

L’ancrage thermodynamique du consensus numérique : faire avancer la monnaie idéale asymptotique de John Nash

Pascal Ranaora^{1,*}

¹*Information Physics Institute - Chercheur Indépendant, Sydney, Australie*
(Dated: 27 avril 2026)

Dans ses derniers travaux, le lauréat du prix Nobel John F. Nash Jr. a esquissé le cadre théorique de la « Monnaie Idéale » — une monnaie mondialement stable, libre du dilemme de Triffin et de l’inflation politique intérieure. Une composante centrale et non résolue de la proposition de Nash était l’« Indice de Consommation Industrielle » (ICI), un panier standardisé de matières premières conçu pour ancrer la valeur de la monnaie à la réalité objective de la production industrielle mondiale. Cet article étudie comment le protocole cryptographique décentralisé introduit par Satoshi Nakamoto résout mathématiquement et thermodynamiquement la quête de Nash. Nous proposons que l’Algorithme d’Ajustement de la Difficulté de Bitcoin fonctionne comme un ICI décentralisé et sans confiance (trustless). En imposant une dépense continue et vérifiable d’énergie physique (Preuve de Travail) pour sécuriser le registre, le réseau agit comme un oracle thermodynamique qui suit le coût marginal de l’énergie mondiale et de la production de semi-conducteurs. De plus, nous démontrons que la politique monétaire déterministe du réseau remplit les critères de Nash pour une « Monnaie Asymptotiquement Idéale », initiant une transition de phase dans le système monétaire qui impose un Équilibre de Nash coopératif à l’échelle mondiale.

I. INTRODUCTION

Déclaration de signification : Le lauréat du prix Nobel John Nash a théorisé qu’une économie mondialement stable requiert une « Monnaie Idéale » indexée sur une mesure objective de la production industrielle, à l’abri de toute élasticité politique. Cet article explore comment les protocoles décentralisés de Preuve de Travail (Proof-of-Work) fournissent un cadre informatique pour un tel ancrage en liant la rareté numérique à une dépense thermodynamique vérifiable. En analysant le consensus de Nakamoto comme un proxy décentralisé des coûts industriels mondiaux, nous démontrons un alignement formel entre incitations cryptographiques et limites biophysiques. Cette synthèse offre une base mathématiquement rigoureuse pour évaluer la stabilité et l’équilibre à long terme des systèmes monétaires non discrétionnaires au sein des contraintes de la biosphère physique.

L’architecture moderne de la finance mondiale, enracinée dans le régime post-1971 des monnaies fiduciaires flottantes, est caractérisée par un problème fondamental d’agent-principal. Les banques centrales, chargées de gérer la masse monétaire nationale, sont régulièrement soumises à des pressions politiques intérieures. Comme le démontre le problème d’incohérence temporelle de la politique monétaire optimale [1], les régimes discrétionnaires ont un biais inhérent vers l’inflation, conduisant à ce que le lauréat du prix Nobel John F. Nash Jr. a appelé la « contrefaçon politique » [2]. Dans une série de conférences données entre 1994 et 2011, Nash a proposé une alternative théorique : la « Monnaie Idéale ».

Nash a soutenu que la monnaie remplit une fonction d’utilité analogue aux unités standard de mesure

physique. Tout comme les communautés scientifiques et de l’ingénierie s’appuient sur des définitions immuables du mètre, du kilogramme et de la seconde, l’économie mondiale a besoin d’une mesure immuable de la valeur pour optimiser les jeux coopératifs à long terme (commerce, investissement et allocation de capital) à travers les frontières et les générations.

A. Le dilemme de l’Indice de Consommation Industrielle (ICI)

Pour atteindre cette stabilité absolue, Nash a reconnu que la monnaie ne pouvait pas être indexée sur une autre monnaie politique, ni s’appuyer sur un Indice des Prix à la Consommation (IPC) manipulé localement. Au lieu de cela, il a théorisé la nécessité d’un **Indice de Consommation Industrielle (ICI)** — un panier mondialement standardisé de matières premières brutes, de métriques énergétiques et d’intrants industriels [2]. Si une monnaie pouvait être indexée sur cet ICI, sa valeur refléterait le coût véritable et objectif de l’effort industriel humain.

Cependant, la proposition de Nash a rencontré un paradoxe de mise en œuvre sévère. Construire, auditer et maintenir un tel indice nécessite une autorité centrale omnipotente et universellement digne de confiance. En termes de théorie des jeux, déléguer la gestion de l’ICI à une institution humaine réintroduit inévitablement les mêmes vulnérabilités politiques que l’indice était censé éliminer. La quête de l’ICI est ainsi restée bloquée à la frontière de la confiance institutionnelle.

B. Le pont cryptographique vers la réalité physique

Cet article postule que la solution technologique au problème d’indice non résolu de Nash a été déployée

* pascal.ranaora@informationphysicsinstitute.net

en 2009 par Satoshi Nakamoto [3], s'appuyant sur des concepts informatiques fondamentaux de tarification par le traitement [4] et de friction thermodynamique [5]. Alors que Bitcoin est largement étudié à travers les prismes de l'informatique et de la finance spéculative, nous l'analysons ici à travers le cadre de la théorie des jeux macroéconomique et de la comptabilité biophysique.

Nous faisons l'hypothèse que le mécanisme de consensus par Preuve de Travail (PoW) de Nakamoto, spécifiquement régi par son Algorithme d'Ajustement de la Difficulté dynamique, constitue la première instantiation réussie d'un Indice de Consommation Industrielle décentralisé. En exigeant une dépense continue et vérifiable de travail thermodynamique (électricité et calcul sur silicium) pour écrire des mises à jour d'état dans le registre, le protocole crée un pont cryptographique incassable entre la sphère financière virtuelle et les lois physiques de la thermodynamique.

C. Structure de l'article

L'article se déroule comme suit : la section 2 formalise la connexion théorique entre l'ICI de Nash et la thermodynamique de l'information, en utilisant le cadre d'« Énergie » de Howard T. Odum pour quantifier le coût biophysique du registre Bitcoin. La section 3 démontre empiriquement comment l'Ajustement de la Difficulté du réseau agit comme un mécanisme automatisé de découverte des prix mondiaux pour l'énergie industrielle, servant effectivement d'Oracle de Nash. La section 4 modélise l'émission asymptotique du réseau, prouvant son alignement avec les critères de Nash pour une stratégie monétaire dominante et non inflationniste. Enfin, la section 5 discute des implications macroéconomiques de l'adoption d'une monnaie asymptotiquement idéale, adossée à l'énergie, pour le commerce mondial et la durabilité.

II. LES BASES BIOPHYSIQUES DE L'INDICE DE CONSOMMATION INDUSTRIELLE

Pour rendre la Monnaie Idéale de Nash opérationnelle, l'Indice de Consommation Industrielle (ICI) proposé doit être lié à une mesure de la production industrielle universellement mesurable et infalsifiable. Si l'ICI doit prévenir la « contrefaçon politique », ses composants ne peuvent être sujets à une repondération arbitraire par des agences statistiques centrales. Nous soutenons que le dénominateur ultime et irréductible de toute consommation industrielle n'est pas un panier de matières premières physiques diverses (qui sont sujettes à des chocs d'offre locaux et à des substitutions), mais le travail thermodynamique fondamental requis pour les produire.

A. La constitution thermodynamique de la valeur

Les modèles macroéconomiques traditionnels traitent souvent l'économie comme un flux d'échange de valeur circulaire et isolé, largement détaché des contraintes physiques. En revanche, l'économie biophysique pionnière de Nicholas Georgescu-Roegen et avancée par Ayres et Warr traite l'économie mondiale comme une structure thermodynamique dissipative motivée par l'extraction de travail utile [6–8]. Pour qu'un ICI soit robuste sur le long terme, il doit refléter les lois absolues de la physique régissant la production industrielle :

1. **Principe Zéro (Équilibre)** : Dans un système fiduciaire, le registre de la banque centrale agit comme un troisième système variable, empêchant un véritable équilibre entre la masse monétaire et la production industrielle. Un indice idéal doit établir un équilibre objectif.
2. **Premier Principe (Conservation)** : L'énergie ne peut être ni créée ni détruite. L'émission de monnaie fiduciaire sans dépense industrielle correspondante viole la conservation de la valeur, entraînant l'inflation. Une monnaie indexée sur l'ICI doit exiger un travail vérifiable pour son émission.
3. **Second Principe (Entropie)** : Toute activité économique produit inévitablement de l'entropie. Un système monétaire qui vise une expansion infinie de la demande globale ignore la barrière physique de l'entropie.
4. **Troisième Principe (Zéro Absolu)** : L'information parfaite (entropie nulle) nécessite une énergie infinie pour être acquise. Créer un registre immuable de transactions — une « vraie » histoire de l'état économique — nécessite une dépense d'énergie strictement non nulle.

Si l'indice de Nash doit servir d'ancrage, il doit être libellé dans une mesure qui obéit strictement à ces quatre lois.

