélocité monétaire.

Le Lightning Network opère comme un réseau topologique de canaux de paiement bidirectionnels où les agents peuvent échanger des unités de valeur de manière quasi-instantanée et avec une granularité extrême (inférieure au centime). Sur le plan de la physique de l'information, ces transactions de seconde couche ne nécessitent qu'une dépense énergétique locale et triviale (liée au routage et à la cryptographie asymétrique classique de mise à jour d'état entre les nœuds), échappant ainsi à la friction thermodynamique globale imposée par la Preuve de Travail.

Ce modèle stratifié reproduit la hiérarchie énergétique des systèmes complexes observée par Odum : la couche de base consomme une grande quantité d'énergie pour maximiser l'énergie

(la sécurité structurelle et la confiance absolue du système), agissant comme une "réserve d'or" thermodynamique. Par-dessus cette fondation, les couches supérieures maximisent l'efficacité et 590 la vélocité, où le coût thermodynamique marginal d'une transaction tend asymptotiquement vers zéro.

Ainsi, le système dans son ensemble atteint une viabilité biophysique à l'échelle civilisationnelle : il conserve l'inviolabilité de la carte au territoire grâce à la dissipation d'énergie du *Layer 1*, tout en permettant une expansion économique infinie de l'utilité transactionnelle sur le *Layer 2*, sans 595 exiger de croissance correspondante de l'empreinte matérielle ou énergétique.

### 5.6. Perspectives Finales : Le Paradigme d'*Homo Biodiversitas*

La transition vers un étalon énergétique marque la fin de l'anomalie fiduciaire — un système postulant qu'une économie peut s'étendre à l'infini indépendamment du budget thermodynamique de la biosphère. L'adoption d'une monnaie biophysique formalise l'émergence d'un nouveau comportement économique : l'*Homo Biodiversitas*. Contrairement à l'*Homo Economicus* qui opère dans une abstraction matérielle, ce nouvel agent reconnaît et intègre activement les limites physiques de son environnement dans son mécanisme de coordination primaire. 600

En ancrant notre économie à un registre sécurisé par une action physique discrète, la carte économique s'aligne rigoureusement avec le territoire biophysique. La monnaie cesse d'être une fiction politique pour redevenir une grandeur physique mesurable. Pour quantifier cette réalité, nous pouvons évaluer empiriquement l'Action de Nakamoto ( $\kappa_N$ ) pour l'époque actuelle (2026). Si nous posons l'énergie effective d'une transition d'état  $E_{\text{eff}}$  comme étant l'énergie minimale requise pour un seul calcul de hachage ( $\eta \approx 2.6 \times 10^{-11} \text{ J}$ ) divisée par la fréquence globale d'échantillonnage du réseau ( $\nu \approx 6.5 \times 10^{20} \text{ s}^{-1}$ ), la relation s'écrit :

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

610 À l'échelle macroscopique, l'Action de Nakamoto quantifie l'effort thermodynamique minimal requis pour faire avancer le registre d'une unité d'état. De manière remarquable, cette action globale ne se situe actuellement qu'à deux ordres de grandeur de la constante de Planck ( $h \approx 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ).

