

Bottom-Up Quantum Gravity

L'émergence de l'espace, du temps et de la gravité à partir de l'intrication quantique

Farid Hamdad

2026

Version condensée pour GitHub

Préambule

L'intrication n'est pas seulement une corrélation étrange entre systèmes quantiques éloignés. Elle est une structure.

Si l'on accepte cette idée, alors une question naturelle apparaît : et si ce que nous appelons espace n'était rien d'autre que la manière dont ces corrélations s'organisent collectivement ?

Et si la gravité n'était pas une interaction fondamentale, mais la réponse macroscopique de cette organisation lorsqu'elle se réarrange ?

Ce travail explore cette possibilité de manière volontairement minimale, concrète et numérique.

Résumé intuitif

Nous présentons un cadre dit **bottom-up** dans lequel ni l'espace, ni le temps, ni la gravité ne sont postulés.

Le seul ingrédient fondamental est un état quantique global pur, défini sur un nombre fini de degrés de liberté.

À partir de cet état unique, nous montrons comment :

- une notion de temps peut émerger à partir des corrélations internes (via le flot modulaire),
- une géométrie spatiale peut être reconstruite à partir de l'information mutuelle,
- la dimension de l'espace n'est pas fixée a priori mais imposée par la structure de l'intrication,
- une signature géométrique compatible avec l'idée $ER = EPR$ apparaît naturellement,
- une relation de type thermodynamique relie entropie d'intrication et énergie, suggérant une gravité émergente.

Les résultats sont établis numériquement sur un système minimal de 9 qubits, puis confirmés sur 16 qubits, ce qui réduit fortement le risque d'artefacts liés à la petite taille.

1. Point de départ : un postulat volontairement radical

Le point de départ de ce travail est volontairement simple, presque austère.

Nous supposons uniquement l'existence d'un état quantique global pur

$$|\Psi\rangle \in \mathcal{H} = \bigotimes_i \mathcal{H}_i$$

défini sur un ensemble fini de degrés de liberté élémentaires (des qubits).

Et c'est tout.

Il n'y a :

- aucun espace préexistant,
- aucun temps externe,
- aucune métrique,
- aucune causalité imposée,
- aucun champ classique fondamental.

L'état $|\Psi\rangle$ n'évolue pas dans le temps : il est atemporel.

Toute notion de dynamique, si elle existe, doit émerger de l'intérieur, à partir des relations entre sous-systèmes.

Ce choix n'est pas un artifice mathématique. Il est motivé par une idée simple : si l'espace-temps est réellement émergent, alors il ne doit pas être présent dans les hypothèses de départ.

2. Comment le temps peut émerger sans horloge externe

Sans temps externe, parler de dynamique peut sembler impossible. Pourtant, la mécanique quantique offre une porte d'entrée : les corrélations.

En partitionnant l'espace de Hilbert en un sous-système « horloge » et un reste du système, il devient possible de définir une dynamique relationnelle.

Ce point de vue, inspiré de Page et Wootters, repose sur l'idée que le temps n'est pas un paramètre universel, mais une lecture interne des corrélations entre parties du système.

Techniquement, cette idée se formalise à travers le **flot modulaire**. À toute région A , on associe une matrice de densité réduite ρ_A , puis un opérateur

$$K_A = -\log \rho_A.$$

Le flot généré par K_A définit une évolution interne des observables de A .

Dans ce cadre, le temps n'est pas quelque chose qui s'écoule en arrière-plan : il est une structure émergente, entièrement déterminée par l'état quantique lui-même.

3. Reconstruire l'espace à partir de l'information

Si le temps peut émerger des corrélations, qu'en est-il de l'espace ?

Ici, l'idée est simple et opérationnelle : deux degrés de liberté fortement corrélés doivent être considérés comme proches, deux degrés faiblement corrélés comme éloignés.

La quantité naturelle pour mesurer cela est l'**information mutuelle**. Elle capture l'ensemble des corrélations — classiques et quantiques — entre deux sous-systèmes.

À partir de cette information mutuelle, nous définissons une distance effective : une distance informationnelle, qui décroît lorsque la corrélation augmente.

Une fois cette matrice de distances construite, nous utilisons des techniques d'embarquement (MDS) pour reconstruire une géométrie effective.

Le résultat est frappant : sans jamais postuler d'espace, une structure spatiale apparaît.

Dans cette approche, l'espace n'est rien d'autre que la **carte géométrique de l'intrication**.

4. La dimension n'est pas fondamentale

Un résultat central de ce travail est que la dimension de l'espace n'est pas une donnée fixe.

En contrôlant la structure de l'intrication à l'aide d'un paramètre λ , nous interpolons entre :

- des états dominés par des corrélations locales,
- des états présentant une intrication fortement non locale.

Lorsque l'intrication est locale, la géométrie reconstruite s'embarque naturellement en deux dimensions.

Lorsque l'intrication non locale devient dominante, une troisième dimension devient nécessaire pour représenter correctement les distances.

Autrement dit, **la dimension spatiale est imposée par l'intrication**. Elle n'est ni postulée, ni choisie, ni fixée a priori.

5. ER = EPR comme raccourci géométrique

L'idée ER = EPR suggère que l'intrication quantique et la connectivité géométrique sont deux facettes d'une même réalité.

Dans notre cadre, cette idée peut être testée de manière très concrète. Nous considérons des paires de qubits très éloignées sur le réseau d'interactions, mais fortement intriquées.

Lorsque l'on reconstruit la géométrie émergente, ces paires deviennent géométriquement proches.

Il ne s'agit pas d'un trou de ver au sens relativiste. Il s'agit d'un raccourci géométrique effectif, une compression des géodésiques induite par l'intrication.

C'est une signature claire, mesurable, et reproductible de type ER = EPR, dans un système fini.

6. La gravité comme thermodynamique de l'intrication

Enfin, nous explorons l'idée que la gravité n'est pas une interaction fondamentale, mais une loi d'état.

Inspirés par l'argument de Jacobson, nous testons numériquement une relation entre variations d'entropie d'intrication et variations d'énergie.

Le résultat est une relation stable de type

$$\delta S \simeq \beta \delta E.$$

Cette relation suggère que la gravité peut être interprétée comme une réponse thermodynamique collective de l'intrication lorsqu'elle est perturbée.

7. Passer de 9 à 16 qubits : tester la robustesse

Les premiers résultats sont obtenus sur 9 qubits, ce qui permet un contrôle exact mais impose de forts effets de bord.

Nous avons donc répété l'ensemble du protocole sur 16 qubits, organisés sur une grille 4×4 .

Cette extension confirme tous les mécanismes observés :

- la transition dimensionnelle devient plus nette,
- les raccourcis géométriques de type ER = EPR deviennent plus stables,
- la relation thermodynamique présente moins de fluctuations.

Cela indique que les résultats ne sont pas de simples artefacts de petite taille.

8. Conclusion ouverte

Ce travail ne prétend pas fournir une théorie complète de la gravité quantique. Il propose autre chose : une preuve de principe constructive.

Il montre que, dans un cadre minimal, sans espace ni temps postulés, des notions de temps, de géométrie, de dimension et de gravité peuvent émerger naturellement à partir de l'intrication quantique.

Dans cette perspective, la physique fondamentale ne serait plus l'étude de champs évoluant dans l'espace-temps, mais l'étude de la manière dont l'espace-temps lui-même émerge comme description collective d'un réseau d'intrication.

Code et données disponibles sur :

<https://github.com/Farid-Hamdad/Bottom-Up-Quantum-Gravity>