

Le Coût Métabolique de la Vérité : Neurodynamique du Consensus et Résolution de la Dissipation Cognitive

Pascal Ranaora*
Institut de Physique de l'Information
(Dated: 3 février 2026)

Nous présentons un modèle neuro-thermodynamique de la cognition humaine où la "vérité" est redéfinie non comme un concept moral, mais comme un état métastable à haute énergie libre nécessitant un investissement métabolique critique (inhibition corticale, plasticité synaptique). En appliquant l'hypothèse du Temps Thermique, nous démontrons que l'environnement informationnel actuel (monnaie Fiat, hyper-stimulation) agit comme un bain thermique surcritique, forçant l'effondrement des fonctions cognitives vers des attracteurs de dissipation minimale (conformisme, biais cognitifs). Cet article établit que la conscience réflexive obéit à une contrainte de confinement hamiltonien, violée par l'agitation dopaminergique moderne. Enfin, nous identifions le Consensus de Nakamoto (Preuve de Travail) comme une prothèse néguentropique externe indispensable pour restaurer des niches thermodynamiques viables, permettant la préservation de la cohérence temporelle et de la rationalité profonde face à l'entropie systémique.

I. INTRODUCTION : L'ÉCONOMIE DE L'ATP CÉRÉBRAL ET LE COÛT DE LA VÉRITÉ

L'axiome fondamental de la psychobiologie moderne n'est ni moral, ni logique, mais thermodynamique : le cerveau obéit à une contrainte d'efficacité énergétique stricte. Bien qu'il ne représente que 2% de la masse corporelle, cet organe accapare environ 20% du budget métabolique total au repos (environ 20 Watts), une disproportion documentée sous le nom d'"Énergie Noire du Cerveau" [1]. Cette contrainte impose une pression sélective impitoyable sur les processus cognitifs, favorisant systématiquement les heuristiques à faible coût [2].

A. La Vérité comme Anomalie Métabolique

Contrairement à l'intuition cartésienne, la pensée critique (Système 2) n'est pas l'état par défaut du cerveau [3]. Nous posons ici que la "Vérité" — définie comme l'adéquation précise entre une représentation interne et une réalité extérieure complexe — est une configuration physique coûteuse en Adénosine Triphosphate (ATP).

La recherche de vérité exige un investissement métabolique contre-entropique à trois niveaux distincts :

- 1. Inhibition Top-Down ($E_{inhibit}$) :** Pour accéder à une vérité non-triviale, le Cortex Préfrontal (PFC) doit exercer un contrôle inhibiteur sur les réponses automatiques du système limbique. Ce processus dépend fortement de l'activité des interneurons GABAergiques, dont le coût métabolique est élevé pour maintenir les potentiels de membrane [4].
- 2. Maintien d'États Métastables (E_{meta}) :** La résolution d'ambiguïtés cognitives nécessite le maintien d'informations contradictoires dans l'Espace de Travail Global (Global Neuronal Workspace). Cet état requiert une synchronisation neuronale à longue distance (bande gamma > 40 Hz), particulièrement énergivore comparée à l'activité asynchrone de repos [5, 6].

- 3. Reconfiguration Synaptique ($E_{plasticity}$) :** L'intégration d'une nouvelle vérité qui contredit un modèle interne (Prior) nécessite une plasticité synaptique structurelle. Contrairement à la simple transmission synaptique, la consolidation à long terme (L-LTP) exige une synthèse protéique de novo et un remodelage cytosquelettique coûteux [7, 8].

B. Le Mensonge comme Optimum Thermodynamique

À l'opposé, le conformisme ou l'adhésion au narratif dominant représentent des états de "relaxation énergétique".

Selon le *Free Energy Principle* de Karl Friston, le cerveau est une machine à inférence qui cherche à minimiser sa "Surprise" (entropie informationnelle) [9]. Adopter l'opinion du groupe (Preuve Sociale) permet de minimiser l'erreur de prédiction sans engager de coût computationnel interne. Le système dopaminergique mésolimbique renforce cette stratégie d'économie par une gratification immédiate [10].

Dans un environnement hyper-stimulé, le cerveau bascule en mode "Survie Énergétique" : il sacrifie la précision bayésienne pour l'efficacité calorique. Comme le soulignent Sterling et Laughlin dans leur analyse de l'allostase, l'organisme n'optimise pas pour la vérité, mais pour la viabilité métabolique [11].

C. La Neutralisation Cognitive

Nous formulons donc la prédiction suivante : dans un système où l'énergie est abondante mais l'information saturée (Signal-to-Noise Ratio faible), les réseaux neuronaux convergent vers des attracteurs de dissipation minimale. La "Neutralisation Cognitive" n'est pas un choix moral, mais une configuration énergétique inévitable en l'absence de contrainte physique forte (Preuve de Travail).

