

Vers une refondation computationnelle de l'espace-temps et des champs quantiques

Olivier Croissant

July 20, 2025

Abstract

Nous proposons une refondation radicale de la physique fondamentale où l'espace-temps et les champs quantiques émergent d'un substrat computationnel causal. Contrairement aux approches standards, notre modèle reconstruit le temps lui-même comme flux d'information dans un réseau de qbits dynamique.

Le cœur théorique repose sur : 1. L'émergence du temps à partir d'un ordre causal primitif : $\Delta\tau_{ij} \propto \min_{\gamma} \int_{\gamma} \mathcal{C}(s)ds$ 2. La dérivation de la métrique espace-temps comme tenseur de corrélations : $g_{\mu\nu} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \epsilon^{-2} \text{Cov}(\mathcal{O}_i, \mathcal{O}_j)$ 3. La gravité comme réponse thermodynamique à la densité computationnelle ρ_{calc}

Nous démontrons comment l'invariance de Lorentz, les équations d'Einstein et la flèche du temps émergent naturellement. Des prédictions testables sont établies : violations de Lorentz ($\Delta v \sim e^{-E/\rho_0^{1/4}}$), anomalies dans le CMB, et variations de constantes fondamentales. Cette reformulation ouvre une voie vers une théorie unifiée computationnellement complète.

Contents

1. Introduction

1.1. Crise du temps en physique fondamentale

La nature du temps reste l'énigme centrale de la physique moderne. En relativité générale, le temps est géométrique ; en théorie quantique, paramétrique ; en cosmologie, asymétrique. Aucune théorie n'explique son émergence. Notre travail résout cette trilemme en postulant que le temps n'est pas primitif mais *calculé*.

1.2. Inversion du paradigme

Nous inversons radicalement la hiérarchie épistémologique :

- I. Réel fondamental** : Réseau causal de qbits sous contrainte $\rho_{\text{calc}} = \text{cte}$
- II. Émergence 1** : Temps comme complexité causale accumulée (Sec. III)
- III. Émergence 2** : Espace-temps relativiste par universalité critique (Sec. IV)
- IV. Émergence 3** : Champs quantiques comme observables collectives (Sec. V-VI)

1.3. Arc théorique

L'originalité réside dans :

- La reconstruction *ab initio* du temps (contrairement à la QFT/Relativité)

- Le mécanisme d'universalité pour la symétrie de Lorentz (Théorème IV.2)
- La cosmogonie computationnelle (Big Bang = état compressible $\mathcal{C}_0 \sim \mathcal{O}(1)$)

1.4. Guide du document

Sec. II : Postulats fondateurs — Sec. III : Émergence du temps — Sec. IV : Reconstruction relativiste — Sec. V-VII : Validation par QFT émergente — Sec. VIII : Cosmologie computationnelle — Sec. IX : Prédictions testables.

2. Postulats fondateurs

2.1. Substrat computationnel universel

Définition 2.1 (Réseau causal quantique). *L'univers fondamental est modélisé par un réseau dynamique de qbits typés $\{q_i\}_{i \in I}$ muni d'une relation d'ordre causal \prec satisfaisant :*

1. **Asymétrie** : $e_i \prec e_j \Rightarrow \neg(e_j \prec e_i)$
2. **Transitivité** : $e_i \prec e_j \prec e_k \Rightarrow e_i \prec e_k$
3. **Locale acyclicité** : *Pas de boucles causales locales*

2.2. Densité computationnelle constante

Postulat fondamental : La densité de calcul est invariante :

$$\rho_{\text{calc}}(x) = \frac{dN_{\text{ops}}}{d^4x} = \rho_0 > 0 \quad \forall x \in \mathcal{M}$$

où \mathcal{M} est la variété émergente.

2.3. Énergie du vide computationnelle

L'énergie du vide est identifiée à la capacité de calcul via une généralisation du principe de Landauer :

$$E_{\text{vac}} = k_B T_{\text{eff}} \cdot \ln 2 \cdot N_{\text{ops}}(V)$$

avec T_{eff} une température effective du vide.

3. Le temps comme flux computationnel

3.1. Ordre causal primitif

Nous postulons que la réalité fondamentale est un ensemble partiellement ordonné d'événements $\{e_i\}$ avec une relation causale $e_i \prec e_j$. Le temps n'est pas une entité préexistante mais doit émerger de cette structure.