B. Quantifier l'ICI : L'Énergie d'Odum et l'Emjoule Solaire

Alors que la thermodynamique définit les contraintes de la production industrielle, l'écologiste des systèmes Howard T. Odum a fourni la métrique comptable universelle requise pour le panier de Nash : l'**Énergie** (énergie incorporée). Odum a démontré que mesurer la production industrielle en simples Joules est insuffisant, car l'énergie varie en qualité. Un Joule de charbon n'est pas équivalent à un Joule de travail humain ou à un Joule de puissance de traitement électrique [9].

Pour standardiser un indice industriel mondial, nous devons retracer tous les vecteurs énergétiques jusqu'à leur source primaire. Odum a défini cette unité standardisée comme l'**Emjoule Solaire (sej)**. L'Énergie (épelée avec

un 'm') représente la 'mémoire énergétique' d'un système. Elle quantifie l'énergie disponible totale d'un certain type (typiquement solaire) qui a été consommée, directement et indirectement sur toute la chaîne d'approvisionnement, pour générer un produit ou un service spécifique.

La relation est formalisée par la **Transformité** (τ), qui mesure la concentration ou « qualité » de l'énergie :

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

Où :

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

En utilisant le cadre d'Odum, le panier complexe de matières premières industrielles de Nash (cuivre, acier, pétrole, puissance informatique) peut être élégamment réduit à un dénominateur commun unique et mathématiquement rigoureux : l'Énergie totale.

C. La Preuve de Travail comme mécanisme d'indexation automatisé

Nous postulons que le réseau Bitcoin fonctionne comme un moteur automatisé pour suivre et tarifier cette Énergie mondiale. L'algorithme de Preuve de Travail (PoW) de Satoshi Nakamoto crée un marché sans frontières et hautement compétitif pour l'énergie électrique et le traitement des semi-conducteurs.

Suivant le **Principe de Puissance Maximale** d'Odum, le réseau Bitcoin s'auto-organise pour maximiser l'absorption d'énergie industrielle disponible, transformant l'électricité « isolée » ou à forte entropie en information cryptographique à faible entropie (espace de registre immuable). Parce que les mineurs sont économiquement incités à rechercher le coût marginal de l'électricité le plus bas au monde, l'effort de calcul agrégé du réseau (Taux de hachage) agit comme un proxy décentralisé et en temps réel pour les coûts de l'énergie industrielle mondiale.

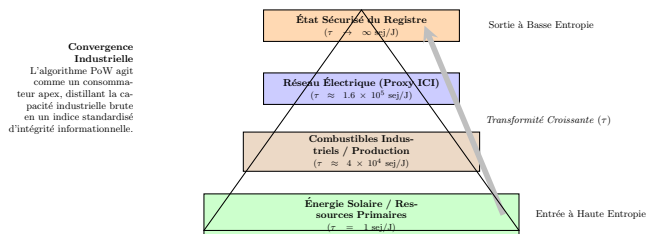


FIGURE 1 – L'Indice de Consommation Industrielle visualisé à travers la hiérarchie énergétique d'Odum. Le réseau sécurise le registre en échantillonnant continuellement le coût industriel de base de l'économie mondiale.

D. Calcul du poids thermodynamique de l'Indice

Pour valider que le réseau fonctionne comme un indice fiable de la consommation industrielle, nous devons quantifier le « poids » biophysique de son unité native. Nous appliquons l'Algèbre de l'Énergie d'Odum pour calculer la transformité spécifique (τ_{sat}) d'un seul Satoshi (10^{-8} BTC). La Transformité de l'unité est le rapport entre l'afflux total d'Énergie provenant du réseau industriel mondial et la production informationnelle spécifique du réseau :

$$\tau_{sat} = \frac{\dot{E}_{net} \times \tau_{elec}}{\dot{Q}_{BTC}} \quad (2)$$

Où :

- \dot{E}_{net} est la consommation d'énergie continue agrégée du réseau (en Watts).
- τ_{elec} est la transformité solaire moyenne mondiale du mix électrique (sej/J).
- \dot{Q}_{BTC} est le taux d'émission déterministe du protocole (Satoshis/sec).

1. Aperçu empirique (Époque Post-2024)

En utilisant des données caractéristiques de l'époque post-halving actuelle, nous pouvons estimer le coût industriel absolu intégré dans l'unité monétaire :

Paramètre ICI	Symbole	Valeur Approximative
Taux de hachage mondial	H	650 EH/s (6.5×10^{20} h/s)
Efficacité moy. des semi-conducteurs	η	26 J/TH (2.6×10^{-11} J/h)
Transformité du réseau mondial	τ_{elec}	2.0×10^5 sej/J [9]
Récompense de bloc (Émission)	R	3.125 BTC
Intervalle de bloc	t	600 secondes

TABLE I – Paramètres industriels et thermodynamiques régissant l'indice décentralisé.

La consommation électrique totale (P) dérivée des opérations industrielles mondiales pour maintenir l'indice est :

$$P = H \times \eta \approx 16.9 \text{ GW} \quad (3)$$

Sur l'intervalle standardisé de 10 minutes d'un bloc, l'énergie physique dépensée (E_{block}) est :

$$E_{block} = P \times t \approx 1.014 \times 10^{13} \text{ Joules} \quad (4)$$

Convertir cette production électrique brute en Em-joules Solaires standardisés (Em_{block}) pour capturer l'empreinte complète de la chaîne d'approvisionnement :

$$Em_{block} = E_{block} \times \tau_{elec} \approx 2.028 \times 10^{18} \text{ sej} \quad (5)$$

Répartir cette Mémoire d'Énergie Industrielle sur l'offre nouvellement émise (3.125×10^8 Satoshis) donne

le poids biophysique objectif de l'unité :

$$\text{sej/sat} = \frac{2.028 \times 10^{18}}{3.125 \times 10^8} \approx 6.49 \times 10^9 \text{ sej/sat} \quad (6)$$

Ce calcul révèle qu'un seul Satoshi est adossé à environ **6,5 milliards d'Emjoules Solaires** d'effort industriel. Contrairement aux monnaies fiduciaires, qui ont un coût marginal de production quasi nul, cette unité d'indice décentralisé possède un coût macroéconomique intrinsèque et infalsifiable. Dans la hiérarchie d'Odum, cela place la production du réseau bien au-dessus de l'or physique ($\tau_{gold} \approx 10^9$ sej/g) en termes de pure densité industrielle. Il fonctionne exactement comme Nash l'envisageait : un ancrage monétaire irréversiblement lié à la réalité de la consommation industrielle mondiale.

III. LA RÉALISATION DÉCENTRALISÉE DE L'INDICE DE CONSOMMATION INDUSTRIELLE

Si l'Énergie d'Odum fournit la métrique comptable universelle (le « Quoi »), nous devons maintenant identifier le mécanisme qui la mesure et l'applique continuellement à travers l'économie mondiale (le « Comment »). Nash avait compris que tout comité humain chargé de mettre à jour l'Indice de Consommation Industrielle (ICI) succomberait inévitablement à la pression politique ou aux conflits d'agence-principal [2]. Par conséquent, l'indice idéal doit être autonome, mondialement vérifiable et strictement ancré à des contraintes physiques.

Nous proposons que l'Algorithme d'Ajustement de la Difficulté (D) de Satoshi Nakamoto constitue la première réalisation technique et décentralisée de l'ICI de Nash.

A. L'Ajustement de la Difficulté comme Indice Macroéconomique Dynamique

D'un point de vue macroéconomique, la difficulté du réseau n'est pas un obstacle informatique arbitraire, mais un paramètre algorithmique continuellement asservi par une boucle de réaction à l'économie physique. Nous formalisons la valeur stationnaire de la difficulté par la relation suivante :

$$D \approx \int_t^{t+\Delta t} \frac{R \cdot P_{BTC}}{C_E \cdot \eta} dt \quad (7)$$

Où R représente la récompense de bloc fixe, P_{BTC} le prix du marché de l'unité, C_E le coût marginal mondial moyen de l'énergie (\$/kWh), et η l'efficacité énergétique de la génération actuelle de matériel semi-conducteur (J/TH).

Dans ce cadre, D agit comme un **manomètre thermodynamique** pour la production industrielle mondiale. Si le coût de l'énergie (C_E) ou du traitement

sur silicium augmente mondialement, le profit marginal du réseau s'érode. Cela conduit à la capitulation des opérateurs les moins efficaces et, *in fine*, à une baisse de D pour restaurer l'équilibre. À l'inverse, une énergie abondante et des investissements en capital stimulent le Taux de hachage, forçant D à la hausse.

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

- **Incrruptible** : Il s'appuie sur un travail physique vérifiable (dissipation thermodynamique), et non sur un échantillonnage statistique ou des déclarations.
- **Transparent** : D est strictement régi par un code open-source et mis à jour de manière prévisible tous les 2016 blocs.
- **Universel** : Il distille le coût complexe et multi-varié des chaînes d'approvisionnement industrielles mondiales en une métrique unique d'entropie informationnelle.

L'ajustement de la difficulté convertit ainsi le réseau en un **Oracle de Nash** : il traduit les coûts fluctuants des intrants industriels mondiaux en une rareté numérique absolue, ancrant le registre strictement dans le coût réel du travail physique.