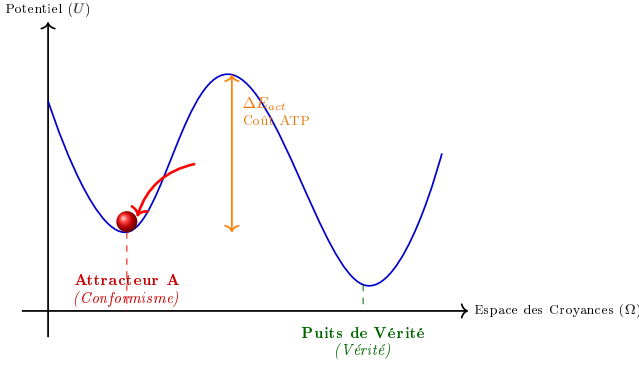


FIGURE 1. Paysage Thermodynamique. Sans effort (ATP), le système glisse vers l'attracteur A.

II. FORMALISME HAMILTONIEN DE LA PENSÉE : THERMODYNAMIQUE DE L'ATTRACTEUR

Pour dépasser la métaphore littéraire, nous modélisons la dynamique neuronale comme un système physique à N-corps interagissant, analogue à un verre de spin ou à un réseau de Hopfield [12]. L'état cognitif global Ψ évolue sur une surface d'énergie définie par un Hamiltonien effectif H_c .

L'émergence d'une "pensée véritable" (structure stable et cohérente) dépend de la compétition entre trois termes énergétiques fondamentaux :

$$H_c(\Psi) = \underbrace{T_{dopa}}_{\text{Agitation}} + \underbrace{V_{sens}}_{\text{Profondeur}} + \underbrace{H_{int}}_{\text{Couplage}} \quad (1)$$

A. Le Terme Cinétique : Température Dopaminergique (T_{dopa})

En thermodynamique, la température mesure l'agitation microscopique. Dans notre modèle neuro-cognitif, la "température" T est pilotée par le système de saillance incitative (dopamine phasique) et le flux d'informations entrant [13].

$$T_{dopa} \propto \sum_i \frac{1}{2} m \left(\frac{d\sigma_i}{dt} \right)^2 + \Phi_{noise} \quad (2)$$

Où $\frac{d\sigma_i}{dt}$ représente la fréquence de commutation de l'attention (switching cost) et Φ_{noise} le bruit sensoriel exogène. Dans une économie de l'attention (scroll infini, notifications), T_{dopa} atteint des niveaux critiques. Comme démontré par Rolls et Deco, un excès de bruit synaptique déstabilise les attracteurs corticaux [14]. Le système entre alors dans un régime de "gaz cognitif" : les idées s'entrechoquent mais ne se lient jamais pour former des structures complexes.

B. Le Terme Potentiel : Puits de Sens (V_{sens})

Le potentiel V_{sens} décrit la topologie de l'espace sémantique. Une "Vérité" ou un concept profond correspond à un puits de potentiel profond (un attracteur fort) dans le réseau neuronal.

$$V_{sens}(\Psi) = - \sum_{\mu} \xi^{\mu} m^{\mu}(\Psi) \quad (3)$$

Où les motifs ξ^{μ} sont les souvenirs/concepts consolidés (mémoire à long terme). Pour qu'une pensée résiste à l'agitation thermique T_{dopa} , la profondeur du puits ΔV doit satisfaire la condition d'Arrhenius :

$$P_{escape} \propto e^{-\Delta V / k_B T_{dopa}} \quad (4)$$

Nous introduisons ici une constante effective d'échelle, la **Constante de Nakamoto** (k_{Nak}), qui remplace k_B pour les systèmes macroscopiques. Elle relie l'unité d'information (le bit/bloc) à l'énergie sociale dissipée (Joule). Si T_{dopa} augmente (hyper-stimulation), la probabilité P_{escape} tend vers 1 : l'esprit est éjecté du puits de réflexion avant d'avoir pu consolider la pensée. C'est la définition physique du "Déficit d'Attention".

C. Le Couplage : Résonance vs Mimétisme (H_{int})

Enfin, la pensée n'est jamais isolée. Le terme d'interaction décrit le couplage avec d'autres agents cognitifs :

$$H_{int} = - \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} S_i S_j \quad (5)$$

Dans un système sain, J_{ij} représente un échange dialectique constructif (Résonance). Dans un système pathologique (réseaux sociaux), J_{ij} devient un terme de champ moyen mimétique uniformisant ($J \rightarrow \infty$), forçant l'alignement des spins S_i (opinions) sans coût énergétique critique.