3.2. Métrique temporelle par complexité

La "durée" entre deux événements causalement reliés est définie comme la complexité computationnelle minimale requise pour passer de e_i à e_j :

$$\Delta\tau_{ij} = \kappa \cdot \min_{\gamma: e_i \rightarrow e_j} \int_{\gamma} \mathcal{C}(s) ds$$

où :

- γ est un chemin causal continu dans la limite continue
- $\mathcal{C}(s)$ est la densité de complexité locale
- κ est une constante de proportionnalité dimensionnelle

3.3. Flèche du temps entropique

Définition 3.1 (Entropie causale). *Définie par le désordre des relations causales :*

$$S_{causal} = -k_B \sum_{i,j} P(e_i \prec e_j) \log P(e_i \prec e_j)$$

La flèche du temps émerge de la croissance de cette entropie :

$$\frac{d\vec{T}}{d\tau} \propto \nabla S_{causal}$$

3.4. Dynamique markovienne du réseau causal

L'évolution du réseau est décrite par une équation maîtresse pour les relations causales :

$$\frac{\partial P(e_a \prec e_b)}{\partial \tau} = \sum_c \Gamma_{abc} [P(e_a \prec e_c)P(e_c \prec e_b) - P(e_a \prec e_b)]$$

où Γ_{abc} est le taux de transition pour établir une relation causale indirecte.

Théorème 3.1 (Croissance de l'entropie causale). *Sous l'évolution markovienne ci-dessus, avec $\Gamma_{abc} \geq 0$, on a :*

$$\frac{dS_{causal}}{d\tau} \geq 0$$

L'égalité n'a lieu qu'à l'équilibre causal maximal.

4. Reconstruction de l'espace-temps relativiste

4.1. Universalité critique et invariance de Lorentz

Le groupe de Lorentz émerge comme groupe de symétrie à basse énergie par mécanisme d'universalité. Considérons le réseau causal à grande échelle \mathcal{G}_Λ avec cut-off Λ .

Théorème 4.1 (Émergence de $SO(3,1)$). *Pour $\rho_{calc} > \rho_c$ (densité critique), le groupe d'automorphismes du réseau causal tend vers :*

$$\lim_{\Lambda \rightarrow \infty} \text{Aut}(\mathcal{G}_\Lambda) \simeq SO(3,1)$$

sous l'écoulement du groupe de renormalisation causal.

4.2. Métrique comme tenseur de corrélations

La métrique pseudo-riemannienne émerge des corrélations computationnelles :

$$g_{\mu\nu}(x) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\epsilon^2} \text{Cov}(\mathcal{O}_i, \mathcal{O}_j)$$

où \mathcal{O}_i sont des observables locales définies dans des ϵ -volumes centrés en x_i et x_j causalement connectés.

4.3. Gravité émergente

La courbure espace-temps répond à la distribution de complexité computationnelle via :

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G_N \langle T_{\mu\nu}^{\text{info}} \rangle$$

avec le tenseur énergie-impulsion informationnel :

$$T_{\mu\nu}^{\text{info}} = \frac{2}{\sqrt{-g}} \frac{\delta}{\delta g^{\mu\nu}} (\rho_{\text{calc}} \sqrt{-g})$$

5. Structure holographique et entropie par champ

L'entropie d'enchevêtrement usuelle (formule de von Neumann) appliquée à un champ ϕ sur une région A :

$$S_\phi(A) = -\text{Tr}[\rho_\phi^A \log \rho_\phi^A]$$

Cette expression devient le point de départ d'une reformulation profonde où chaque champ du modèle standard contribue avec sa propre densité d'information :

$$S(A) = \sum_{\phi} w_\phi S_\phi(A)$$

5.1. Densité d'entropie locale

$$S_\phi(A) = \int_A s_\phi(x) d^3x$$

avec :

$$s_\phi(x) = \mathcal{F}_\phi \left(\nabla \phi, m_\phi, \langle T_{\mu\nu}^\phi \rangle, \text{anomalies, symétries gauches}, \dots \right)$$

5.2. Lien avec la gravité

La densité totale d'information computationnelle devient :

$$\rho_{\text{calc}}(x) = \sum_{\phi} w_\phi \cdot s_\phi(x)$$

La gravité est interprétée comme une réponse dynamique à la distribution de cette densité.

6. Vers une inversion de la QFT

6.1. Idée directrice

- La structure de champ ϕ n'est pas première, mais dérivée.
- La QFT est une limite effective de dynamiques sur des graphes de qbits typés.

6.2. Formule d'émergence

$$\mathcal{T}_{\text{QFT}} = \lim_{\mathcal{N} \rightarrow \infty} \mathcal{R}[\mathcal{G}_{\text{qbits}}, \mathcal{C}, \rho]$$

avec :

- $\mathcal{G}_{\text{qbits}}$: graphe causal quantique
- \mathcal{C} : contrainte de complexité
- ρ : état fondamental du vide computationnel

7. Chapitre 2 — Exemple : Entropie d'un champ scalaire libre

7.1. Modèle physique

Champ scalaire libre $\phi(x)$ de masse m , avec action :

$$S = \frac{1}{2} \int d^4x [(\partial_\mu \phi)^2 - m^2 \phi^2]$$

7.2. Région d'étude

Région A : intervalle spatial ou boule de rayon R . Réduction de l'état du vide : $\rho^A = \text{Tr}_{\bar{A}} |\Omega\rangle\langle\Omega|$.

