

La Matière comme Génératrice d'Espace-Temps : Une Lecture des Causal Fermion Systems

Abstract

Nous proposons une interprétation des travaux récents sur les *causal fermion systems* (CFS) selon laquelle la structure de l'espace-temps émerge des interactions de la matière avec elle-même. En combinant deux résultats majeurs — la discrétisation et la vitesse de propagation finie (Finster, 2018) et l'émergence de dynamiques de Fock via l'*holographic mixing* (Dappiaggi, Finster, Kamran, Reintjes, 2025) — nous argumentons que l'espace et les champs ne préexistent pas mais apparaissent comme phénomènes dérivés de la dynamique fermionique. Nous discutons ensuite des limites de cette émergence, en particulier lors du big bang et à l'intérieur des trous noirs, où les notions usuelles de dimension et de temps perdent leur caractère absolu.

1 Introduction

Le paradigme des CFS repose sur le principe d'action causale, un principe variationnel défini sur une mesure d'opérateurs de corrélation fermioniques. Ce cadre ne présuppose pas d'espace-temps continu, mais en fait émerger les structures causales et métriques comme conséquences des minimisations de l'action. Notre objectif est de montrer comment les résultats récents renforcent l'idée que **la matière génère l'espace-temps par auto-interaction**.

2 Résultats de discrétisation et propagation finie (2018)

2.1 Discrétisation de l'espace-temps

Finster (2018) démontre que tout minimiseur de l'action causale conduit à une structure discrète de l'espace-temps, constituée de points spectraux définis par les opérateurs de corrélation. Ainsi, l'espace-temps n'est pas un continuum donné, mais le support de la mesure fermionique.

2.2 Vitesse de propagation finie

Sur des échelles macroscopiques, la dynamique des champs linéarisés obéit à une vitesse de propagation finie, analogue à la vitesse de la lumière. La causalité physique apparaît donc comme une propriété émergente de la structure fermionique sous-jacente.

3 Holographic Mixing et dynamiques de Fock (2025)

3.1 Équations linéarisées et potentiels non locaux

Les CFS en espace de Minkowski conduisent à une équation de Dirac avec potentiels non locaux, issus d'une multitude de contributions vectorielles stochastiques.

3.2 Mécanisme de *holographic mixing*

L'introduction de phases holographiques et d'effets de déphasage entre les composantes fermioniques permet de générer des opérateurs de champs bosoniques. Leurs commutations réalisent naturellement les relations de commutation canoniques (CCR).

3.3 Émergence de la QED

Dans une limite appropriée, la dynamique se reformule comme une évolution unitaire dans des espaces de Fock fermionique et bosonique, reproduisant la QED standard avec coupure ultraviolette. Ainsi, les champs bosoniques (comme le photon) apparaissent comme des *excitations effectives de la matière fermionique*.

4 Synthèse : la matière comme créatrice d'espace-temps

En rapprochant les deux résultats :

- La **discrétisation et la causalité** (2018) montrent que la structure de l'espace-temps est un effet émergent du principe d'action causale appliqué aux fermions.
- L'**holographic mixing** (2025) montre que les champs et la dynamique de QFT émergent également de cette même structure fermionique.

Un principe unificateur. Dans ce cadre, la distinction entre matière et espace-temps perd sa signification fondamentale. L’espace-temps émerge de la distribution d’énergie sous forme fermionique, tandis que la matière est elle-même décrite par ces corrélations. Ainsi, géométrie et matière sont deux manifestations d’un même principe, formalisable par les CFS et leurs corrélations. Compte tenu de la richesse paramétrique des CFS (dimension de Hilbert, spin-dimension, choix de mesure, contraintes variationnelles), nous disposons d’une liberté suffisante pour modéliser la phénoménologie complexe du continuum énergétique-spacio-temporel.