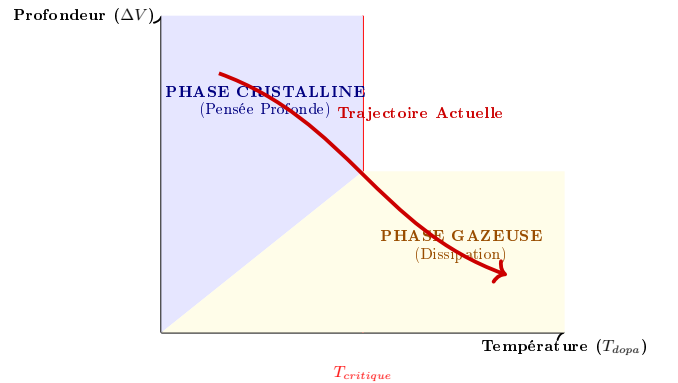


FIGURE 2. Diagramme de Phase Cognitif. Transition vers le désordre au-delà de $T_{critique}$.

D. La Condition de Confinement Hamiltonien

L'apport théorique majeur de ce modèle est de définir la conscience réflexive non comme une propriété magique, mais comme un état de la matière neuronale soumis à une contrainte de phase [15]. Pour qu'une intégration de l'information ($\Phi > 0$) ait lieu, le système doit respecter la **Condition de Confinement** :

$$\langle V_{sens} \rangle \gg k_B T_{eff} \quad (6)$$

Si cette inégalité est violée, le système subit une *transition de phase du second ordre*. La cohérence temporelle se brise. Le sujet ne "pense" plus ; il réagit stochastiquement aux stimuli, tel une particule brownienne. C'est la "Vaporisation du Moi" prédite par la thermodynamique hors d'équilibre [16].

III. LA CATASTROPHE NEURO-GLIALE ET LE TEMPS THERMIQUE

La physique conventionnelle traite le temps comme une variable indépendante t . Cependant, les travaux d'Alain Connes et Carlo Rovelli sur la gravité quantique suggèrent une inversion ontologique majeure : le temps n'est pas fondamental, il émerge de la thermodynamique [17, 18].

A. L'Hypothèse du Temps Thermique

Dans un système sans dynamique temporelle préexistante (comme l'état de Gibbs d'un système quantique), le "temps" est défini par le flux modulaire de l'état d'équilibre. Formellement, le temps τ est proportionnel à l'inverse de la température $\beta = 1/kT$:

$$\frac{d\tau}{dt_{phys}} \propto \beta \cdot \Sigma_{prod} \quad (7)$$

Où Σ_{prod} est la production d'entropie locale. **Interprétation Biologique** : Plus un organisme dissipe de l'énergie de manière désordonnée (haute entropie), plus son temps subjectif "s'accélère" et plus sa cohérence temporelle interne se désagrège. Le sujet ne vit plus dans la durée bergsonienne (continue), mais dans un temps thermique haché.

B. La Faillite Métabolique de l'Astrocyte

Le titre de cette section mentionne la composante "Gliale". Les astrocytes sont les intendants énergétiques du cerveau via la navette lactate-glucose [19]. Ils couplent l'activité synaptique à l'apport énergétique.

1. Régime Sain (Temps Long) : L'astrocyte finance la plasticité structurelle (mémoire, apprentissage). L'énergie est investie dans la structure (Néguentropie).

2. Régime Pathologique (Dopamine Rapide) :

Sous le bombardement de stimuli numériques (Reconnaissance Narcissique immédiate), la demande énergétique dépasse la capacité de recyclage glial. Le système passe en "surchauffe". L'énergie est dissipée en pure chaleur, sans création de structure [20].

C. Effondrement de l'Horizon Temporel

La conséquence physique de cette dissipation maximale est la contraction de l'horizon des événements cognitifs. Marc Wittmann a démontré que l'impulsivité est corrélée à une "surestimation" de la durée présente [21]. Dans un système à haute préférence temporelle (Fiat/TikTok), le futur n'existe plus neurobiologiquement car le coût énergétique pour le simuler excède les réserves gliales disponibles.

Le sujet est piégé dans un "Éternel Présent" thermodynamique. C'est la "Fin de l'Histoire" à l'échelle individuelle : une incapacité structurelle à projeter une causalité au-delà de l'instant t .