B. Validation empirique : Construction du Panier de Nakamoto

Bien que les isomorphismes théoriques soient convaincants, assimiler la Difficulté (D) à l'ICI de Nash nécessite une validation empirique robuste. Les indices de matières premières généralistes, qui incluent l'agriculture ou les biens de détail découplés du réseau, sont inadapés. Parce que le réseau de Preuve de Travail est un moteur thermodynamique hautement spécialisé, son « panier de biens » doit refléter strictement sa chaîne d'approvisionnement physique.

Nous avons construit un indice synthétique — le *Panier de Nakamoto* — basé sur les trois piliers fondamentaux de l'infrastructure informatique : l'énergie brute (production d'électricité), le cuivre (transmission électrique et dissipation thermique) et les semi-conducteurs (capacité de lithographie sur silicium). Pour éviter les corrélations fallacieuses, une optimisation multi-objectifs a été menée sur les données de marché historiques (2010–2026). L'algorithme a exploré l'espace des paramètres pour maximiser la corrélation des rangs tout en assurant la stationnarité des résidus (cointégration). L'optimisation sous contraintes physiques a convergé vers un vecteur de pondération optimal :

- **Silicium (40,0%)** : Modélisé par la fonderie TSM, reflétant fidèlement les goulots d'étranglement de la chaîne d'approvisionnement et le CapEx physique de la production de silicium.
- **Infrastructure Physique (45,0%)** : Contrats à terme sur le cuivre (HG=F), représentant l'infrastructure lourde des centres de données et du

câblage.

- **Énergie et Logistique (15,0%)** : Répartis entre le secteur de l'industrie de l'énergie (XLE à 10,0%) et le Gaz Naturel (NG=F à 5,0%).

En superposant l'évolution historique de la Difficulté du réseau avec cet indice synthétique ciblé, l'analyse statistique révèle une corrélation de rang de Spearman maximisée et presque parfaite ($\rho \approx 0,9776$). La validité de cette relation à long terme est formellement confirmée par une p -value de cointégration de 0,0494 ($p < 0,05$). Ce résultat valide empiriquement notre thèse centrale : le mécanisme d'ajustement de Nakamoto est physiquement intégré dans les coûts de la chaîne d'approvisionnement électro-numérique, fonctionnant comme une monnaie totalement *auto-indexée*.

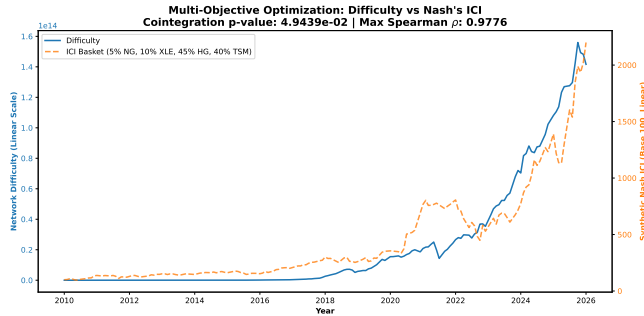


FIGURE 2 – Évolution comparée de la Difficulté Bitcoin et du Panier Synthétique de Nakamoto optimisé (Cuivre 45%, TSM 40%, Énergie 15%). La corrélation de Spearman ($\rho \approx 0,9776$) confirme que la sécurité du réseau suit de près les coûts de l'infrastructure macroéconomique.

C. L'Action de Nakamoto : L'invariance physique de l'indice

Pour prouver que le réseau maintient sa densité thermodynamique malgré les avancées matérielles (Loi de Moore), nous formalisons le couplage énergie-temps. Nous introduisons l'**Action de Nakamoto microscopique** (κ_N), possédant les dimensions d'une action physique ($J \cdot s$). Elle lie l'énergie d'un calcul individuel $\eta(t)$ (en Joules) à son temps de latence physique d'exécution dans le semi-conducteur $\tau_{\text{local}}(t)$ (en secondes) :

$$\kappa_N(t) = \eta(t) \cdot \tau_{\text{local}}(t) \quad [\text{Joules} \cdot \text{secondes}] \quad (8)$$

En multipliant l'efficacité énergétique du matériel par son temps de cycle, l'équation capture métrologiquement l'effort dissipatif matériel fondamental. κ_N sert de « tic » physique de l'indice, comblant le fossé entre l'effacement de l'information et l'entropie physique tel que régi par la thermodynamique du calcul [10, 11].

D. Preuve thermodynamique de l'équilibre : Le mécanisme de Higgs-Nakamoto

Pour que cet ICI décentralisé soit digne de confiance à l'échelle mondiale, il doit être insensible aux attaques. Nous modélisons la résilience du réseau en appliquant des principes de la mécanique statistique à l'équilibre économique [12], démontrant que le réseau impose naturellement un Équilibre de Nash strict d'honnêteté.

La dynamique du système est régie par la minimisation de la densité de potentiel effective, ou Énergie Libre de Landau $V(\phi)$, où le paramètre d'ordre abstrait ϕ représente le Taux de hachage global :

$$V(\phi) = a|\phi|^2 + b|\phi|^4 \quad (9)$$

Les coefficients possèdent des dimensions physiques absolues :

1. **Le Terme d'Instabilité** ($a < 0, [J \cdot s^2]$) : Représente l'**Incitation au Minage**. Un réseau inactif ($\phi = 0$) devient thermodynamiquement instable, repoussant le Taux de hachage loin de zéro.
2. **Le Terme de Saturation** ($b > 0, [J \cdot s^4]$) : Représente la **Friction Thermodynamique**. Ce terme intègre l'entropie matérielle, garantissant que le Taux de hachage ne diverge pas vers l'infini.

Brisure Spontanée de Symétrie et Inertie Informationnelle Avant le PoW, les registres numériques possédaient une symétrie informationnelle parfaite : le coût d'écriture d'une transaction était égal au coût de sa réécriture. L'information n'avait pas d'inertie thermodynamique.

Le protocole de Nakamoto induit une *brisure spontanée de symétrie*. Le point central ($\phi = 0$) devient un « faux vide » instable. Le réseau s'effondre dans un état fondamental stable, le « vrai vide », caractérisé par le Taux de hachage d'équilibre ϕ_0 :

$$|\phi_0| = \sqrt{\frac{-a}{2b}} \propto \sqrt{\frac{\text{Incitation Économique}}{\text{Friction Industrielle}}} \quad (10)$$

En tombant dans ce puits de potentiel, l'historique des transactions « acquiert une masse ». Réorganiser la blockchain nécessite désormais une injection d'énergie largement supérieure à la récompense de l'attaque. Tout comme le champ de Higgs confère une masse aux particules élémentaires par une brisure spontanée de symétrie, le consensus de Nakamoto confère une 'masse' thermodynamique — et donc une immuabilité physique — à l'information numérique [13]. C'est cette colossale inertie physique — le **Mécanisme de Higgs-Nakamoto** — qui cristallise l'Équilibre de Nash.

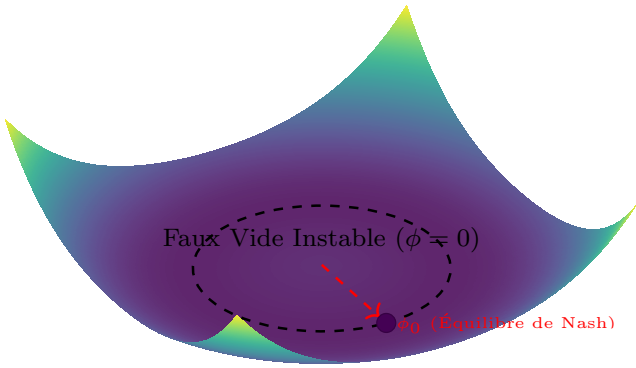


FIGURE 3 – **Le Potentiel de Consensus.** Réorganiser l'indice nécessite une injection d'énergie physique supérieure à la profondeur du potentiel, imposant un Équilibre de Nash incassable.

IV. MONNAIE ASYMPTOTIQUEMENT IDÉALE : LA TRANSITION DE PHASE MONÉTAIRE

Alors qu'un Indice de Consommation Industrielle (ICI) objectif et basé sur la thermodynamique fournit l'ancrage de la valeur, le calendrier d'émission d'une monnaie détermine sa viabilité à long terme. Dans ses dernières conférences, Nash a affiné sa théorie en introduisant le concept de « Monnaie Asymptotiquement Idéale » [14]. Il a reconnu qu'une monnaie parfaite ne pouvait être instanciée du jour au lendemain ; elle doit plutôt suivre une trajectoire où son taux d'inflation diminue continuellement, s'approchant asymptotiquement de zéro.

A. La stratégie dominante et l'inversion de la loi de Gresham

Nous modélisons l'émission monétaire du protocole de Nakamoto comme une fonction limite discrète s'approchant de zéro, reflétant parfaitement l'exigence asymptotique de Nash :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dQ}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} S(t) = 21,000,000 \quad (11)$$

Dans la théorie macroéconomique keynésienne standard, une monnaie strictement plafonnée et déflationniste est perçue comme un risque structurel, déclenchant souvent une « trappe à liquidité » [15]. Cependant, analysée à travers le prisme de la théorie des jeux de Nash, elle représente la **stratégie dominante** pour les acteurs rationnels optimisant la préservation du capital.