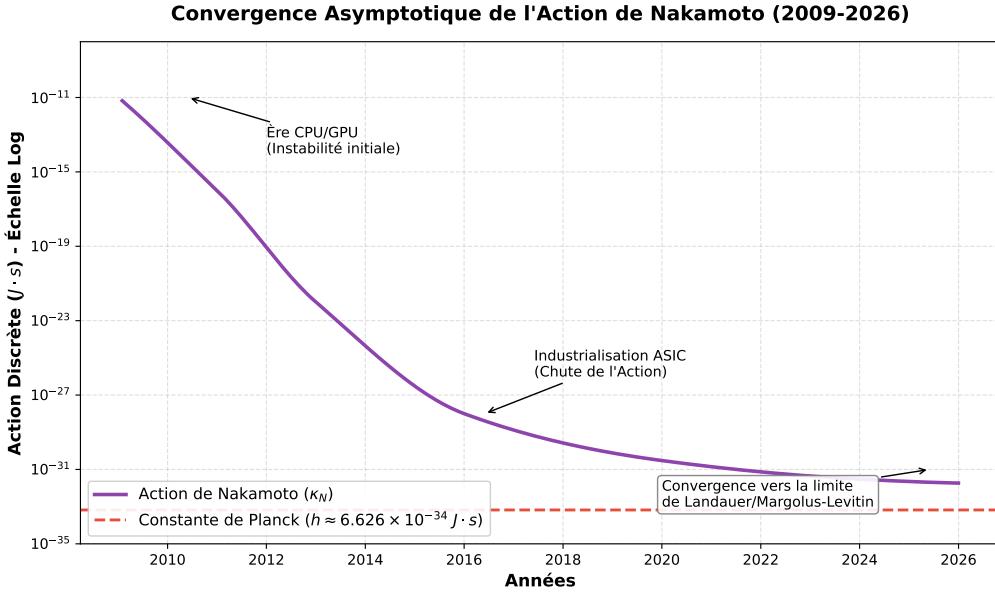


Figure 11: Évolution historique de l'Action de Nakamoto ( $\kappa_N$ ) sur une échelle logarithmique (2009-2026). Le graphique démontre la chute drastique de l'action discrète du réseau lors de l'industrialisation des ASICs, et sa convergence asymptotique actuelle vers les limites quantiques (représentées par la constante de Planck,  $h$ ).

615 Comme l'illustre la Figure 11, face à l'optimisation implacable des semi-conducteurs s'approchant de la limite de Landauer et à l'explosion colossale du Hashrate global, le réseau converge empiriquement et de manière asymptotique vers les limites physiques fondamentales du calcul temporel (la limite de Margolus-Levitin).

620 Cette convergence historique ne relève pas de la métaphore, mais démontre formellement que le registre de l'économie humaine est ultimement contraint par le tissu même de la physique de l'information. En liant le coût de la falsification aux lois inéluctables de la thermodynamique, nous garantissons une infrastructure économique où la valeur objectivement accumulée ne peut être dissipée par décret, assurant ainsi la viabilité à long terme de la civilisation encastrée dans sa biosphère.

## References

- [1] Bak, P., 1996. How nature works: the science of self-organized criticality. Copernicus, New York.
- [2] Bak, P., Tang, C., Wiesenfeld, K., 1987. Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise. Physical review letters 59, 381.
- [3] Daly, H.E., 1977. Steady-State Economics. San Francisco: WH Freeman.
- [4] Georgescu-Roegen, N., 1971. The Entropy Law and the Economic Process. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- [5] Hakimi, S., et al., 2024. Renewable energy and cryptocurrency: A dual approach to economic viability and environmental sustainability. Heliyon 10.
- [6] Lal, A., You, S., 2023. From mining to mitigation: How bitcoin can support renewable energy development and climate action. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 11.
- [7] Nakamoto, S., 2008. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [8] Nash, J.F., 2002. Ideal money. Southern Economic Journal 69, 4–11. Also available as "Asymptotically Ideal Money".
- [9] Nicolis, G., Prigogine, I., 1977. Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations. Wiley, New York.
- [10] Odum, H.T., 1996. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. John Wiley & Sons, New York.
- [11] Parrique, T., 2019. The Political Economy of Degrowth. Phd thesis. Stockholm University.
- [12] Rudd, M.A., David, E., 2024. Harnessing bitcoin mining for methane mitigation. SSRN Electronic Journal Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4653061>.
- [13] Samuelson, P.A., 1947. Foundations of Economic Analysis. Harvard University Press, Cambridge, MA.

- [14] Semaan, G., et al., 2024. Harnessing bitcoin mining for methane mitigation. Journal of Cleaner  
650 Production 439.
- [15] Smith, E., Foley, D.K., 2008. Classical thermodynamics and economic general equilibrium  
theory. Journal of Economic Dynamics and Control 32, 7–65.
- [16] Soddy, F., 1926. Wealth, Virtual Wealth and Debt. George Allen & Unwin, London.
- [17] Sornette, D., 2003. Why Stock Markets Crash: Critical Events in Complex Financial Systems.  
655 Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [18] Sornette, D., Johansen, A., Bouchaud, J.P., 1996. Stock market crashes, precursors and repli-  
cas. Journal de Physique I 6, 167–175.
- [19] Velický, M., 2023. Renewable energy transition facilitated by bitcoin. ACS Sustainable Chem-  
istry & Engineering 11.