5 Au-delà du continuum lorentzien

5.1 Signature et dimension variables

Le continuum spatio-temporel de signature $(1, 3)$ n’apparaît que comme une approximation valable dans des régimes asymptotiques et locaux. Dans des conditions extrêmes (big bang, trous noirs), la dimension effective de l’espace-temps peut varier, ou même devenir indéfinissable à des échelles pré-planckiennes. Cette flexibilité est cohérente avec des scénarios de “dimension running” observés dans d’autres approches de gravité quantique.

5.2 La relativité du temps

Le continuum énergétique-spacio-temporel engendre une notion de temps uniquement locale. Lorsqu’un système franchit l’horizon d’un trou noir, il sort de l’univers observable d’un observateur extérieur, et la notion de temps cesse d’être univoque. Cette indétermination est en accord avec l’équation de Wheeler–DeWitt, qui ne fait pas intervenir de paramètre temporel unique : la dynamique globale est plus riche qu’une simple évolution selon une variable réelle, et se traduit par des corrélations internes du système. De plus, des effets comme l’effet Unruh rappellent que la présence d’énergie est elle-même relative au choix de jauge et d’observateur.

6 Perspectives

Ce cadre ouvre la voie à une relecture computationnelle : la vitesse finie de propagation et la structure d’espace de Fock peuvent être comprises comme des contraintes de complexité et de ressources de calcul, liées à la dynamique interne des CFS. Une telle approche permettrait d’établir un pont entre théorie de la complexité, gravitation et champs quantiques.

7 Analogie entre réseaux d'interaction et CFS

Un parallèle frappant peut être établi entre les résultats récents sur la propagation finie dans des réseaux d'interactions locales (par exemple réseaux de neurones entraînés avec la perte IS sous NTK) et ceux obtenus pour les causal fermion systems (CFS). Dans les deux cas, la structure fondamentale impose une vitesse limite de propagation de l'influence, des corrélations ou de l'information.

Réseaux (NTK + IS-loss)	Causal Fermion Systems (Finster, 2018)
Nœuds V reliés par des arêtes E , distance métrique $d(x, y)$	Points d'espace-temps définis comme support de la mesure ρ sur $F \subset L(H)$
Mises à jour locales (range- R), Lipschitz-bornées	Interaction locale par le principe d'action causale, variation bornée par contraintes
Théorème de propagation: $ \langle O_x(t), O_y(0) \rangle \leq C \exp\left(-\frac{d(x,y)-vt}{\xi}\right)$ avec $v = R$ (cône discret de lumière)	Résultat de propagation finie: les perturbations de l'état se propagent avec vitesse bornée (analogue à c), définissant un cône causal émergent
Pas d'influence instantanée: existence d'une limite v déterminée par l'architecture du graphe	Pas d'action à distance instantanée: existence d'une limite c déterminée par la structure fermionique discrète
Effet de la perte IS: améliore la condition spectrale et la robustesse à l'intérieur du cône, mais n'augmente pas v	Effets de phases holographiques: modifient la dynamique effective, mais ne suppriment pas la vitesse limite

Principe commun. Dans les deux cadres, la vitesse de propagation n'est pas une constante imposée *a priori*, mais la conséquence structurelle de l'architecture d'interactions locales. Autrement dit, la limite de propagation (vitesse de la lumière en physique, vitesse v dans un graphe d'apprentissage) est une *émergence universelle* de la localité et des corrélations.

References

- [1] F. Finster. *Causal Fermion Systems: Discrete Space-Times, Causation and Finite Propagation Speed*. arXiv:1812.00238, 2018.
- [2] C. Dappiaggi, F. Finster, N. Kamran, M. Reintjes. *Holographic Mixing and Fock Space Dynamics of Causal Fermion Systems*. arXiv:2410.18045, 2025.
- [3] W. G. Unruh. *Notes on black-hole evaporation*. Phys. Rev. D, 14:870–892, 1976.
- [4] B. S. DeWitt. *Quantum Theory of Gravity. I. The Canonical Theory*. Phys. Rev., 160:1113–1148, 1967.
- [5] S. Carlip. *Dimension and Dimensional Reduction in Quantum Gravity*. Class. Quantum Grav. 34, 193001, 2017.