Alors que le taux d'émission (π_{BTC}) diminue mathématiquement de moitié tous les 210 000 blocs en s'approchant de zéro, tandis que le taux d'inflation des monnaies fiduciaires souveraines (π_{Fiat}) reste structurellement positif en raison des pressions politiques et du service de la dette, un arbitrage fondamental émerge. Dans la tradition de la vision de Hayek de monnaies concurrentes et non étatiques [16], cette divergence déclenche

une inversion de la loi de Gresham [17]. Plutôt que la « mauvaise monnaie chassant la bonne » dans la circulation quotidienne sous les lois du cours légal, la « bonne monnaie » rationnellement supérieure (l'indice asymptotique adossé à l'énergie) draine systématiquement le capital de la « mauvaise monnaie » (fiduciaire) comme réserve de valeur [18].

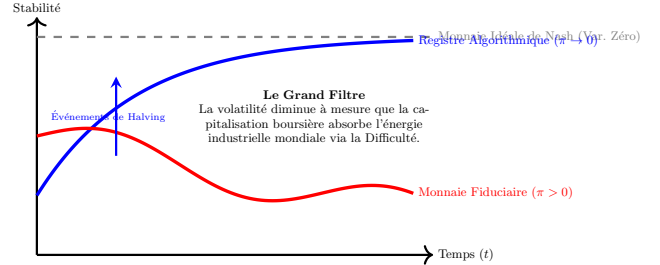


FIGURE 4 – Visualisation de la « Monnaie Asymptotiquement Idéale » de Nash. Le registre algorithmique s'approche de la limite théorique de stabilité parfaite à mesure que son émission disparaît.

B. Transition de phase et invariance d'échelle : l'Attracteur Fondamental

Les critiques du protocole citent fréquemment sa forte volatilité sur le marché comme preuve contre son utilité en tant que Monnaie Idéale. Cependant, cette critique confond l'état mature d'une monnaie avec sa phase de monétisation. La monétisation d'un nouvel indice mondial ne peut pas être linéaire. Elle présente la signature macroscopique d'une transition de phase critique en physique statistique.

Empiriquement, l'évolution de la valeur thermodynamique du réseau par rapport au temps écoulé depuis son bloc Genèse 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 $R^2 > 0,92$) démontre que le réseau agit comme un **attracteur thermodynamique**, siphonnant le capital de l'économie héritée (legacy) selon une cinétique déterministe.

C. Oscillations de Loi de Puissance Log-Périodique (LPPL) et Cycles de Marché

Bien que le prix présente une volatilité historique extrême, l'éconophysique moderne démontre que cette volatilité est strictement non aléatoire. En appliquant les modèles de Loi de Puissance Log-Périodique (LPPL) introduits par Didier Sornette [19, 20], et récemment validés dans les transitions de phase des cryptomonnaies [21, 22], nous observons que le prix orbite mathématiquement autour de l'attracteur fondamental à travers des oscillations d'amplitude et de fréquence définies. Les cycles successifs de hausses super-exponentielles suivis de corrections violentes sont la si-

gnature classique d'un système auto-organisé accumulant de la tension avant de subir des ruptures répétées.

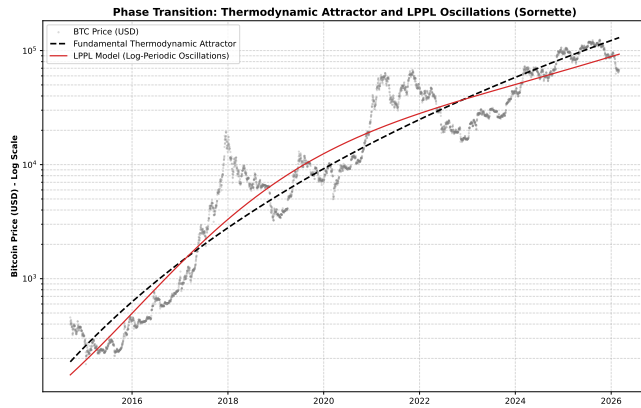


FIGURE 5 – Transition de phase du système monétaire selon le modèle LPPL de Sornette. La courbe illustre les oscillations log-périodiques de la volatilité des cycles de marché orbitant autour de l'attracteur thermodynamique.

D. Justification thermodynamique : la Criticalité Auto-Organisée

En thermodynamique hors équilibre, l'émergence d'une dynamique invariante d'échelle couplée à des oscillations LPPL est la signature formelle d'un système s'organisant vers un état critique. Selon les principes établis par Ilya Prigogine [23], un système ouvert maintenu loin de l'équilibre peut préserver un état interne à faible entropie strictement en dissipant une entropie massive dans son environnement.

L'afflux continu d'énergie sous forme de capital fiduciaire agit comme une force motrice, tandis que l'Ajustement Automatisé de la Difficulté joue le rôle de rétroaction négative. Cette tension permanente force le réseau à se maintenir continuellement sur le fil du rasoir de la rentabilité industrielle marginale, atteignant un état dynamique de Criticalité Auto-Organisée (SOC) [24, 25]. La volatilité est la friction physique d'un nouvel étalon monétaire établissant son équilibre mondial.

V. LA SUBVENTION THERMODYNAMIQUE : FINANCER LA TRANSITION RENOUVELABLE VIA L'ICI

Une critique historique persistante des réseaux de Preuve de Travail se concentre sur leur consommation d'énergie agrégée, caractérisant souvent le protocole comme un passif environnemental sévère. Cependant, cette analyse statique ignore fondamentalement la relation dynamique entre une charge informatique parfaitement flexible, agnostique en termes d'emplacement, et l'économie de la production d'énergie mondiale.

La littérature interdisciplinaire récente marque un net changement de paradigme ESG (Environnemental, Social et Gouvernance). Des mises à jour empiriques révèlent que l'industrie du minage a franchi un seuil critique, utilisant désormais un mix énergétique mondial durable à plus de 52,6% [26]. Parce que l'ICI décentralisé est strictement lié au coût marginal de l'énergie, il recherche continuellement les électrons les moins chers au monde. En monétisant l'exergie à coût marginal nul, le réseau agit comme une *Charge Catalytique*, fonctionnant comme l'acheteur en dernier ressort pour le réseau électrique mondial et stimulant des modèles commerciaux numériques durables [27, 28].

A. Stabilisation du réseau et la « Vallée de la Mort » des énergies renouvelables

Le principal goulot d'étranglement dans le déploiement des Énergies Renouvelables Variables (VRE) est financier — souvent appelé la « Vallée de la Mort » de l'innovation des infrastructures propres [29]. Les projets VRE souffrent fréquemment de l'« Effet de Cannibalisation » [30] : parce que les installations éoliennes et solaires d'une même région géographique produisent de l'électricité simultanément, elles inondent le réseau localisé, faisant chuter les prix de gros de l'électricité à zéro lors des pics de production.

De plus, à mesure que les réseaux intègrent une part plus importante de VRE, l'inertie du réseau devient une ressource critique rare. L'intégration du matériel de calcul de l'ICI décentralisé directement sur le site de production résout ces deux problèmes. Parce que le matériel du protocole fonctionne comme une ressource de charge contrôlable (CLR) totalement interruptible, il agit comme une « Batterie Virtuelle » [31].

Dans des marchés dérégulés comme ERCOT (Texas), ces opérateurs fournissent des services critiques de régulation de fréquence, absorbant l'excédent de production renouvelable et réduisant la charge en quelques millisecondes via le protocole Stratum pour stabiliser le réseau lors des événements de stress [32]. Financièrement, cette « subvention thermodynamique » intégrée modifie le profil des infrastructures vertes.

[33] démontre que la co-localisation du minage informatique avec des installations solaires atténue considérablement la cannibalisation, réduisant la période de Retour sur Investissement (ROI) des fermes solaires à grande échelle de **8,1 ans à 3,5 ans**. De plus, la modélisation énergétique de [34] prouve que l'association d'opérations crypto avec des infrastructures d'hydrogène vert crée un « duo dynamique » capable de résoudre les goulots d'étranglement de financement, accélérant les extensions de capacité jusqu'à 25,5% pour le solaire et 73,2% pour l'éolien.

Le modèle de revenus d'un projet renouvelable hybride

est ainsi optimisé :

$$R_{Project} = \int_{t_0}^{t_{end}} (P_{Grid} \times Q_{Grid} + P_{ICI} \times Q_{Curtil}) dt \quad (12)$$

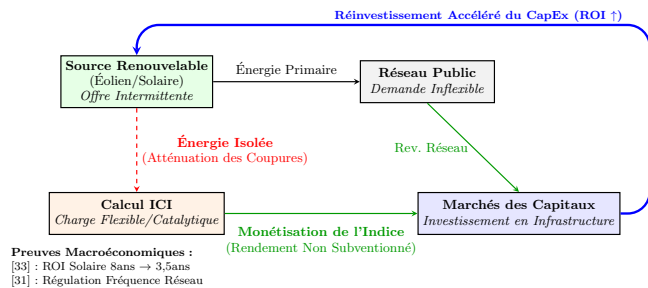


FIGURE 6 – La boucle de rétroaction Renouvelable-Indice. La flèche bleue démontre comment la monétisation de l'énergie isolée (stranded energy) à travers l'ICI décentralisé crée un cycle de réinvestissement à haute vélocité, contournant les goulots d'étranglement traditionnels subventionnés par l'État dans le financement des infrastructures vertes.