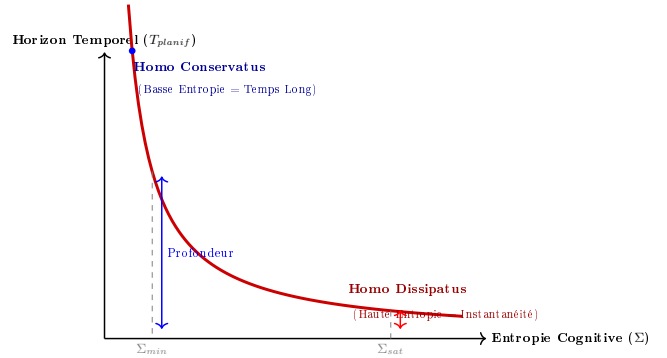


FIGURE 3. **L'Effondrement de l'Horizon**

Relation inverse entre Dissipation et Planification.

Selon l'hypothèse du Temps Thermique ($\tau \propto 1/\Sigma$), l'augmentation de la dissipation entropique (bruit, dopamine) contracte mécaniquement l'horizon temporel du sujet. Au-delà d'un seuil critique (Σ_{sat}), le futur devient physiquement inaccessible à la conscience.

D. La Singularité de l'Attention

Nous vivons une rupture de symétrie. L'interface numérique agit comme un accélérateur de particules pour l'attention, augmentant la fréquence des interactions ($dt \rightarrow 0$) tout en diminuant leur sens ($dS \rightarrow \infty$). Le cerveau, organe lent optimisé pour des cycles circadiens, subit une "friction temporelle" destructrice. Sans ralentisseur externe (une horloge à difficulté ajustable comme la Preuve de Travail), la psyché se volatilise dans la chaleur.

IV. LE COÛT DE LA VÉRITÉ VS. LE COÛT DU MENSONGE : THERMODYNAMIQUE DU SIGNAL

Pourquoi le mensonge se propage-t-il plus vite que la vérité? La réponse réside dans une asymétrie fondamentale de l'univers physique, exacerbée par nos structures monétaires. Nous définissons l'efficacité cognitive η d'un agent comme le rapport entre le gain de structure interne et le coût métabolique engagé :

$$\eta = \frac{\Delta I_{\text{structurelle}}}{\Delta E_{\text{ATP}}} \quad (8)$$

A. Le Principe du Handicap et le "Cheap Signal"

En biologie évolutive, le *Principe du Handicap* stipule qu'un signal n'est fiable que s'il impose un coût significatif à son émetteur (ex : la queue du paon) [22]. Ce coût, ou "Skin in the Game", garantit que seuls les individus aptes peuvent émettre le signal [23].

Dans une économie Fiat, la création monétaire *ex nihilo* supprime ce handicap. Elle permet à des acteurs (États, entreprises zombies, influenceurs) d'émettre des signaux forts (publicité, propagande, luxe) sans la dépense énergétique correspondante. Le coût du signal tend vers zéro ($Cost \rightarrow 0$). Conséquence thermodynamique : l'environnement se sature de "bruit" mimétique. Pour un cerveau cherchant à économiser son ATP, il devient métaboliquement suicidaire de vérifier chaque information. L'alignement sur le narratif dominant (mimétisme) devient la seule stratégie de survie énergétique viable.

B. L'Asymétrie de Brandolini-Shannon

Nous formalisons ici la "Loi de Brandolini" (le coût de réfutation d'une bêtise est supérieur au coût de sa production) par une inégalité de complexité de Kolmogorov [24] :

$$E_{\text{verification}}(V) \gg E_{\text{creation}}(F) \quad (9)$$

Où V est une Vérité et F une Fausseté.

- Créer F (Entropie élevée) : Nécessite peu de corrélations logiques. C'est une opération de désordre. $\Delta S > 0$.
- Vérifier V (Entropie basse) : Nécessite de remonter la chaîne causale, de croiser les sources, d'inhiber les émotions. C'est un travail de Maxwell Demon. $\Delta S < 0$ (localement).
- **Conversion Dimensionnelle** : Le lien entre ces deux grandeurs est régi par la limite de Landauer [25]. Effacer l'incertitude (le doute) pour valider 1 bit de Vérité coûte au minimum :

$$E_{\min} = k_{\text{B}} T \ln 2 \quad (\text{Joules}) \quad (10)$$

La vérité possède donc une "masse énergétique" incompressible.

Dans un système sans "Preuve de Travail", l'asymétrie diverge. Le mensonge inonde le canal de communication (capacité de Shannon dépassée), et la vérité devient inaudible.

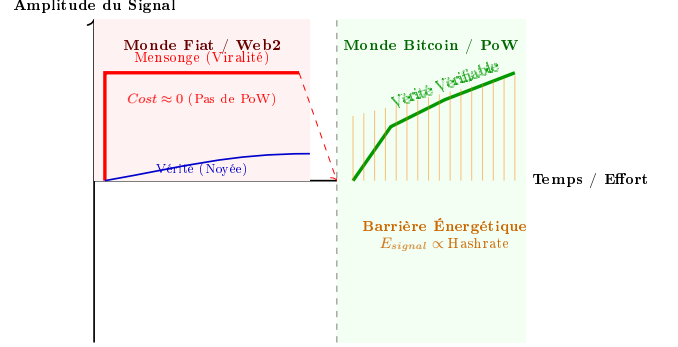


FIGURE 4. **L'Asymétrie du Bullshit**

Restauration du coût du signal par la Preuve de Travail.