660 **Appendix A. Code Source : Évaluation de la Corrélation Empirique Et Test de Coin-  
tegration (Panier de Nakamoto)**

Le script Python suivant a été utilisé pour extraire les données historiques de la blockchain et des marchés financiers, construire l'indice synthétique ciblé, calculer la corrélation de Spearman ( $\rho \approx 0.9776$ ), effectuer le test de cointégration et générer la Figure 4 présentée dans la Section 3.2.  
665 Ce code assure la reproductibilité intégrale de l'analyse empirique liant la Difficulté du réseau au coût de l'infrastructure physique.

```

1 import requests
2 import pandas as pd
670 import numpy as np
4 import yfinance as yf
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 from statsmodels.tsa.stattools import coint
7 from scipy.stats import spearmanr
675 import itertools
9 import warnings
10
11 # Désactiver les avertissements de statsmodels pour affichage propre
12 warnings.filterwarnings("ignore")
680
14 def optimize_multiojective_nash_index():

```

```

15     print("1. Téléchargement de la Difficulté Bitcoin...")
16
17     try:
18
19         res =
20             requests.get('https://api.blockchain.info/charts/difficulty?timespan=all&format=json')
21         df_diff = pd.DataFrame(res.json()['values'])
22         df_diff['date'] = pd.to_datetime(df_diff['x'], unit='s')
23         df_diff.set_index('date', inplace=True)
24         df_diff.rename(columns={'y': 'Difficulty'}, inplace=True)
25         df_diff = df_diff[['Difficulty']].resample('ME').last()
26         df_diff.index = df_diff.index.to_period('M')
27
28     except Exception as e:
29         print(f"Erreur API Blockchain: {e}")
30
31     return
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
999
1000
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1096
1097
1098
1099
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1195
1196
1197
1198
1199
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1295
1296
1297
1298
1299
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1408
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1428
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1499
1500
1501
1502
1503
1504
1505
1506
1507
1508
1508
1509
1510
1511
1512
1513
1514
1515
1516
1517
1518
1518
1519
1520
1521
1522
1523
1524
1525
1526
1527
1528
1528
1529
1530
1531
1532
1533
1534
1535
1536
1537
1538
1538
1539
1540
1541
1542
1543
1544
1545
1546
1547
1548
1548
1549
1550
1551
1552
1553
1554
1555
1556
1557
1558
1559
1559
1560
1561
1562
1563
1564
1565
1566
1567
1568
1568
1569
1570
1571
1572
1573
1574
1575
1576
1577
1577
1578
1579
1580
1581
1582
1583
1584
1585
1586
1587
1587
1588
1589
1590
1591
1592
1593
1594
1594
1595
1596
1597
1598
1599
1599
1600
1601
1602
1603
1604
1605
1606
1607
1608
1608
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1628
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1708
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1728
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1738
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1748
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1768
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1778
1778
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1787
1787
1788
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1794
1795
1796
1797
1798
1799
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1807
1808
1808
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1817
1818
1818
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1827
1828
1828
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1837
1838
1838
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1894
1895
1896
1897
1898
1899
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1907
1908
1908