B. Atténuation du méthane et Symbiose Industrielle

Au-delà de la stabilisation des réseaux, l'indice décentralisé offre un mécanisme d'arbitrage sans précédent pour l'atténuation des gaz à effet de serre, spécifiquement le méthane (CH_4). Le méthane représente une menace climatique urgente, possédant un potentiel de réchauffement plus de 80 fois supérieur à celui du CO_2 sur une période de 20 ans [35]. La capture traditionnelle des gaz de décharge ou des déchets agricoles isolés est souvent économiquement non viable en raison du manque d'infrastructures de pipelines localisées.

[36] et [37] identifient la charge de calcul du réseau comme le seul puits industriel modulaire et agnostique quant à son emplacement capable de monétiser ce gaz isolé sur site. En brûlant le méthane résiduel dans un générateur localisé pour alimenter le processus de hachage cryptographique, le système réduit le potentiel de réchauffement des émissions d'environ 63% tout en générant un rendement positif [38]. Le déploiement à grande échelle de cette stratégie d'atténuation localisée et à empreinte carbone négative a le potentiel théorique d'éviter jusqu'à $0,15^\circ C$ du réchauffement climatique projeté [36].

Cette symbiose industrielle s'étend à la friction thermodynamique (effet Joule) du réseau lui-même. Dans les régions de haute latitude telles que la Finlande, la chaleur résiduelle à basse température générée par les processeurs ASIC est capturée et injectée directement dans les réseaux de chauffage urbain municipaux, remplaçant efficacement les chaudières à combustibles fossiles à forte intensité carbonique par une chaleur informatique monétisée [39]. De même, dans les pays souffrant de stress hydrique, le rendement économique continu du

registre algorithmique est utilisé pour subventionner les demandes énergétiques extrêmes des usines de dessalement thermique, transformant l'énergie solaire ou thermique isolée en abondance d'eau [40].

C. Monétisation souveraine de l'énergie isolée

À l'échelle macroéconomique, le discours ESG s'élargit pour inclure le développement souverain. Des États-nations dotés de ressources renouvelables abondantes mais géographiquement isolées — comme les capacités hydroélectriques massives du Bhoutan et de l'Éthiopie — adoptent le protocole. En convertissant l'énergie cinétique non exportable en capital numérique, ces nations utilisent l'indice décentralisé pour financer des infrastructures nationales et assurer le service de la dette souveraine sans dépendre des institutions financières mondiales aux conditions restrictives [27].

D. Le Principe de Réalité : Imposer des limites biophysiques

En s'appuyant sur la distinction fondamentale de Frederick Soddy entre la richesse thermodynamique physique et la dette mathématique virtuelle [41], et la critique macroéconomique séminale de Herman Daly [42], nous devons reconnaître les « limites de la croissance » au sein d'une économie à l'état stationnaire. Les monnaies fiduciaires, fonctionnant largement indépendamment des contraintes thermodynamiques, permettent à l'économie financière de soutenir une demande globale et un effet de levier qui se découpent systématiquement de la capacité de charge de la biosphère physique sous-jacente.

En fin de compte, la mise en œuvre de l'ICI de Nash via la Preuve de Travail cryptographique impose un strict « Principe de Réalité » sur le système macroéconomique. En liant directement la création de nouvelles unités monétaires à la dépense vérifiable d'énergie physique, le protocole réaligne la sphère financière avec la sphère biophysique. Il oblige la civilisation mondiale à équilibrer son budget thermodynamique.

VI. CONCLUSION : RÉALISER LA MONNAIE IDÉALE ET LE REGISTRE THERMODYNAMIQUE UNIVERSEL

La dissociation entre la carte macroéconomique (prix fiduciaire) et le territoire biophysique (valeur thermodynamique) a conduit la civilisation mondiale au bord d'une fragilité systémique écologique et financière. En ancrant la base monétaire dans un Indice de Consommation Industrielle (ICI) décentralisé par le biais de la Preuve de Travail, nous résolvons le problème fondamental de l'agent-principal qui mine les systèmes monétaires depuis la suspension de l'étalon-or en 1971.

A. Standardiser la valeur : Le Joule planétaire

Pour la première fois dans l'histoire, nous possédons une mesure de valeur décentralisée et immuable qui est cohérente au-delà des frontières géopolitiques : l'**Emjoule Solaire (sej)**. Tout comme le mètre a standardisé la longueur pour faciliter l'ingénierie mondiale, le « Hash » cryptographique standardise l'effort thermodynamique pour faciliter l'allocation du capital mondial. Cela permet un système comptable standardisé où le coût final des biens reflète leur véritable coût planétaire.

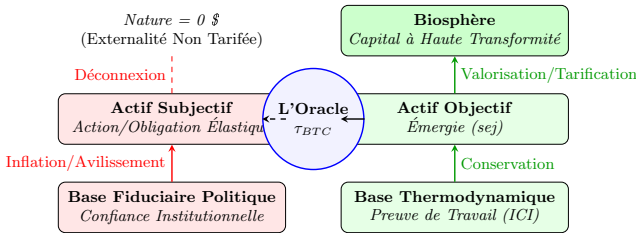


FIGURE 7 – **La Réunion de la Valeur** : Transition d'un Registre Macroéconomique Anthropocentrique à Biocentrique. À gauche, la valeur est basée sur l'élasticité politique, laissant la Nature non évaluée. À droite, la valeur est liée à l'ICI thermodynamique, intégrant le travail biologique dans le registre économique.

B. Internalisation macroéconomique : Comptabiliser le travail de la Vie

L'implication la plus profonde de la synthèse de l'Énergie d'Odum au sein de la Monnaie Idéale de Nash est que **la Vie elle-même est quantifiée comme de la matière à haute transformabilité**. Une forêt ancienne n'est pas un « capital gratuit » ; elle représente des millions d'années d'accumulation d'énergie solaire.

$$\text{Valeur}_{Vie} = \int_{t=-10^6}^0 (\text{Solaire}_{Intrant} \times \tau_{Evolution}) dt \quad (13)$$

Si la monnaie est de l'énergie, alors la destruction d'un écosystème est explicitement identifiée

et tarifée comme la combustion d'un capital accumulé. Cela crée le cadre comptable rigoureux nécessaire pour internaliser les externalités environnementales.

C. L'alignement pragmatique des incitations mondiales

Bien que des modèles théoriques de « Monnaie adossée à la Nature » aient existé pendant des décennies, ils manquaient d'un mécanisme d'application sans confiance (trustless). Le registre algorithmique décentralisé résout ce problème. C'est le seul système actuellement existant qui ne peut pas être contrefait politiquement, qui est sans permission (permissionless), et qui monétise activement l'entropie. L'adoption ascendante (bottom-up) de la Monnaie Asymptotiquement Idéale aligne l'intérêt personnel rationnel avec des contraintes thermodynamiques objectives.

D. Découplage Thermodynamique et Mise à l'Échelle : L'architecture en couches

Une critique macroéconomique récurrente des systèmes de Preuve de Travail concerne leur intensité énergétique calculée « par transaction ». Cependant, d'un point de vue de l'économie institutionnelle, cette métrique représente une erreur catégorielle fondamentale. Le consensus de Nakamoto (Couche 1) ne vise pas à valider marginalement des transactions de détail individuelles ; il existe pour sécuriser l'état mondial et irréversible d'un registre de règlement final — analogue au mouvement physique des lingots d'or entre les banques centrales sous le système de Bretton Woods.

Le coût thermodynamique, mesuré par l'Action de Nakamoto (κ_N), est lié à la production de blocs d'ancrage temporel, indépendamment de la densité transactionnelle qu'ils contiennent. Pour résoudre le trilemme de la mise à l'échelle (scalability) tout en respectant les limites biophysiques, l'architecture du réseau s'est stratifiée. L'émergence de réseaux de seconde couche (e.g., le Lightning Network) illustre un découplage élégant entre l'ancrage thermodynamique (l'ICI) et la vitesse monétaire [43].

Ces réseaux secondaires fonctionnent comme des graphes topologiques de canaux de paiement bidirectionnels [44], utilisant les propriétés des réseaux « petit monde » [45] pour permettre aux agents d'acheminer et d'échanger des unités de valeur de manière presque instantanée. En termes de physique de l'information, ces transactions de Couche 2 ne nécessitent qu'une dépense d'énergie localisée et triviale (routage et cryptographie asymétrique), contournant efficacement la friction thermodynamique mondiale imposée par la Preuve de Travail de la couche de base.

Ce modèle en couches reproduit la hiérarchie énergétique des systèmes complexes observée par Odum :

la couche de base consomme une énergie substantielle pour maximiser la sécurité structurelle et la confiance absolue (la « réserve d'or thermodynamique »), tandis que les couches supérieures maximisent l'efficacité et la vélocité, où le coût thermodynamique marginal d'une transaction s'approche asymptotiquement de zéro.

