

Structure d'espace-temps dans le programme du grain

Conjectures cosmologiques

Hugues Genzrin

13 juin 2026

Préambule

Cette note propose une *extension cosmologique* du programme du grain. Elle s'appuie sur deux faits physiques :

1. L'espace cosmologique observable est *en expansion*.
2. La relativité générale stipule que la matière *rétragit sur l'espace-temps et le déforme*, ce qui rappelle l'action d'une fonction sur l'axe des ordonnées en représentation cartésienne.

À partir des structures déjà établies du programme (flot universel, flot miroir, cercles porteurs, niveaux strataux), nous construisons un modèle géométrique d'espace-temps qui passe de la dimension 2 (plan de travail) à la dimension 4 (espace-temps relativiste) par deux opérations successives :

- Une *rotation intrinsèque* autour de la droite à l'infini Δ_∞ , qui élève les structures 2D en structures 3D.
- Une *intégration temporelle* d'une boule 3D en expansion, qui élève les structures 3D en structures 4D.

Statut épistémologique. Cette note est explicitement *conjecturale*. Les constructions présentées sont cohérentes avec le programme du grain mais ne prétendent pas constituer une dérivation rigoureuse de la relativité générale. Plusieurs points demandent à être approfondis avant que le modèle puisse être considéré comme établi.

Référence implicite. Programme du grain (Volumes I-III), et les notes sur la métrique stratale, la constante de Planck, l'exponentielle complexe, et la stratification fonctionnelle.

1 Position du problème

1.1 L'analogie avec la stratification fonctionnelle

La relativité générale stipule que la matière courbe l'espace-temps. Mathématiquement, cette courbure est encodée par un tenseur métrique $g_{\mu\nu}$ qui dépend de la distribution de matière (équations d'Einstein).

Remarque 1 (Parallèle avec la stratification fonctionnelle). *Le théorème de stratification fonctionnelle (cf. Anomalie cartésienne) établit que toute fonction f dérivable stratifie localement l'axe codomaine par le facteur $|f'(x)|$.*

Par analogie, on peut envisager que la matière agisse comme un facteur de stratification local sur l'espace-temps : sa présence modifie localement la métrique, ce qui correspond à une stratification non uniforme de la structure géométrique.

Cette analogie est suggestive, pas constructive. Elle motive la recherche d'un cadre cosmologique stratal mais ne le construit pas.

1.2 Les ingrédients à mobiliser

Pour construire un modèle cosmologique stratal, on dispose des ingrédients suivants du programme :

- Le *flot universel* Γ et son miroir $\bar{\Gamma}$.
- Les *cercles porteurs* C_k et leurs miroirs $\bar{C}_k$.
- La *droite à l'infini* Δ_∞ (Volume II).
- Les *niveaux strataux* $\mathcal{G}_{-kn_\infty}$.
- L'identification *temps = cycle intra-grain* (constante de Planck).

2 Génération de l'espace par rotation intrinsèque

2.1 Le groupe de rotation autour de Δ_∞

Définition 1 (Rotation intrinsèque). *On considère le groupe de rotation intrinsèque de l'espace ambiant autour de la droite à l'infini Δ_∞ , considérée comme axe. Concrètement, Δ_∞ est plongée comme axe de rotation dans $\mathbb{R}^3$, et le groupe agit en faisant tourner le plan de travail autour de cet axe.*

Remarque 2 (Interprétation physique). *Cette rotation n'est pas une rotation appliquée à un référentiel extérieur, mais une rotation intrinsèque de l'espace lui-même autour de son axe à l'infini. Elle ajoute une dimension géométrique au plan de travail du programme du grain, élevant les structures 2D en structures 3D.*

2.2 Tores à collier nul

Proposition 1 (Génération des tores). *Sous l'action du groupe de rotation autour de Δ_∞ , chaque cercle porteur C_k engendre un tore Γ_k^2 . Comme les cercles C_k sont tangents à Δ en O et que Δ_∞ passe par O , le tore Γ_k^2 est à collier nul (tore dégénéré, ou tore pincé).*

Remarque 3 (Géométrie du tore à collier nul). *Un tore à collier nul est obtenu en faisant tourner un cercle autour d'un axe tangent au cercle. Le résultat est topologiquement une sphère pincée en un point (le point de tangence), géométriquement une surface fermée sans trou interne.*

Les tores Γ_k^2 ainsi obtenus forment une famille emboîtée : $\Gamma_1^2 \subset \Gamma_2^2 \subset \dots$, où chaque tore contient les précédents et est de rayon de plus en plus grand.