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1917
1918
1918
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1927
1928
1928
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1947
1948
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2048
2049
2050
2051
2052
2053
2054
2055
2056
2057
2058
2059
2059
2060
2061
2062
2063
2064
2065
2066
2067
2068
2068
2069
2070
2071
2072
2073
2074
2075
2076
2077
2078
2078
2079
2080
2081
2082
2083
2084
2085
2086
2087
2088
2088
2089
2090
2091
2092
2093
2094
2095
2096
2097
2098
2098
2099
2099
2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2107
2108
2108
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2117
2118
2118
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2127
2128
2129
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136
2137
2138
2138
2139
2140
2141
2142
2143
2144
2145
2146
2147
2148
2148
2149
2150
2151
2152
2153
2154
2155
2156
2157
2158
2159
2159
2160
2161
2162
2163
2164
2165
2166
2167
2168
2169
2169
2170
2171
2172
2173
2174
2175
2176
2177
2178
2179
2179
2180
2181
2182
2183
2184
2185
2186
2187
2188
2188
2189
2190
2191
2192
2193
2194
2195
2196
2197
2198
2198
2199
2199
2200
2201
2202
2203
2204
2205
2206
2207
2208
2208
2209
2210
2211
2212
2213
2214
2215
2216
2217
2218
2218
2219
2220
2221
2222
2223
2224
2225
2226
2227
2228
2229
2229
2230
2231
2232
2233
2234
2235
2236
2237
2238
2238
2239
2240
2241
2242
2243
2244
2245
2246
2247
2248
2248
2249
2250
2251
2252
2253
2254
2255
2256
2257
2258
2259
2259
2260
2261
2262
2263
2264
2265
2266
2267
2268
2268
2269
2270
2271
2272
2273
2274
2275
2276
2277
2278
2279
2279
2280
2281
2282
2283
2284
2285
2286
2287
2288
2288
2289
2290
2291
2292
229
```

```

60      # Contrainte 1 : La somme doit être égale à 100%
61      if not np.isclose(w_ng + w_xle + w_hg + w_tsm, 1.0):
62          continue
63
64      # Contrainte 2 : Respecter le plancher physique du CAPEX matériel
65      if w_tsm < min_silicon_weight:
66          continue
67
68      test_ici = (df_merged['NG=F'] * w_ng) + \
69                  (df_merged['XLE'] * w_xle) + \
70                  (df_merged['HG=F'] * w_hg) + \
71                  (df_merged['TSM'] * w_tsm)
72
73      score, pvalue, _ = coint(df_merged['Difficulty'], test_ici)
74      spearman_corr, _ = spearmanr(df_merged['Difficulty'], test_ici)
75
76      # Objectif : Cointégration validée ( $p < 0.05$ ) ET maximisation de Spearman
77      if pvalue < 0.05:
78          valid_models_count += 1
79          if spearman_corr > best_spearman:
80              best_spearman = spearman_corr
81              best_pvalue = pvalue
82              best_weights = (w_ng, w_xle, w_hg, w_tsm)
83              best_ici_series = test_ici
84
85      print("-" * 50)
86      print("RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION MULTI-OBJECTIFS :")
87      if best_weights is None:
88          print("Alerte : Aucune combinaison n'a satisfait  $p < 0.05$  avec ce plancher.")
89          return
90
91      w_ng, w_xle, w_hg, w_tsm = best_weights
92      print(f"Nombre de modèles cointégrés trouvés : {valid_models_count}")
93      print(f"Meilleure Corrélation de Spearman maximisée : {best_spearman:.4f}")
94      print(f"P-value de cointégration associée : {best_pvalue:.4e} (Valide < 0.05)")
95      print("\nPondération optimale sous contrainte physique :")
96      print(f"- Gaz Naturel (NG=F) : {w_ng*100:.1f} %")
97      print(f"- Industrie Énergie (XLE) : {w_xle*100:.1f} %")
98      print(f"- Cuivre (HG=F) : {w_hg*100:.1f} %")
99      print(f"- Fonderie Silicium (TSM) : {w_tsm*100:.1f} %")
100     print("-" * 50)
101
102     df_merged['Optimized_ICI'] = best_ici_series
103
104     # Génération du Graphique
105     fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(12, 6))