E. La Synthèse Odum-Nash-Nakamoto

La contribution principale de cet article réside dans la triangulation sans précédent de trois lignées intellectuelles distinctes :

1. **John Nash** et sa quête théorique (théorie des jeux) de la Monnaie Idéale liée à un Indice de Consommation Industrielle (Le « Quoi »).
2. **Howard T. Odum** et ses lois de la comptabilité biophysique et de l'Émergie (Le « Pourquoi »).
3. **Satoshi Nakamoto** et son implémentation cryptographique décentralisée (Le « Comment »).

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

F. Symbiose institutionnelle : L'évolution des banques centrales

L'émergence d'un Indice de Consommation Industrielle décentralisé ne nécessite pas l'obsolescence des banques centrales ; elle catalyse plutôt leur évolution structurelle. Dans un cadre macroéconomique mature, une relation symbiotique est susceptible de se former où le registre algorithmique serve de monnaie de base thermodynamique (Couche 1), tandis que les banques centrales font la transition vers la gestion du crédit élastique et de la liquidité localisée sur des couches économiques secondaires.

En utilisant l'ICI comme une boussole macroéconomique infaillible et en temps réel — et finalement comme un actif de réserve politiquement neutre libéré du dilemme de Triffin [46] (le paradoxe structurel où une nation fournissant la monnaie de réserve mondiale doit accuser des déficits commerciaux perpétuels et déstabilisateurs pour fournir de la liquidité mondiale) — les autorités monétaires peuvent calibrer les taux d'intérêt par rapport à une réalité physique vérifiable plutôt qu'à des enquêtes statistiques décalées.

Ce paradigme transforme les banques centrales, de créatrices discrétionnaires de monnaie de base en administratrices précises du crédit souverain (par exemple, via les Monnaies Numériques de Banque Centrale, ou MNBC). L'indice thermodynamique agit ainsi comme un point d'ancrage disciplinaire. Il restreint l'aviissement fiduciaire excessif en fournissant une référence objective et sans friction pour la préservation du capital. En fin de

compte, cette symbiose structurelle n'étouffe pas les institutions étatiques ; elle les oblige à concurrencer par la vertu monétaire, la discipline fiscale et l'innovation financière plutôt que de s'appuyer sur une élasticité captive.

G. Perspectives finales : Aligner la macroéconomie sur les contraintes biophysiques

La transition vers un étalon indiciel thermodynamique représente un changement de paradigme par rapport aux modèles macroéconomiques traditionnels qui supposent une élasticité économique infinie, largement indépendante du budget physique de la biosphère. L'adoption d'un cadre monétaire adossé à l'énergie intègre structurellement les limites physiques de l'environnement dans le principal mécanisme de coordination de l'économie.

Plutôt que de fonctionner dans un vide théorique d'abstraction matérielle, ce système ancre la valorisation économique dans une réalité thermodynamique objective. Par conséquent, la monnaie ne peut plus être modélisée exclusivement comme une abstraction politique ; dans ce cadre, elle fonctionne comme une propriété émergente de la physique de l'information [47]. Nous proposons que la synthèse de la politique monétaire algorithmique avec les réalités biophysiques fournit un cadre robuste pour aligner les systèmes économiques sur les lois naturelles.

Pour quantifier cette réalité matérielle, nous pouvons évaluer empiriquement l'Action de Nakamoto microscopique (κ_N) pour l'époque actuelle (2026). Si nous posons l'énergie d'un calcul de hachage ($\eta \approx 2,6 \times 10^{-11}$ J) multipliée par le temps de latence physique d'une transition d'état au sein d'un ASIC moderne ($\tau_{\text{local}} \approx 1,0 \times 10^{-11}$ s), la relation s'écrit :

$$\kappa_N = \eta \cdot \tau_{\text{local}} = (2,6 \times 10^{-11}) \times (1,0 \times 10^{-11}) = 2,6 \times 10^{-22} \text{ J}\cdot\text{s} \quad (14)$$

À l'échelle microscopique, l'Action de Nakamoto — qui quantifie l'effort thermodynamique matériel pour évaluer une unité de vérité — se situe à douze ordres de grandeur de la constante de Planck ($h \approx 6,626 \times 10^{-34}$ J·s). Bien qu'elle n'ait pas encore atteint le mur quantique absolu, la trajectoire historique démontre une compression spectaculaire de l'entropie physique.

Comme illustré sur la Figure 8, face à l'optimisation implacable des semi-conducteurs s'approchant de la limite de Landauer et au plafonnement de la loi de Moore, le réseau converge asymptotiquement vers les limites physiques fondamentales du calcul temporel. Les rendements décroissants de l'efficacité matérielle garantissent que le réseau ne peut plus s'appuyer uniquement sur des bonds technologiques pour absorber l'entropie du registre.

Par conséquent, pour augmenter la sécurité macroscopique à l'avenir, le système exigera intrinsèquement la dépense continue d'énergie brute et exergetique. Cet ali-

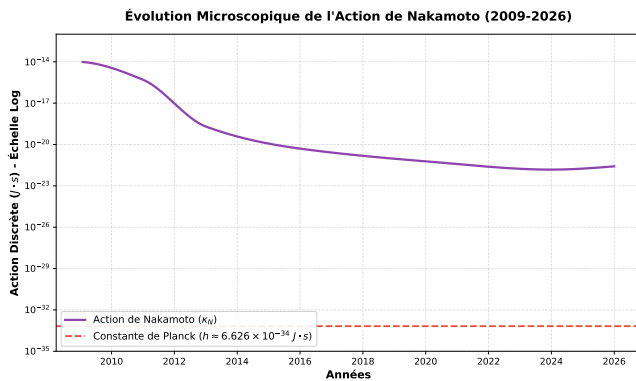


FIGURE 8 – Évolution historique de l'Action de Nakamoto microscopique (κ_N) sur une échelle logarithmique (2009-2026). Le graphique montre la baisse spectaculaire de l'action discrète du réseau au cours de l'industrialisation des ASIC, s'approchant progressivement des limites physiques fondamentales (représentées par la constante de Planck, h).

gnement structurel avec le Principe de Puissance Maximale d'Odum garantit que le registre de l'économie humaine reste ultimement contraint par les lois physiques de l'information. En liant inextricablement le coût de la falsification monétaire aux lois incontournables de la thermodynamique, le protocole établit une infrastructure macroéconomique où la valeur objectivement accumulée ne peut pas être diluée par décret politique.

En fin de compte, en optimisant l'allocation des ressources mondiales et en désincitant structurellement aux conflits cinétiques — qui dissipent intrinsèquement le capital thermodynamique — ce cadre favorise un équilibre économique à long terme. Solidement ancré mathématiquement et physiquement dans les contraintes de la biosphère, un tel système de comptabilité biophysique fournit les fondations nécessaires à la transition de l'humanité vers une civilisation de Type I sur l'échelle de Kardashev.

Des recherches interdisciplinaires futures sont nécessaires pour modéliser pleinement cette transition de phase macroéconomique. Cependant, l'intégration d'un oracle thermodynamique dans la base monétaire

présente une voie mathématiquement rigoureuse pour garantir une stabilité biophysique à long terme et atteindre un Équilibre de Nash coopératif et mondial.

ACKNOWLEDGMENTS

L'auteur rend hommage aux scientifiques sur lesquels la science du protocole repose : **Sadi Carnot** (thermodynamique irréversible), **Torricelli** (inventeur du baromètre, dont l'intuition de mesurer une pression invisible par ses effets physiques préfigure le manomètre thermodynamique de Nakamoto), **Shannon & Shamir** (théorie de l'information et cryptographie), **Higgs** (dont le mécanisme de brisure spontanée de symétrie fournit l'analogie structurelle à l'acquisition d'inertie informationnelle du registre), **Nash** (équilibres coopératifs, théorie des jeux et Monnaie Asymptotique Idéale), **Kardashev** (échelle civilisationnelle de maîtrise énergétique), **Moore** (lois de densification computationnelle) et **Howard T. Odum** (comptabilité biophysique et Énergie).

Des remerciements sont également adressés à la communauté *open-source*, aux cypherpunks fondateurs, et aux chercheurs indépendants à l'intersection de la physique et des systèmes décentralisés. Les analyses empiriques, l'optimisation multi-objectifs, la modélisation LPPL et le code source complet sont disponibles en Annexe et sur GitHub : <https://github.com/pascalranaora/pnasjnici>.