2.3 Sphères encapsulantes

Proposition 2 (Sphères concentriques). *Pour chaque cercle porteur C_k et son miroir $\bar{C}_k$, il existe un cercle $\hat{C}_k$ centré en O qui les encapsule, c'est-à-dire qui les contient tous deux dans son disque intérieur.*

Sous l'action du groupe de rotation, chaque cercle encapsulant $\hat{C}_k$ engendre une sphère S_k^2 centrée en O . Ces sphères forment une famille concentrique : $S_1^2 \subset S_2^2 \subset \dots$

Remarque 4 (Suite non dense). *À résolution $-n_\infty$, la suite des sphères S_k^2 n'est pas dense dans l'espace : il y a des « vides » entre les sphères. Cela limite l'utilité immédiate du modèle. Le passage à des niveaux de résolution plus fins est donc nécessaire.*

2.4 Densité à résolution fine

Proposition 3 (Densité aux niveaux $-kn_\infty$). *En appliquant le mécanisme aux niveaux de résolution $-kn_\infty$ avec $k \geq 1$, la suite des tores Γ^2 et des sphères S^2 devient dense. Dans cette limite stratifiée, les tores et sphères remplissent l'espace ambiant et forment :*

- Un tore plein Γ^2 (réunion dense des tores emboîtés).

- Une boule fermée $\bar{B}^3$ encapsulant ce tore plein (réunion dense des disques intérieurs aux sphères).

L'espace 3D ambiant est ainsi reconstitué stratalement comme une boule $\bar{B}^3$ contenant un tore plein Γ^2 .

Remarque 5 (Conséquence structurelle). *Le passage du plan stratal 2D à l'espace stratal 3D s'effectue donc en deux étapes :*

- La rotation intrinsèque autour de Δ_∞ engendre une dimension supplémentaire.
- La densification par stratification fine ($k \geq 1$) élimine les vides géométriques.

L'espace 3D obtenu hérite naturellement de la structure stratale du programme : il contient une hiérarchie de niveaux $\mathcal{G}_{-kn_\infty}$ indexant ses propres mosaïques internes.

Remarque 6 (Les factorisations du continu permettent de sortir du zéro). *Les factorisations du continu permettent de sortir du zéro. Cette propriété, établie dans le programme du grain (cf. Remarques topo-ensemblistes : stratification fonctionnelle et stratification multiplicative), assure que la densification aux niveaux $-kn_\infty$ n'est pas une opération arbitraire mais une instance d'un mécanisme structurel : les grains de mesure nulle au niveau supérieur deviennent des longueurs non nulles au niveau inférieur.*

Appliqué au contexte cosmologique, ce mécanisme garantit que la boule $\bar{B}^3$ obtenue par densification est un objet géométrique de substance non triviale, et non une simple réunion de sphères de mesure nulle. C'est la factorisation stratale qui confère au continu cosmologique sa consistance géométrique.

3 Motivation cinétique de la rotation intrinsèque

3.1 Position du problème

La Section 2 a postulé la rotation intrinsèque autour de Δ_∞ comme *hypothèse géométrique*. Cette section propose une *motivation cinétique* de cette hypothèse : la conservation du moment cinétique des grains qui se propagent sur les cercles porteurs suggère une dynamique de rotation qui devient cohérente avec l'hypothèse géométrique.

Statut. Cette section fournit une *motivation*, non une *dérivation*. Le saut entre conservation cinétique locale (rotation 2D des grains autour de O) et rotation globale du plan (rotation 3D autour de Δ_∞) demande un argument supplémentaire qui sera explicité.

3.2 Cadre cinétique

Soit M un grain qui se propage sur le cercle porteur C_1 sous l'action du flot universel Γ . On note :

- $\vec{OM}$: vecteur position du grain par rapport à O , de norme $\|\vec{OM}\| = 1$ (rayon du cercle porteur).
- $\vec{q}$: vecteur quantité de mouvement du grain, tangent au cercle C_1 en M (donc orthogonal à $\vec{OM}$).
- $\vec{L}_M := \vec{q} \wedge \vec{OM}$: moment cinétique du grain par rapport à O .

Remarque 7 (Hypothèse de mouvement circulaire uniforme). *On suppose que le mouvement du grain sur C_1 est uniforme, c'est-à-dire que $\|\vec{q}\|$ est constant. Cette hypothèse est cohérente avec la construction du flot universel Γ : la propagation sur les cercles porteurs s'effectue à vitesse stratifiée constante.*

Sous cette hypothèse, l'accélération du grain est purement centripète :

$$\frac{d\vec{q}}{dt} = -m\omega^2 \vec{OM},$$

où $\omega = \|\vec{q}\|/m$ est la vitesse angulaire.