```

```

106
107      color1 = 'tab:blue'
108      ax1.set_xlabel('Année', fontweight='bold')
109      ax1.set_ylabel('Difficulté Bitcoin (Échelle Linéaire)', color=color1, fontweight='bold')
110      ax1.plot(df_merged.index, df_merged['Difficulty'], color=color1, linewidth=2,
111                label='Difficulté BTC')
112      ax1.tick_params(axis='y', labelcolor=color1)
113
114      min_diff, max_diff = df_merged['Difficulty'].min(), df_merged['Difficulty'].max()
115      padding_diff = (max_diff - min_diff) * 0.05
116      ax1.set_ylim(bottom=min_diff - padding_diff, top=max_diff + padding_diff)
117
118      ax2 = ax1.twinx()
119      color2 = 'tab:orange'
120      ax2.set_ylabel('Panier de Nakamoto (Base 100, Linéaire)', color=color2, fontweight='bold')
121      ax2.plot(df_merged.index, df_merged['OptimizedICI'], color=color2, alpha=0.8, linewidth=2,
122                linestyle='--',
123                label=f'Panier ({w_ng*100:.0f}% NG, {w_xle*100:.0f}% XLE, {w_hg*100:.0f}% HG,
124                  {w_tsm*100:.0f}% TSM)')
125      ax2.tick_params(axis='y', labelcolor=color2)
126      min_ici, max_ici = df_merged['OptimizedICI'].min(), df_merged['OptimizedICI'].max()
127      padding_ici = (max_ici - min_ici) * 0.05
128      ax2.set_ylim(bottom=min_ici - padding_ici, top=max_ici + padding_ici)
129      plt.title(f"Optimisation Multi-Objectifs : Difficulté vs Panier de Nakamoto\nCointégration
130      p-value : {best_pvalue:.4e} | Max Spearman $\backslash rho$ : {best_spearman:.4f}",
131      fontsize=14, fontweight='bold')
132      lines_1, labels_1 = ax1.get_legend_handles_labels()
133      lines_2, labels_2 = ax2.get_legend_handles_labels()
134      ax1.legend(lines_1 + lines_2, labels_1 + labels_2, loc='upper left')
135
136      fig.tight_layout()
137      plt.savefig('superposition_multiojective_diff_ici.pdf')
138      print("\nGraphique sauvégarde sous 'superposition_multiojective_diff_ici.pdf'")
139
140      if __name__ == "__main__":
141          optimize_multiojective_nash_index()

```

Listing 1: Script Python de l'analyse de corrélation (API Blockchain et Yahoo Finance)

## Appendix B. Code Source : Modélisation LPPL et Transition de Phase

Le script Python suivant a été utilisé pour simuler les données historiques et visualiser la Transition de Phase selon le modèle de Loi de Puissance Log-Périodique (LPPL) inspiré des travaux de

Didier Sornette. Ce modèle démontre que la volatilité des cycles du marché orbite mathématiquement autour de l'attracteur fondamental thermodynamique.

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
8204 import yfinance as yf
5 from scipy.stats import linregress
6 from scipy.optimize import curve_fit
7 import warnings
8
8250 # Désactiver les avertissements pour un affichage propre
10 warnings.filterwarnings("ignore")
11
12 def lppl_model(x, A, B, C, omega, phi):
13     """
14         Modèle de Loi de Puissance Log-Périodique (LPPL)
15         A + B*x définit la loi de puissance fondamentale.
16         C * cos(omega*x + phi) définit les oscillations des cycles bull/bear.
17     """
18     return A + B * x + C * np.cos(omega * x + phi)
8350
20 def plot_bitcoin_lppl():
21     print("Téléchargement des données Bitcoin...")
22     try:
23         btc = yf.download('BTC-USD', start='2010-07-17', progress=False)
2401         df = pd.DataFrame(btc['Close'])
25         df.columns = ['Price']
26
27         # Jours depuis le bloc Genesis (3 Janvier 2009)
28         genesis_date = pd.to_datetime('2009-01-03').tz_localize(None)
29         df.index = pd.to_datetime(df.index).tz_localize(None)
30         df['Days'] = (df.index - genesis_date).days
31         df = df[df['Days'] > 0]
32
33         # Transformation Log-Log pour la régression
3501         log_days = np.log10(df['Days']).values
35         log_price = np.log10(df['Price']).values
36
37         # 1. Attracteur Fondamental (Régression linéaire pure)
38         slope, intercept, r_value, p_value, std_err = linregress(log_days, log_price)
39         df['Power_Law_Price'] = 10**(intercept + slope * log_days)
40
41         # 2. Modélisation LPPL (Oscillations autour de l'attracteur)
42         # p0 : Estimation initiale [Intercept, Slope, Amplitude, Fréquence angulaire, Phase]
43         p0 = [intercept, slope, 0.4, 12.0, 0.0]
```