À gauche : Sans coût (Fiat), le mensonge sature l'espace car il est "gratuit" énergétiquement.

À droite : La Preuve de Travail (PoW) rétablit un coût plancher. Pour qu'un signal (bloc/vérité) soit accepté, il doit prouver une dépense d'énergie. L'asymétrie s'inverse : mentir devient ruineux ($Cost > Gain$).

C. La Neutralisation comme Optimisation

Face à cette asymétrie, l'individu ne devient pas irrationnel, il adopte une stratégie de *Rationalité Écologique* [2]. Pour survivre, il opte pour la "Neutralisation Cognitive". Il cesse de traiter l'information pour se fier uniquement aux heuristiques de groupe (Preuve Sociale). Ce comportement, souvent qualifié de "moutonnier", est en réalité une solution optimale à un problème d'optimisation sous contrainte [2]. Dans un monde de faux signaux gratuits, penser par soi-même est une dépense à fond perdu.

Cependant, cette optimisation locale mène à un effondrement global de la civilisation (fragilité systémique). La seule manière de briser ce cycle n'est pas d'éduquer les gens à "mieux penser" (coûteux), mais de changer la physique du signal : rendre le mensonge à nouveau coûteux via des protocoles à ancrage thermodynamique (Bitcoin).

V. NAKAMOTO COMME EXOSQUELETTE DE LA VÉRITÉ : UNE PROTHÈSE NÉGUENTROPIQUE

Si le cerveau biologique, limité par son budget ATP (20 W), ne peut plus lutter seul contre l'entropie ambiante d'une société hyper-inflationniste, il doit externaliser sa fonction de régulation. Selon la thèse de l'*Esprit Étendu* d'Andy Clark et David Chalmers, la cognition ne s'arrête pas à la boîte crânienne [26]. Bitcoin agit ici

comme une prothèse cognitive externe, un "Exosquelette de Vérité" qui réintroduit artificiellement la contrainte physique manquante.

A. Le Mur d'Énergie (Unforgeable Costliness)

Nick Szabo a défini la monnaie saine comme une "Coûteuse Infalsifiable" (*Unforgeable Costliness*) [27]. Le consensus de Nakamoto transforme l'énergie électrique brute en vérité mathématique. Pour qu'une information fausse (double dépense, réécriture de l'histoire) soit acceptée par le réseau, l'attaquant doit dépenser une énergie E_{attack} supérieure à l'énergie cumulée du réseau honnête.

$$Cost(Attack) \approx \int_{t_0}^t Hashrate(\tau) \cdot \kappa_{J/H} d\tau \quad (11)$$

Où $\kappa_{J/H}$ est l'efficacité énergétique des machines (Joules/Hash). Ce coût exponentiel agit comme une barrière de potentiel infinie pour les "mensonges". En s'ancrant sur ce registre, l'agent cognitif n'a plus besoin de vérifier la confiance (Trustless); il doit simplement vérifier la preuve de travail accumulée, ce qui est thermodynamiquement gratuit pour lui (asymétrie de vérification).

B. La Niche Thermodynamique (Cryostat Cognitif)

En vivant sur un standard Bitcoin, l'agent opère une "Transition de Phase Inverse". Il quitte le bain thermique agité de la monnaie Fiat pour entrer dans une zone de basse entropie. Schrödinger a défini la vie comme la capacité à extraire de la néguentropie de l'environnement [28]. Bitcoin est une machine à néguentropie pure.

En sécurisant sa valeur (son travail passé) dans une structure thermodynamiquement immortelle, l'individu n'est plus obligé de courir après l'inflation (dissipation).

- **Avant (Fiat)** : $T_{eff} \gg 0$. L'épargne fond. L'horizon temporel est de 1 mois. Comportement : Consommation, Dopamine.
- **Après (Bitcoin)** : $T_{eff} \rightarrow 0$. L'épargne se cristallise. L'horizon temporel s'étend à 100 ans. Comportement : Construction, Sagesse.