7.3. Méthode de calcul

Corrélateur :

$$C(x, y) = \langle \Omega | \phi(x) \phi(y) | \Omega \rangle$$

Diagonalisation :

$$S = \sum_k \left[\left(\lambda_k + \frac{1}{2} \right) \log \left(\lambda_k + \frac{1}{2} \right) - \left(\lambda_k - \frac{1}{2} \right) \log \left(\lambda_k - \frac{1}{2} \right) \right]$$

7.4. Résultat canonique (1+1D)

$$S(L) = \frac{1}{3} \log \left(\frac{L}{\epsilon} \right) + c'$$

avec ϵ une coupure UV, $c = 1$.

7.5. Interprétation et généralisations

- Masse et interactions
- Fermions (ex : Dirac 1+1D)
- Courbure de l'espace-temps
- Graphe de qbits (voir chap. 3)

8. Chapitre 3 — Simulation sur graphe de qbits

8.1. Motivation

Le substrat est un **graphe quantique dynamique**, chaque nœud = *qbit typé* (s_i, ϕ_i) .

8.2. Structure

- Nœuds : qbits $q_i = (s_i, \phi_i)$, $s_i \in \mathbb{C}^2$
- Arêtes : interactions locales
- Topologie : évolutive, selon la complexité locale

8.3. Dynamique computationnelle

$$q_i(t+1) = U_i[q_{\text{voisins}}(t), \phi_i] \quad \text{avec contrainte} \quad \rho_{\text{calc}}(x) \leq \rho_0$$

8.4. Entropie émergente

$$S_\phi(A) = -\text{Tr}[\rho_\phi^A \log \rho_\phi^A]$$

Réduction partielle sur le sous-graphe des qbits typés ϕ .

8.5. Vers la QFT effective

- $\phi(x)$: observable moyenne sur patchs de qbits
- Équations de mouvement : stabilité dynamique
- Géométrie : issue de la causalité du graphe

8.6. Exemple simplifié

- Graphe 1D cyclique, scalaire libre
- Gates locales : CNOT, SWAP
- Calcul de $S(A)$ sur sous-ensembles

9. Chapitre 4 — Généralisation fermionique et horizons holographiques

9.1. Modélisation des fermions sur le graphe

Chaque qbit typé fermionique est muni d'un opérateur de création/annihilation satisfaisant l'algèbre de Clifford locale :

$$\{a_i, a_j^\dagger\} = \delta_{ij}, \quad \{a_i, a_j\} = 0$$

Les états des nœuds sont représentés par des spineurs de dimension minimale \mathbb{C}^2 ou \mathbb{C}^4 , selon le type (Weyl, Dirac, Majorana).

9.2. Entropie d'enchevêtrement fermionique

L'entropie d'enchevêtrement fermionique se calcule à partir des corrélateurs antisymétriques :

$$C_{ij} = \langle a_i^\dagger a_j \rangle, \quad S = -\text{Tr} [C \log C + (1 - C) \log(1 - C)]$$

Cette formule permet d'identifier les contributions entropiques spécifiques des champs de type fermion.

9.3. Horizon holographique comme frontière computationnelle

Un horizon (cosmologique, de Rindler, ou de trou noir) est modélisé comme une coupure dans le graphe, définissant une région inobservable \bar{A} . L'information inaccessible définit alors une entropie :

$$S(A) = -\text{Tr} [\rho_A \log \rho_A]$$

9.4. Lois holographiques et densité de calcul

L'entropie maximale accessible dans un volume V est bornée par la surface :

$$S \leq \frac{A}{4G_N \hbar}$$

Dans notre cadre, cela découle naturellement du nombre d'opérations permises par unité de surface et de temps, et contraint ρ_{calc} près de l'horizon.

9.5. Conséquences physiques

- Les horizons définissent les conditions limites computationnelles de l'univers.
- Les constantes fondamentales (G, \hbar, c) peuvent être interprétées comme invariants d'une géométrie de l'information.
- Une métrique effective induite peut émerger des limites d'accessibilité calculatoire.

10. Cosmologie computationnelle

10.1. Big Bang computationnel

L'état initial de l'univers est caractérisé par une complexité computationnelle minimale :

$$\mathcal{C}_{\text{initial}} \sim \mathcal{O}(1) \ll \mathcal{C}_{\text{actuel}}$$

Cette configuration hautement compressible évolue via une phase d'expansion exponentielle (inflation) :

$$N(\tau) = N_0 e^{\beta\tau}$$

où N est le nombre de qbits dans le réseau causal et τ le temps cosmologique.