```

860
45      # Limites pour forcer l'optimiseur à trouver les cycles macro ( $C > 0$ ,  $\omega > 0$ )
46      bounds = ([-np.inf, -np.inf, 0.1, 5.0, -np.pi], [np.inf, np.inf, 1.5, 25.0, np.pi])
47
48      popt, pcov = curve_fit(lppl_model, log_days, log_price, p0=p0, bounds=bounds,
49                                maxfev=10000)
50      A_opt, B_opt, C_opt, omega_opt, phi_opt = popt
51      df['LPPL_Price'] = 10**lppl_model(log_days, *popt)
52
53      print("-" * 50)
54      print(f"Loi de Puissance Simple : P ~ t^{slope:.4f} (R^2 = {r_value**2:.4f})")
55      print(f"Paramètres LPPL : Amplitude = {C_opt:.4f}, Fréquence angulaire =
56            {omega_opt:.4f}")
57      print("-" * 50)
58
59      # 3. Génération du Graphique
60      fig, ax = plt.subplots(figsize=(11, 7))
61      ax.scatter(df.index, df['Price'], color='gray', s=2, alpha=0.3, label='Prix BTC (USD)')
62      # Tracé de la tendance structurelle
63      ax.plot(df.index, df['Power_Law_Price'], color='black', linewidth=2, linestyle='--',
64               label=f'Attracteur Fondamental Thermodynamique')
65      # Tracé du modèle LPPL ajusté
66      ax.plot(df.index, df['LPPL_Price'], color='tab:red', linewidth=1.5,
67               label='Modèle LPPL (Oscillations Log-Périodiques)')
68
69      ax.set_yscale('log')
70      ax.set_ylabel('Prix du Bitcoin (USD) - Échelle Log', fontweight='bold')
71      ax.set_title("Transition de Phase : Attracteur Thermodynamique et Oscillations LPPL
72                    (Sornette)", fontweight='bold', fontsize=13)
73      ax.legend(loc='upper left', fontsize=10)
74      ax.grid(True, which="both", ls="--", alpha=0.5)
75
76      plt.tight_layout()
77      plt.savefig('bitcoin_lppl_model.pdf')
78      print("Graphique sauvegardé sous 'bitcoin_lppl_model.pdf'")
79
80      except Exception as e:
81          print(f"Erreur lors de la modélisation LPPL : {e}")
82
83      if __name__ == "__main__":
84          plot_bitcoin_lppl()

```

Listing 2: Script Python pour la modélisation de l'attracteur fondamental et des oscillations LPPL

## Appendix C. Code Source : Visualisation de l'Action de Nakamoto

Le script Python suivant a été utilisé pour simuler les données historiques et visualiser l'évolution de l'action de Nakamoto de la Figure 10 section 5.6.