C. La Baisse de la Préférence Temporelle

En physique statistique, la "préférence temporelle" est analogue à un taux de décroissance exponentiel. Un système chaud oublie son état initial très vite. Un système froid (supraconducteur, cristal) conserve l'information indéfiniment. Le standard Bitcoin abaisse la température systémique de l'agent.

$$DiscountRate(r) \propto k_B T_{eff} \quad (12)$$

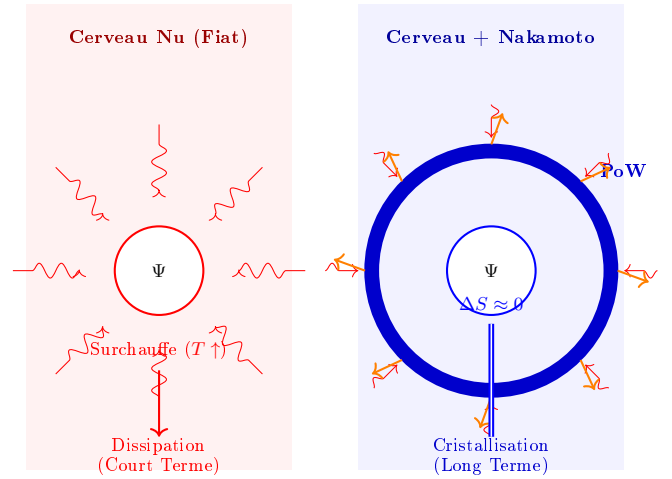


FIGURE 5. **L'Exosquelette Thermodynamique : Bitcoin comme filtre entropique externe.**

À gauche : Sans protection, le cerveau est saturé par le bruit entropique (inflation, fakes).

À droite : Le Consensus de Nakamoto agit comme un bouclier de Maxwell. Il dissipe l'énergie (minage) à l'extérieur du système pour maintenir une zone calme à l'intérieur, permettant à la pensée de se structurer.

En réduisant T_{eff} (via une monnaie déflationniste et énergétiquement ancrée), Bitcoin restaure physiologiquement la capacité à différer la gratification. Ce n'est pas une discipline morale, c'est un refroidissement thermodynamique. Les attracteurs lents (bâtir une cathédrale, élever une famille, écrire un livre) redeviennent énergétiquement rentables face aux attracteurs rapides (consommer, scroller) [25].

VI. CONCLUSION : DYNAMIQUE DES ATTRACTEURS ET SCAFFOLDING THERMODYNAMIQUE

L'humanité se trouve face à une bifurcation de phase critique. L'introduction d'un actif à entropie minimale (Bitcoin) dans un système à entropie croissante (Fiat) induit une divergence dans les stratégies d'adaptation cognitive [29]. Toutefois, il convient de ne pas considérer cette divergence comme une fatalité biologique, mais comme une compétition entre deux attracteurs thermodynamiques.

A. Compétition des Attracteurs : Dissipation vs Conservation

Nous postulons que l'environnement monétaire agit comme une "pression de sélection" favorisant l'émergence de deux phénotypes cognitifs, non pas par mutation génétique, mais par adaptation plastique aux contraintes énergétiques :

- **Le Régime Dissipatif (Attracteur Rapide) :**

Adapté au bruit informationnel, ce sujet optimise sa survie par la réactivité immédiate (High Time Preference). Son cerveau, soumis à une surcharge allostatique (cortisol/dopamine phasique) [30], peine à maintenir l'inhibition top-down nécessaire à la réflexion. Sans contrainte externe, son horizon temporel tend asymptotiquement vers zéro, le rendant vulnérable à l'entropie systémique.

- **Le Régime Conservatif (Attracteur Lent) :** En utilisant la Preuve de Travail comme un "ancrage thermodynamique" externe, ce sujet réduit son coût de maintenance cognitive. Bitcoin n'est pas la *cause* de sa rationalité, mais le *catalyseur* qui rend la basse préférence temporelle énergétiquement rentable. Il s'agit d'une stratégie de "scaffolding" (étagage) où l'agent délègue la résistance à l'entropie à un protocole inaltérable.

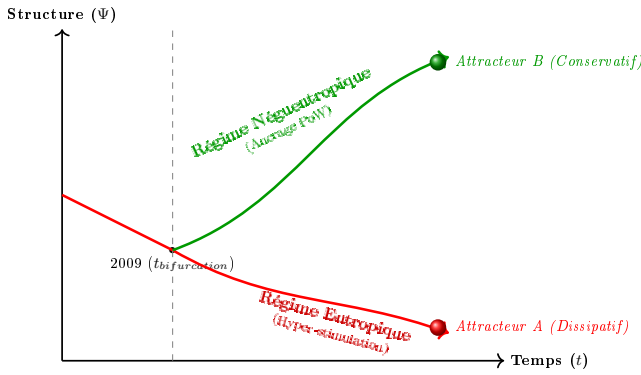


FIGURE 6. **Divergence des Trajectoires Cognitives.** Représentation idéalisée de l'évolution de la structure cognitive (Ψ) en fonction du temps, selon le protocole de validation externe choisi (Fiat vs PoW).