3.3 Conservation du moment cinétique

Théorème 1 (Conservation cinétique). *Sous l'hypothèse de mouvement circulaire uniforme, le moment cinétique $\vec{L}_M$ de chaque grain M est constant dans le temps :*

$$\frac{d\vec{L}_M}{dt} = \vec{0}.$$

Démonstration. On dérive $\vec{L}_M = \vec{q} \wedge O\vec{M}$ par rapport au temps :

$$\frac{d\vec{L}_M}{dt} = \frac{d\vec{q}}{dt} \wedge O\vec{M} + \vec{q} \wedge \frac{dO\vec{M}}{dt}.$$

Premier terme. Avec $d\vec{q}/dt = -m\omega^2 O\vec{M}$:

$$\frac{d\vec{q}}{dt} \wedge O\vec{M} = -m\omega^2 O\vec{M} \wedge O\vec{M} = \vec{0}.$$

(Le produit vectoriel d'un vecteur par lui-même est nul.)

Second terme. Avec $dO\vec{M}/dt = \vec{v} = \vec{q}/m$:

$$\vec{q} \wedge \frac{dO\vec{M}}{dt} = \vec{q} \wedge \frac{\vec{q}}{m} = \frac{1}{m} \vec{q} \wedge \vec{q} = \vec{0}.$$

Donc $\frac{d\vec{L}_M}{dt} = \vec{0}$, ce qui établit la conservation. □

3.4 Interprétation immédiate : rotation 2D dans le plan

Remarque 8 (Conséquence cinétique directe). *Par construction du produit vectoriel, $\vec{L}_M$ est perpendiculaire au plan de travail (puisque $\vec{q}$ et $O\vec{M}$ sont tous deux dans ce plan).*

La conservation de $\vec{L}_M$ exprime donc la symétrie de rotation des grains autour de O dans le plan de travail. C'est une rotation 2D, dont l'axe (perpendiculaire au plan) est externe au plan lui-même.

3.5 Le saut conceptuel vers la rotation 3D

Remarque 9 (Difficulté du passage 2D $\rightarrow$ 3D). *La conservation de $\vec{L}_M$ établit une rotation 2D des grains autour de O dans le plan. Cependant, la Section 2 postule une rotation 3D du plan autour de Δ_∞ , qui est une droite dans le plan de travail.*

Ces deux rotations ont des axes géométriquement distincts :

- Axe des $\vec{L}_M$: perpendiculaire au plan (sortie hors du plan).
- Axe Δ_∞ : dans le plan (tangente commune en O).

Le passage de l'une à l'autre n'est pas une déduction directe : il demande un argument structural supplémentaire.

3.6 Argument de lift par tangence commune

Proposition 4 (Sélection de Δ_∞ comme axe de rotation). *Δ_∞ est l'axe privilégié de rotation 3D pour le passage du plan à l'espace stratal, parce qu'elle est l'unique droite tangente en O à tous les cercles porteurs C_k .*

Cette propriété de tangence commune confère à Δ_∞ un statut structural singulier : elle est l'axe que préservent toutes les dynamiques locales (chaque cercle porteur la touche en O sans la traverser), et c'est l'axe naturel autour duquel le plan peut tourner sans déformer ses structures internes.

Remarque 10 (Statut conjectural du lift). *La proposition 4 fournit une motivation structurale du choix de Δ_∞ comme axe de rotation 3D, mais elle ne dérive pas cette rotation de la conservation des $\vec{L}_M$. Le lift est :*

- Cohérent avec la conservation cinétique (compatibilité avec la dynamique stratale).
- Motivé par la singularité géométrique de Δ_∞ (tangente commune).
- Non dérivé au sens strict (il reste un saut entre conservation 2D et rotation 3D).

Le statut épistémologique est donc celui d'une conjecture motivée, non d'un théorème.

3.7 Émergence du flot miroir

Proposition 5 (Flot miroir par rotation de π). *Le groupe de rotation continu autour de Δ_∞ contient le sous-groupe discret $\mathbb{Z}_2 = \{\text{id}, R_\pi\}$ engendré par la rotation d'angle π (demi-tour).*

L'action de R_π sur le flot universel Γ produit son flot miroir $\bar{\Gamma}$. Plus précisément :

$$R_\pi(\Gamma) = \bar{\Gamma}.$$

Remarque 11 (Lecture conjecturale matière/antimatière). *Cette proposition donne un support géométrique précis à la conjecture matière/antimatière du document Constante de Planck et fondations stratales :*

- *Le flot Γ correspond à la propagation de la matière.*
- *Le flot miroir $\bar{\Gamma} = R_\pi(\Gamma)$ correspond à la propagation de l'antimatière.*
- *Le demi-tour R_π est l'opération géométrique qui relie les deux : matière et antimatière sont deux orientations opposées d'un même flot stratal sous la rotation intrinsèque.*

Le groupe continu de rotation génère ainsi à la fois les tores Γ^2 à collier nul (orbites continues) et la dualité matière/antimatière (sous-groupe discret $\mathbb{Z}_2$).