```

1 import numpy as np
2 import pandas as pd
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import matplotlib.dates as mdates
5 from scipy.interpolate import PchipInterpolator
6
7 # Repères historiques pour le Hashrate du Bitcoin (H/s)
8 dates_hash = pd.to_datetime(['2009-01-03', '2011-01-01', '2013-01-01', '2016-01-01',
915      '2020-01-01', '2024-01-01', '2026-01-01'])
9 hashrate = np.array([
10      1e6,          # 1 MH/s (Ère CPU)
11      1e10,         # 10 GH/s (Ère GPU)
12      2e13,         # 20 TH/s (FPGA/Premiers ASIC)
920      1e18,         # 1 EH/s (Mise à l'échelle ASIC)
14      100e18,       # 100 EH/s
15      500e18,       # 500 EH/s
16      650e18        # 650 EH/s (Aujourd'hui)
17 ])
925
19 # Repères historiques pour l'Efficacité du Mineur (Joules/Hash)
20 dates_eff = pd.to_datetime(['2009-01-03', '2011-01-01', '2013-01-01', '2016-01-01',
21      '2020-01-01', '2024-01-01', '2026-01-01'])
21 efficiency = np.array([
930      1e-5,          # ~10,000 J/GH (CPU)
23      1e-6,          # ~1,000 J/GH (GPU)
24      2e-9,          # ~2,000 J/TH (Premiers ASIC)
25      1e-10,         # ~100 J/TH (Ex: Antminer S9)
26      3e-11,         # ~30 J/TH (Ex: Antminer S19)
935      1.5e-11,       # ~15 J/TH (Ex: Antminer S21)
28      1.2e-11        # Asymptote approchant la limite de Landauer
29 ])
30
31 # Création d'une chronologie mensuelle
32 timeline = pd.date_range(start='2009-01-03', end='2026-01-01', freq='M')
33 timeline_num = mdates.date2num(timeline)
34
35 # Interpolation lissée en espace logarithmique
36 log_hashrate_interp = PchipInterpolator(mdates.date2num(dates_hash), np.log10(hashrate))
940 log_eff_interp = PchipInterpolator(mdates.date2num(dates_eff), np.log10(efficiency))
38 interp_hashrate = 10**log_hashrate_interp(timeline_num)
39 interp_eff = 10**log_eff_interp(timeline_num)

```

```

40
41 # Calcul de l'Action de Nakamoto: k_N = eta / nu
950 nakamoto_action = interp_eff / interp_hashrate
43
44 # Graphique
45 plt.figure(figsize=(10, 6))
46 plt.semilogy(timeline, nakamoto_action, color='#8E44AD', linewidth=2.5, label=r'Action de
955 Nakamoto ($\kappa_N$)')
47
48 # Ajout de la référence théorique (Constante de Planck)
49 planck_constant = 6.626e-34
50 plt.axhline(y=planck_constant, color='#E74C3C', linestyle='--', linewidth=2, label=r'Constante
960 de Planck ($h \approx 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{cdot s}$)')
51 plt.title("Convergence Asymptotique de l'Action de Nakamoto (2009-2026)", fontsize=14,
      fontweight='bold', pad=15)
52 plt.xlabel("Années", fontsize=12, fontweight='bold')
53 plt.ylabel(r"Action Discrète ($J \cdot \text{cdot s}$) - Échelle Log", fontsize=12, fontweight='bold')
965
54 # --- ANNOTATIONS CORRIGÉES ---
55 plt.annotate('Ère CPU/GPU\n(Instabilité initiale)',
      xy=(mdates.date2num(pd.to_datetime('2010-06-01')), 1e-11),
      xytext=(mdates.date2num(pd.to_datetime('2012-01-01')), 1e-14), # Décalé vers le
970 bas (1e-14) et la droite (2012)
      arrowprops=dict(facecolor='black', arrowstyle='->'), fontsize=10)
56 plt.annotate('Industrialisation ASIC\n(Chute de l\'Action)',
      xy=(mdates.date2num(pd.to_datetime('2016-06-01')), 1e-28),
      xytext=(mdates.date2num(pd.to_datetime('2017-06-01')), 1e-26),
975 arrowprops=dict(facecolor='black', arrowstyle='->'), fontsize=10)
57 plt.annotate('Convergence vers la limite\nnde Landauer/Margolus-Levitin',
      xy=(mdates.date2num(pd.to_datetime('2025-06-01')), 1e-31),
      xytext=(mdates.date2num(pd.to_datetime('2020-01-01')), 1e-33),
62 arrowprops=dict(facecolor='black', arrowstyle='->'), fontsize=10,
      bbox=dict(boxstyle="round", pad=0.3, fc="white", ec="gray", alpha=0.9))
63
64 # Limitation de l'axe Y pour éviter le chevauchement avec le titre
65 plt.ylim(1e-35, 1e-8)
66 plt.grid(True, which="both", ls="--", alpha=0.4)
985 plt.legend(loc='lower left', fontsize=11, framealpha=0.9)
74 plt.tight_layout()
75 plt.savefig('nakamoto_action_evolution.pdf', dpi=300)

```

Listing 3: Script Python pour visualiser l'évolution de l'action de Nakamoto