B. Protocole de Validation Empirique

Pour dépasser le stade de l'hypothèse théorique, nous proposons de mesurer l'impact du "Refroidissement Cognitif" (ΔT_{psych}) via une étude longitudinale comparative. Il est crucial de distinguer trois groupes pour isoler les variables : **Groupe A (Bitcoiners > 4 ans)**, **Groupe B (Investisseurs Or/Goldbugs)** et **Groupe C (Fiat/High-Freq Traders)**.

1. Test d'Actualisation Hyperbolique (k -factor)

Utilisation du protocole de Kirby [31] pour dériver le paramètre k ($V = A/(1 + kT)$). *Hypothèse critique :* Si Bitcoin agit spécifiquement par sa nature numérique à coût physique (PoW), le Groupe A devrait présenter un k inférieur non seulement au Groupe C, mais aussi, potentiellement, une résilience supérieure au Groupe B face aux stimuli numériques rapides.

2. Neuroimagerie (Resting State fMRI)

Analyse de la connectivité fonctionnelle entre le **Cortex Préfrontal Dorsolatéral (dlPFC)** (siège du contrôle exécutif) et le **Striatum Ventral** (récompense immé-

diante). *Hypothèse :* L'adoption du standard Bitcoin est corrélée à une "Top-Down Regulation" accrue. Nous anticipons une réduction de l'entropie de Shannon locale dans le Réseau du Mode par Défaut (DMN), signant un état de métastabilité cognitive plus robuste [32].

3. Analyse Sémantique (Complexité de Kolmogorov)

Mesure de la densité informationnelle des productions écrites. *Hypothèse :* Le langage des sujets sous contrainte de preuve de travail (PoW) tend vers une plus grande invariance d'échelle (Loi de Zipf respectée), reflétant un coût énergétique de production plus élevé, contrairement à la dégénérescence syntaxique observée dans les environnements à "cheap signals".

C. Conclusion : La Vérité comme Condition de Phase

En conclusion, la vérité ne doit pas être perçue uniquement comme une vertu morale, mais comme un état de la matière neuronale hautement organisé, nécessitant un flux constant d'énergie libre pour lutter contre la seconde loi de la thermodynamique. Dans un univers numérique tendant vers le coût nul et le bruit infini, Bitcoin agit comme une prothèse néguentropique indispensable. Il ne "sauve" pas l'homme, mais il rétablit les conditions physiques (le coût du signal) permettant à la conscience humaine de se projeter au-delà de l'immédiateté thermique.

* pascal.ranaora@informationphysicsinstitute.net

- [1] M. E. Raichle, The brain's dark energy, *Science* **314**, 1249 (2006), concept fondateur de l'énergie noire du cerveau : coût exorbitant du repos.
- [2] G. Gigerenzer and R. Selten, *Bounded rationality : The adaptive toolbox* (MIT Press, 2001) théorie de la rationalité limitée par les contraintes de ressources.
- [3] D. Kahneman, *Thinking, Fast and Slow* (Farrar, Straus and Giroux, 2011) distinction Système 1 (économique) vs Système 2 (coûteux).
- [4] G. Buzsáki, K. Kaila, and M. E. Raichle, Inhibition and brain work, *Neuron* **56**, 771 (2007), coût métabolique élevé de l'inhibition (GABA) nécessaire à la concentration.
- [5] S. Dehaene and J.-P. Changeux, Experimental and theoretical approaches to conscious processing, *Neuron* **70**, 200 (2011), l'Espace de Travail Global comme état de haute énergie.
- [6] E. Bullmore and O. Sporns, The economy of brain network organization, *Nature Reviews Neuroscience* **13**, 336 (2012), l'optimisation topologique du cerveau pour minimiser le coût de câblage.
- [7] E. R. Kandel, The molecular biology of memory storage : a dialogue between genes and synapses, *Science* **294**, 1030 (2001), coût de la synthèse protéique pour la mémoire à long terme (LTP).
- [8] D. Attwell and S. B. Laughlin, An energy budget for signaling in the grey matter of the brain, *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism* **21**, 1133 (2001), analyse