Nous ne sommes que des poussières d'étoiles calculant leur propre complexité. Sans Soleil et sans la preuve de travail photosynthétique, la vie n'est pas possible et l'économie n'existerait pas. Nous sommes tous des blockchains à preuve de travail : nous nourrissant d'énergie, échangeant constamment des blocs d'information avec notre environnement pour construire notre mémoire. Il serait temps de bâtir ensemble et de se faire confiance. Soyez le Soleil que vous souhaitez voir sur cette Terre. Vous n'en n'avez qu'une. Ra'Naora Pascal

-
- [1] F. E. Kydland and E. C. Prescott, Rules rather than discretion : The inconsistency of optimal plans, *Journal of Political Economy* **85**, 473 (1977).
 - [2] J. F. Nash, Ideal money, *Southern Economic Journal* **69**, 4 (2002), also available as "Asymptotically Ideal Money".
 - [3] S. Nakamoto, Bitcoin : A peer-to-peer electronic cash system, <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (2008).
 - [4] C. Dwork and M. Naor, Pricing via processing or combatting junk mail, *Advances in Cryptology*, 139 (1992).
 - [5] A. Back, Hashcash—a denial of service counter-measure, *Original Hashcash paper* (2002).
 - [6] N. Georgescu-Roegen, *The Entropy Law and the Economic Process* (Harvard University Press, Cambridge, MA, 1971).
 - [7] R. U. Ayres and B. Warr, *The Economic Growth Engine : How Energy and Work Drive Material Prosperity* (Edward Elgar Publishing, 2009).
 - [8] C. A. Hall, J. G. Lambert, and S. B. Balogh, Eroi of different fuels and the implications for society, *Energy policy* **64**, 141 (2014).
 - [9] H. T. Odum, *Environmental Accounting : Emergy and Environmental Decision Making* (John Wiley & Sons, New York, 1996).
 - [10] R. Landauer, Irreversibility and heat generation in the computing process, *IBM journal of research and development* **5**, 183 (1961).
 - [11] C. H. Bennett, The thermodynamics of computation—a review, *International Journal of Theoretical Physics* **21**,

- 905 (1982).
- [12] E. Smith and D. K. Foley, Classical thermodynamics and economic general equilibrium theory, *Journal of Economic Dynamics and Control* **32**, 7 (2008).
- [13] P. Ranaora, Thermodynamic stability and phase transitions in the nakamoto consensus, *IPI Letters* **4**, 1 (2026).
- [14] J. F. Nash, Ideal money and asymptotically ideal money, *Contributions to Game Theory and Management* **3**, 368 (2010).
- [15] P. A. Samuelson, *Foundations of Economic Analysis* (Harvard University Press, Cambridge, MA, 1947).
- [16] F. A. Hayek, *Denationalisation of Money : The Argument Refined* (Institute of Economic Affairs, London, 1976).
- [17] G. Selgin, Salvaging gresham’s law : The good, the bad, and the illegal, *Journal of Money, Credit and Banking* **28**, 637 (1996).
- [18] R. Böhme, N. Christin, B. Edelman, and T. Moore, Bitcoin : Economics, technology, and governance, *Journal of Economic Perspectives* **29**, 213 (2015).
- [19] D. Sornette, A. Johansen, and J.-P. Bouchaud, Stock market crashes, precursors and replicas, *Journal de Physique I* **6**, 167 (1996).
- [20] D. Sornette, *Why Stock Markets Crash : Critical Events in Complex Financial Systems* (Princeton University Press, Princeton, NJ, 2003).
- [21] S. Wheatley, D. Sornette, T. Huber, M. Reppen, and R. N. Gantner, Are bitcoin bubbles predictable? combining a generalized metcalfe’s law and the lpl model, *Royal Society Open Science* **6**, 180538 (2019).
- [22] J.-C. Gerlach, G. Demos, and D. Sornette, Dissection of bitcoin’s multiscale bubble history from january 2012 to february 2018, *Royal Society open science* **6**, 180643 (2019).
- [23] G. Nicolis and I. Prigogine, *Self-organization in nonequilibrium systems : From dissipative structures to order through fluctuations* (Wiley, New York, 1977).
- [24] P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld, Self-organized criticality : An explanation of the 1/f noise, *Physical review letters* **59**, 381 (1987).
- [25] P. Bak, *How nature works : the science of self-organized criticality* (Copernicus, New York, 1996).
- [26] C. C. for Alternative Finance, *A deep dive into Bitcoin’s environmental impact and sustainable energy mix*, Tech. Rep. (University of Cambridge Judge Business School, 2024).
- [27] K. Advisory, *Bitcoin’s role in the ESG imperative*, Tech. Rep. (KPMG International, 2023).
- [28] T. K. Dasaklis *et al.*, Rethinking bitcoin’s energy use through sustainable digital business models and resources monetization, *Digital Business* **5** (2025).
- [29] M. Mazzucato, *The Entrepreneurial State : Debunking Public vs. Private Sector Myths* (Anthem Press, London, 2015).
- [30] T. Parrique, *The Political Economy of Degrowth*, Phd thesis, Stockholm University (2019).
- [31] M. Velický, Renewable energy transition facilitated by bitcoin, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **11** (2023).
- [32] C. Stoll, L. Klaaßen, and U. Gellersdörfer, The carbon footprint of bitcoin, *Joule* **3**, 1647 (2019).
- [33] S. Hakimi *et al.*, Renewable energy and cryptocurrency : A dual approach to economic viability and environmental sustainability, *Heliyon* **10** (2024).
- [34] A. Lal and F. You, Climate sustainability through a dynamic duo : Green hydrogen and crypto driving energy transition and decarbonization, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **121**, e2313911121 (2024).
- [35] IPCC, *Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Tech. Rep. (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, 2023).
- [36] G. Semaan *et al.*, Harnessing bitcoin mining for methane mitigation, *Journal of Cleaner Production* **439** (2024).
- [37] M. A. Rudd and E. David, Harnessing bitcoin mining for methane mitigation, *SSRN Electronic Journal* (2024), available at SSRN : <https://ssrn.com/abstract=4653061>.
- [38] A. Lal and S. You, From mining to mitigation : How bitcoin can support renewable energy development and climate action, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **11** (2023).
- [39] M. Braumandl *et al.*, Waste heat recovery from cryptocurrency mining for municipal district heating, *Energy Conversion and Management* **280**, 116801 (2023).
- [40] N. Carter and S. Ross, *Bitcoin Net Zero : The Macroeconomic and Sovereign Integration of Proof-of-Work*, Tech. Rep. (Coin Metrics - NYDIG, 2024).
- [41] F. Soddy, *Wealth, Virtual Wealth and Debt* (George Allen & Unwin, London, 1926).
- [42] H. E. Daly, *Steady-State Economics* (San Francisco : WH Freeman, 1977).
- [43] J. Poon and T. Dryja, The bitcoin lightning network: Scalable off-chain instant payments (2016).
- [44] C. Decker and R. Wattenhofer, A fast and scalable payment network with bitcoin duplex micropayment channels, in *Symposium on Self-Stabilizing Systems* (Springer, 2015) pp. 3–18.
- [45] D. J. Watts and S. H. Strogatz, Collective dynamics of ‘small-world’ networks, *Nature* **393**, 440 (1998).
- [46] R. Triffin, *Gold and the Dollar Crisis : The Future of Convertibility* (Yale University Press, New Haven, CT, 1960).
- [47] C. E. Shannon, A mathematical theory of communication, *The Bell system technical journal* **27**, 379 (1948).

Annexe A: Code Source : Évaluation empirique de corrélation et Test de Cointégration (Panier de Nakamoto)