3.8 Synthèse : statut de la motivation cinétique

Remarque 12 (Ce que la motivation cinétique apporte et ne dit pas). *La motivation cinétique transforme l'hypothèse de rotation intrinsèque de la Section 2 en une hypothèse moins arbitraire :*

- *Ce qu'elle établit rigoureusement : la conservation $d\vec{L}_M/dt = \vec{0}$ pour chaque grain en mouvement circulaire uniforme (Théorème 1).*
- *Ce qu'elle suggère structurellement : la rotation 3D autour de Δ_∞ comme lift naturel de la conservation cinétique 2D, motivé par la tangence commune (Proposition 4).*
- *Ce qu'elle ne déduit pas : la rotation 3D du plan n'est pas une conséquence logique de la conservation 2D. Le saut conceptuel demeure.*

L'hypothèse de rotation intrinsèque est donc compatible avec la dynamique stratale (par conservation cinétique) et singularisée par la géométrie (Δ_∞ comme tangente commune), mais reste formellement une hypothèse.

4 L'expansion cosmologique stratale

4.1 Identification temps / cycle intra-grain

On rappelle (cf. *Constante de Planck et fondations stratales*) l'identification spatio-temporelle :

- *L'espace se mesure par les déplacements inter-grain.*
- *Le temps se mesure par les déplacements intra-grain (cycles sur le cercle unité).*

4.2 Dilatation des grains comme expansion

Définition 2 (Dilatation stratale). *On suppose l'existence d'une dilatation continue des grains : les grains $\mathcal{G}_{-kn_\infty}$ croissent en taille en fonction d'un paramètre temporel $\phi \in [0, 1]$.*

Comme la taille des grains gouverne la taille de la boule $\bar{B}^3$ qui les contient, cette dilatation se traduit par une expansion de $\bar{B}^3$ dans le temps.

Remarque 13 (Lecture cosmologique). *Cette dilatation stratale est l'analogie stratal de l'expansion cosmologique observée (Hubble) : l'univers grossit non par déplacement de matière dans un espace fixe, mais par croissance intrinsèque de la grille géométrique elle-même.*

5 L'intégration temporelle : du 3D au 4D

5.1 Paramétrisation de la boule en évolution

Proposition 6 (Famille de boules). *On paramètre la boule $\bar{B}^3$ en évolution temporelle par $\phi \in [0, 1]$ selon :*

$$\bar{B}^3(\phi) = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3 : x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \leq 1 - \phi^2\}.$$

À $\phi = 0$, la boule est maximale (rayon 1). À $\phi = 1$, la boule est réduite à un point. La paramétrisation décrit une évolution temporelle continue de l'espace stratal 3D.

Remarque 14 (Convention de signe). *La paramétrisation ci-dessus décrit une contraction (la boule diminue avec ϕ). Pour un modèle d'expansion, on inverserait le sens du paramètre. Ce qui suit est indépendant du sens : seule la structure géométrique de la famille importe.*

5.2 L'opération d'intégration

Théorème 2 (Passage 3D $\rightarrow$ 4D par intégration temporelle). *L'intégration de la fonction caractéristique de $\bar{B}^3(\phi)$ par rapport à ϕ produit une demi-boule B_+^4 dans $\mathbb{R}^4$:*

$$\int_0^1 \chi(\bar{B}^3(\phi)) d\phi = \sqrt{1 - r^2},$$

où $r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$, pour $r \leq 1$.

L'équation $x_4 = \sqrt{1 - x_1^2 - x_2^2 - x_3^2}$ définit précisément la demi-sphère S_+^3 dans $\mathbb{R}^4$, dont l'intérieur est la demi-boule B_+^4 .

Le paramètre temporel ϕ devient ainsi la quatrième coordonnée spatiale x_4 dans $\mathbb{R}^4$.

Démonstration. Pour un point fixe $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3$ de norme $r = \|\vec{x}\|$, la condition $\vec{x} \in \bar{B}^3(\phi)$ équivaut à $r^2 \leq 1 - \phi^2$, soit $\phi^2 \leq 1 - r^2$, soit $\phi \leq \sqrt{1 - r^2}$ (puisque $\phi \geq 0$).