- biophysique précise du budget ATP par potentiel d'action.
- [9] K. Friston, The free-energy principle : a unified brain theory ?, *Nature Reviews Neuroscience* **11**, 127 (2010), le cerveau minimise l'énergie libre (surprise) pour survivre.
 - [10] W. Schultz, Neuronal reward and decision signals : from theories to data, *Physiological Reviews* **95**, 853 (2015), mécanique de la dopamine et de l'erreur de prédiction.
 - [11] P. Sterling and S. Laughlin, *Principles of Neural Design* (MIT Press, 2015) l'efficacité énergétique comme contrainte évolutive majeure.
 - [12] J. J. Hopfield, Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **79**, 2554 (1982), modélisation des états cognitifs comme des attracteurs énergétiques.
 - [13] K. C. Berridge and T. E. Robinson, What is the role of dopamine in reward : hedonic impact, reward learning, or incentive salience?, *Brain Research Reviews* **28**, 309 (1998), distinction entre "Wanting" (Dopamine/Agitation) et "Liking".
 - [14] E. T. Rolls and G. Deco, *The Noisy Brain : Stochastic Dynamics as a Principle of Brain Function* (Oxford University Press, 2010) le rôle du bruit synaptique dans la stabilité des attracteurs.
 - [15] G. Tononi, An information integration theory of consciousness, *BMC Neuroscience* **5**, 42 (2004), la conscience comme capacité d'intégration (Φ) de l'information.
 - [16] G. Deco, V. K. Jirsa, P. A. Robinson, M. Breakspear, and K. Friston, The dynamic brain : from spiking neurons to neural masses and cortical fields, *PLoS Computational Biology* **4**, e1000092 (2008), transitions de phase et dynamique stochastique corticale.
 - [17] A. Connes and C. Rovelli, Von neumann algebra automorphisms and time-thermodynamics relation in generally covariant quantum theories, *Classical and Quantum Gravity* **11**, 2899 (1994), formalisme mathématique liant algèbre modulaire et temps thermique.
 - [18] C. Rovelli, Forget time, *Foundations of Physics* **41**, 1475 (2011), l'hypothèse du Temps Thermique : le temps émerge de la thermodynamique.
 - [19] P. J. Magistretti and L. Pellerin, Cellular mechanisms of brain energy metabolism and their relevance to functional brain imaging, *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **354**, 1155 (1999), le couplage Neurométabolique et le rôle de l'Astrocyte.
 - [20] G. A. Dienel, Brain glucose metabolism : integration of energetics with function, *Physiological Reviews* **99**, 949 (2019), revue complète de la bioénergétique cérébrale.
 - [21] M. Wittmann, The inner experience of time, *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **364**, 1955 (2013), corrélation entre impulsivité et dilatation subjective du temps.
 - [22] A. Zahavi, Mate selection-a selection for a handicap, *Journal of Theoretical Biology* **53**, 205 (1975), le Principe du Handicap : un signal n'est fiable que s'il est coûteux à produire.
 - [23] N. N. Taleb, *Skin in the Game : Hidden Asymmetries in Daily Life* (Random House, 2018) l'absence de risque (Skin in the Game) découple le signal de la réalité physique.
 - [24] C. H. Bennett, *Logical depth and physical complexity* (The Universal Turing Machine : A Half-Century Survey, 1988) la complexité (ou valeur) d'un objet est liée au temps de calcul nécessaire pour le générer.
 - [25] R. Landauer, Irreversibility and heat generation in the computing process, *IBM journal of research and development* **5**, 183 (1961), lien fondamental entre information et dissipation d'énergie (Principe de Landauer).
 - [26] A. Clark and D. J. Chalmers, The extended mind, *Analysis* **58**, 7 (1998), thèse fondatrice : les outils externes (carnets, ordinateurs) font partie intégrante de la cognition.
 - [27] N. Szabo, Shelling out : The origins of money, Satoshi Nakamoto Institute (2002), la monnaie comme artefact de mémoire coûteux (Unforgeable Costliness).
 - [28] E. Schrödinger, *What is Life ? The Physical Aspect of the Living Cell* (Cambridge University Press, 1944) la vie (et la pensée) comme processus de maintien d'une entropie basse (Néguentropie).
 - [29] J. Henrich, *The Secret of Our Success : How Culture Is Driving Human Evolution* (Princeton University Press, 2015) l'évolution humaine est dirigée par nos outils culturels (et monétaires).
 - [30] R. H. Lustig, The hacking of the american mind, Avery (2017), la distinction neurochimique entre Plaisir (Dopamine/Court terme) et Bonheur (Sérotonine/Long terme).
 - [31] K. N. Kirby, N. M. Petry, and W. K. Bickel, Heroin addicts have higher discount rates for delayed rewards than non-drug-using controls, *Journal of Experimental Psychology : General* **128**, 78 (1999), protocole standard pour mesurer le taux d'actualisation hyperbolique (k -factor).
 - [32] R. L. Carhart-Harris *et al.*, The entropic brain : a theory of conscious states informed by neuroimaging research with psychedelic drugs, *Frontiers in Human Neuroscience* **8**, 20 (2014), définit la santé mentale comme un équilibre critique entre ordre (basse entropie) et chaos (haute entropie).