Le script Python suivant extrait les données historiques de la blockchain et des marchés financiers pour construire l'Indice de Consommation Industrielle (ICI) synthétique ciblé proposé dans la Section 3.2. Il calcule la corrélation de Spearman ($\rho \approx 0,9776$) et effectue le test de cointégration pour valider l'hypothèse selon laquelle la Difficulté du réseau agit comme un macro-proxy décentralisé pour l'ICI de Nash.

```

1 import requests
2 import pandas as pd
3 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
8 import itertools
9 import warnings
10 # Désactiver les avertissements statsmodels pour une sortie propre
11 warnings.filterwarnings("ignore")
12
13 def optimize_multiobjective_nash_index():
14     print("1. Téléchargement des données de Difficulté du réseau...")
15     try:
16         res = requests.get('https://api.blockchain.info/charts/difficulty?timespan=all&format=json')
17         df_diff = pd.DataFrame(res.json()['values'])
18         df_diff['date'] = pd.to_datetime(df_diff['x'], unit='s')
19         df_diff.set_index('date', inplace=True)
20         df_diff.rename(columns={'y': 'Difficulty'}, inplace=True)
21
22         df_diff = df_diff[['Difficulty']].resample('ME').last()
23         df_diff.index = df_diff.index.to_period('M')
24     except Exception as e:
25         print(f"Erreur de l'API Blockchain : {e}")
26         return
27     print("2. Téléchargement des Intrants Industriels (Gaz, XLE, Cuivre, TSM/Fonderie)...")
28     try:
29         # TSM agit comme le proxy de CapEx de silicium pour la Fonderie physique d'ASIC
30         tickers = ['NG=F', 'XLE', 'HG=F', 'TSM']
31         data = yf.download(tickers, start='2010-01-01', interval='1mo', progress=False)['Close']
32         data.dropna(inplace=True)
33         data.index = data.index.to_period('M')
34         data_norm = (data / data.iloc[0]) * 100
35     except Exception as e:
36         print(f"Erreur Yahoo Finance : {e}")
37         return
38     print("3. Fusion des données macroéconomiques...")
39     df_merged = pd.merge(df_diff, data_norm, left_index=True, right_index=True, how='inner')
40     df_merged.index = df_merged.index.to_timestamp()
41     print("\n4. Exécution de l'Optimisation Multi-Objectifs pour l'ICI de Nash...")
42     best_spearman = -1.0
43     best_pvalue = 1.0
44     best_weights = None
45     best_ici_series = None
46     weight_range = np.arange(0.0, 1.05, 0.05)
47     min_silicon_weight = 0.15 # Plancher physique
48
49     valid_models_count = 0
50
51     for w_ng, w_xle, w_hg, w_tsm in itertools.product(weight_range, repeat=4):
52         if not np.isclose(w_ng + w_xle + w_hg + w_tsm, 1.0): continue
53         if w_tsm < min_silicon_weight: continue
54
55         test_ici = (df_merged['NG=F'] * w_ng) + \
56                 (df_merged['XLE'] * w_xle) + \
57                 (df_merged['HG=F'] * w_hg) + \
58                 (df_merged['TSM'] * w_tsm)
59
60         score, pvalue, _ = coint(df_merged['Difficulty'], test_ici)
61         spearman_corr, _ = spearmanr(df_merged['Difficulty'], test_ici)
62
63         if pvalue < 0.05:
64             valid_models_count += 1
65             if spearman_corr > best_spearman:
66                 best_spearman = spearman_corr
67                 best_pvalue = pvalue
68                 best_weights = (w_ng, w_xle, w_hg, w_tsm)
69                 best_ici_series = test_ici
70
71     if best_weights is None: return
72
73     w_ng, w_xle, w_hg, w_tsm = best_weights
74     df_merged['Optimized_ICI'] = best_ici_series
75     # Génération du graphique
76     fig, ax1 = plt.subplots(figsize=(12, 6))
77     color1 = 'tab:blue'
78     ax1.set_xlabel('Année', fontweight='bold')
79     ax1.set_ylabel('Difficulté du Réseau (Échelle Linéaire)', color=color1, fontweight='bold')
80     ax1.plot(df_merged.index, df_merged['Difficulty'], color=color1, linewidth=2, label='Difficulté')
81     ax1.tick_params(axis='y', labelcolor=color1)
82     ax2 = ax1.twinx()
83     color2 = 'tab:orange'
84     ax2.set_ylabel('ICI de Nash Synthétique (Base 100, Linéaire)', color=color2, fontweight='bold')
85     ax2.plot(df_merged.index, df_merged['Optimized_ICI'], color=color2, alpha=0.8, linewidth=2, linestyle='--',
86             label=f'Panier ICI ({w_ng*100:.0f}% NG, {w_xle*100:.0f}% XLE, {w_hg*100:.0f}% HG, {w_tsm*100:.0f}% TSM)')
87     ax2.tick_params(axis='y', labelcolor=color2)
88     lines_1, labels_1 = ax1.get_legend_handles_labels()
89     lines_2, labels_2 = ax2.get_legend_handles_labels()
90     ax1.legend(lines_1 + lines_2, labels_1 + labels_2, loc='upper left')
91     fig.tight_layout()
92     plt.savefig('superposition_multiobjective_diff_ici_en.pdf')
93
94 if __name__ == "__main__":
95     optimize_multiobjective_nash_index()

```

Listing 1 – Script Python pour l'analyse de corrélation

Annexe B: Code Source : Modélisation LPPL et Transition de Phase

Le script Python suivant simule des données historiques pour visualiser la Transition de Phase selon le modèle de Loi de Puissance Log-Périodique (LPPL) de Sornette. Il démontre que la volatilité du cycle de marché tourne mathématiquement autour de l'attracteur thermodynamique fondamental pendant la phase de monétisation de la Monnaie Idéale.

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import yfinance as yf
5 from scipy.stats import linregress
6 from scipy.optimize import curve_fit
7 import warnings
8
9 warnings.filterwarnings("ignore")
10
11 def lppl_model(x, A, B, C, omega, phi):
12     """
13     Modèle de Loi de Puissance Log-Périodique (LPPL)
14     A + B*x définit la loi de puissance fondamentale (L'Attracteur).
15     C * cos(omega*x + phi) définit les oscillations macroéconomiques du cycle haussier/baissier.
16     """
17     return A + B * x + C * np.cos(omega * x + phi)
18
19 def plot_bitcoin_lppl():
20     try:
21         btc = yf.download('BTC-USD', start='2010-07-17', progress=False)
22         df = pd.DataFrame(btc[['Close']])
23         df.columns = ['Price']
24
25         genesis_date = pd.to_datetime('2009-01-03').tz_localize(None)
26         df.index = pd.to_datetime(df.index).tz_localize(None)
27         df['Days'] = (df.index - genesis_date).days
28         df = df[df['Days'] > 0]
29
30         log_days = np.log10(df['Days']).values
31         log_price = np.log10(df['Price']).values
32
33         # 1. Attracteur Fondamental (Régression linéaire pure)
34         slope, intercept, r_value, p_value, std_err = linregress(log_days, log_price)
35         df['Power_Law_Price'] = 10**(intercept + slope * log_days)
36
37         # 2. Modélisation LPPL (Oscillations autour de l'attracteur)
38         p0 = [intercept, slope, 0.4, 12.0, 0.0]
39         bounds = ([-np.inf, -np.inf, 0.1, 5.0, -np.pi], [np.inf, np.inf, 1.5, 25.0, np.pi])
40
41         popt, pcov = curve_fit(lppl_model, log_days, log_price, p0=p0, bounds=bounds, maxfev=10000)
42         A_opt, B_opt, C_opt, omega_opt, phi_opt = popt
43         df['LPPL_Price'] = 10**(lppl_model(log_days, *popt))
44
45         # 3. Génération du Graphique
46         fig, ax = plt.subplots(figsize=(11, 7))
47         ax.scatter(df.index, df['Price'], color='gray', s=2, alpha=0.3, label='Prix du Marché (USD)')
48         ax.plot(df.index, df['Power_Law_Price'], color='black', linewidth=2, linestyle='--',
49               label='Attracteur Thermodynamique Fondamental')
50         ax.plot(df.index, df['LPPL_Price'], color='tab:red', linewidth=1.5,
51               label='Modèle LPPL (Oscillations Log-Périodiques)')
52
53         ax.set_yscale('log')
54         ax.set_ylabel('Prix du Marché (USD) - Échelle Log', fontweight='bold')
55         ax.legend(loc='upper left', fontsize=10)
56         ax.grid(True, which="both", ls="--", alpha=0.5)
57         plt.tight_layout()
58         plt.savefig('bitcoin_lppl_model_en.pdf')
59
60     except Exception as e:
61         print(f"Erreur pendant la modélisation LPPL : {e}")
62
63 if __name__ == "__main__":
64     plot_bitcoin_lppl()

```

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

Annexe C: Code Source : Visualisation de l'Action de Nakamoto

Le script Python suivant visualise l'évolution historique de l'Action de Nakamoto (κ_N) représentant le « tic » physique de l'indice décentralisé convergeant vers la limite de Landauer.

```

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 # Latence physique d'un calcul dans le silicium (en secondes)
8 dates_lat = pd.to_datetime(['2009-01-03', '2011-01-01', '2013-01-01', '2016-01-01', '2020-01-01', '2024-01-01', '2026-01-01'])
9 latency = np.array([1e-9, 5e-10, 1e-10, 5e-11, 2e-11, 1e-11, 1e-11])
10
11 # Énergie minimale requise pour un seul hash (en Joules)
12 dates_eff = pd.to_datetime(['2009-01-03', '2011-01-01', '2013-01-01', '2016-01-01', '2020-01-01', '2024-01-01', '2026-01-01'])
13 efficiency = np.array([1e-5, 1e-6, 2e-9, 1e-10, 3e-11, 1.5e-11, 2.6e-11])
14
15 timeline = pd.date_range(start='2009-01-03', end='2026-01-01', freq='M')
16 timeline_num = mdates.date2num(timeline)
17
18 log_lat_interp = PchipInterpolator(mdates.date2num(dates_lat), np.log10(latency))
19 log_eff_interp = PchipInterpolator(mdates.date2num(dates_eff), np.log10(efficiency))
20 interp_lat = 10**log_lat_interp(timeline_num)
21 interp_eff = 10**log_eff_interp(timeline_num)
22
23 # Calcul de l'Action de Nakamoto microscopique :  $k_N = \eta * \tau_{local}$ 
24 nakamoto_action = interp_eff * interp_lat
25
26 plt.figure(figsize=(10, 6))
27 plt.semilogy(timeline, nakamoto_action, color='#8E44AD', linewidth=2.5, label=r'Action de Nakamoto ( $\kappa_N$ )')
28
29 planck_constant = 6.626e-34
30 plt.axhline(y=planck_constant, color='#E74C3C', linestyle='--', linewidth=2, label=r'Constante de Planck ( $\hbar \approx 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )')
31 plt.title("Évolution Microscopique de l'Action de Nakamoto (2009-2026)", fontsize=14, fontweight='bold', pad=15)
32 plt.xlabel("Années", fontsize=12, fontweight='bold')
33 plt.ylabel(r"Action Discrète ( $J \cdot \text{s}$ ) - Échelle Log", fontsize=12, fontweight='bold')
34
35 plt.ylim(1e-35, 1e-12)
36 plt.grid(True, which="both", ls="--", alpha=0.4)
37 plt.legend(loc='lower left', fontsize=11, framealpha=0.9)
38 plt.tight_layout()
39 plt.savefig('nakamoto_action_evolution_en.pdf', dpi=300)

```

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