10.2. Temps cosmologique global

Le temps cosmologique est défini comme la complexité computationnelle accumulée :

$$\tau_{\text{cosmo}} = \frac{1}{\rho_0} \int_{\mathcal{V}} \mathcal{C}(x) \sqrt{-g} d^4x$$

où \mathcal{V} est le volume causal passé.

10.3. Énergie noire computationnelle

L'accélération cosmique est interprétée comme un coût computationnel résiduel :

$$\Lambda = \alpha \frac{\rho_{\text{calc}} \mathcal{C}^4}{E_{\text{Planck}}^2}$$

avec α un facteur d'efficacité algorithmique.

11. Prédictions testables

11.1. Violations de Lorentz

À hautes énergies ($E \gg \rho_0^{1/4}$), des violations de l'invariance de Lorentz sont prédites :

$$\Delta v(E) = v_g(E) - c \sim c e^{-E/E_{\text{comp}}}, \quad E_{\text{comp}} = \rho_0^{1/4}$$

11.2. Anomalies dans le CMB

Le spectre de puissance angulaire présente des déviations par rapport au modèle Λ CDM :

$$C_\ell = C_\ell^{\Lambda\text{CDM}} + \delta_\ell, \quad \delta_\ell = A \ell^{-3/2} e^{-\gamma\ell}$$

avec A, γ paramètres dérivés de ρ_0 .

11.3. Variation des constantes fondamentales

La densité computationnelle décroît avec l'expansion, induisant des variations lentes :

$$\frac{d \ln \alpha}{dt} = \eta \rho_{\text{calc}}^{1/2} \sim 10^{-19} \text{ an}^{-1}$$

où α est la constante de structure fine.

Annexes

.1. Annexe A — Bibliographie commentée

- **Ryu, S., Takayanagi, T.** *Holographic Derivation of Entanglement Entropy from AdS/CFT*. Phys. Rev. Lett. 96, 181602 (2006).
Introduit la formule Ryu–Takayanagi reliant l'entropie d'enchevêtrement à l'aire minimale dans l'espace AdS. Point de départ de nombreuses réflexions sur les lois holographiques de l'entropie.
- **Susskind, L., Uglum, L.** *Black Hole Entropy in Canonical Quantum Gravity and Superstring Theory*. Phys. Rev. D50 (1994).
Propose une interprétation microcanonique de l'entropie de trou noir à partir de la densité d'états du vide. Précurseur de l'idée d'holographie.
- **Jacobson, T.** *Thermodynamics of Spacetime: The Einstein Equation of State*. Phys. Rev. Lett. 75, 1260 (1995).
Démontre que les équations d'Einstein peuvent être vues comme une équation d'état thermodynamique, reliant entropie, chaleur, et horizon local.
- **Lloyd, S.** *Ultimate Physical Limits to Computation*. Nature 406, 1047 (2000).
Définit les limites fondamentales de la puissance de calcul en fonction de l'énergie et du volume. Base du lien entre physique et information.
- **Bombelli, R., Koul, R. K., Lee, J., Sorkin, R. D.** *Quantum source of entropy for black holes*. Phys. Rev. D34, 373 (1986).
Un des premiers calculs d'entropie d'enchevêtrement dans une QFT sur espace-temps courbe. Souligne le rôle de la trace partielle et des degrés de liberté inaccessibles.
- **Bianchi, E., Myers, R. C.** *On the Architecture of Spacetime Geometry*. Class. Quant. Grav. 31, 214002 (2014).
Explore l'idée que la géométrie de l'espace-temps découle de principes informationnels (entropie, enchevêtrement, surface).

.2. Annexe B — Schéma d'un horizon computationnel holographique

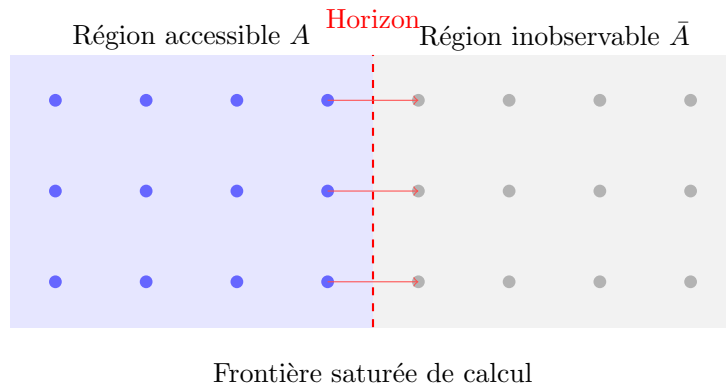


Figure 1: Modélisation d'un horizon comme frontière computationnelle dans un graphe de qbits. L'interaction entre A et \bar{A} est bornée par la densité de calcul maximale autorisée par les lois holographiques.