Donc :

$$\int_0^1 \chi(\bar{B}^3(\phi))(\vec{x}) d\phi = \int_0^{\sqrt{1-r^2}} d\phi = \sqrt{1 - r^2}$$

pour $r \leq 1$, et 0 pour $r > 1$.

La fonction $r \mapsto \sqrt{1 - r^2}$ définie sur $\bar{B}^3$ est précisément la « hauteur » x_4 de la demi-sphère $S_+^3 \subset \mathbb{R}^4$ au-dessus du point (x_1, x_2, x_3) . Le graphe de cette fonction est donc la demi-sphère, et sa partie intérieure est la demi-boule B_+^4 . $\square$

5.3 Interprétation cosmologique

Remarque 15 (Émergence de l'espace-temps). *Le théorème 2 fait émerger une structure d'espace-temps 4D de manière naturelle :*

- À chaque instant ϕ , l'espace est une boule $\bar{B}^3(\phi)$ de dimension 3.
- L'évolution temporelle parcourt ϕ de 0 à 1.
- L'espace-temps complet est la demi-boule $B_+^4 \subset \mathbb{R}^4$.

Ce schéma est conceptuellement parent du modèle relativiste d'univers compact où l'espace est une 3-sphère évoluant dans le temps et l'espace-temps total est une 4-variété.

Remarque 16 (Hiérarchie des dimensions stratales). *Le programme du grain présente ainsi une hiérarchie de dimensions émergentes :*

- Dimension 1 : déploiement linéaire $\widetilde{\mathbb{R}}$ (Volume I).
- Dimension 2 : plan de travail (O, Δ, C_1) et Δ_∞ (Volume II).
- Dimension 3 : espace stratal $\bar{B}^3$ par rotation intrinsèque autour de Δ_∞ .
- Dimension 4 : espace-temps B_+^4 par intégration temporelle.

Chaque dimension supplémentaire est engendrée par une opération géométrique sur la dimension précédente : déploiement, mise en plan projectif, rotation, intégration temporelle.

5.4 Topologie de la frontière et trace de Δ_∞

Proposition 7 (Frontière de l'espace-temps). *L'espace-temps stratal B^4 (boule pleine de dimension 4) admet pour frontière la 3-sphère :*

$$\partial B^4 = S^3.$$

Cette 3-sphère est l'analogue cosmologique du « bord à l'infini » de l'espace-temps : c'est la structure topologique limite à laquelle on accède en s'éloignant indéfiniment de l'origine.

Remarque 17 (Statut de S^3). *La 3-sphère $S^3 = \partial B^4$ est l'horizon topologique de l'espace-temps stratal. Tous les points de l'univers cosmologique sont contenus dans son intérieur, et S^3 marque la frontière au-delà de laquelle l'espace-temps lui-même n'existe plus.*

C'est une lecture stratale du concept relativiste d'horizon cosmologique, mais ramenée à une structure géométrique précise et finie (3-sphère compacte).

Proposition 8 (Trace de Δ_∞ dans S^3). *La droite à l'infini Δ_∞ du plan stratal 2D (Volume II) admet, dans l'espace-temps cosmologique 4D, une trace géométrique précise dans la frontière S^3 : elle se prolonge en un grand cercle de S^3 .*

Ce prolongement n'est pas une redéfinition de Δ_∞ — qui reste fondamentalement une structure de dimension 1 — mais une extension naturelle par symétrie temporelle, articulant la dualité matière/antimatière du programme.

Démonstration. Δ_∞ , plongée dans $\mathbb{R}^3$ comme axe de rotation intrinsèque (cf. Définition 1), est une droite 1D de l'espace stratal $\bar{B}^3$.

Lorsqu'on passe à l'espace-temps 4D par intégration temporelle, deux extensions naturelles de Δ_∞ apparaissent :

- La trace de Δ_∞ dans la tranche $\phi = 0$ (espace au temps initial) : deux points antipodaux sur la sphère unité équatoriale.
- La trace de Δ_∞ dans la tranche miroir $\bar{\phi} = -1$ (correspondant au flot miroir $\bar{\Gamma}$) : deux points antipodaux symétriques.

Les quatre points obtenus, reliés par les flots Γ et $\bar{\Gamma}$ qui les parcourent, forment un *grand cercle* de S^3 : c'est le lieu de rencontre des deux flots dans la frontière. $\square$

Remarque 18 (Articulation avec la conjecture matière/antimatière). *La proposition 8 donne un support géométrique précis à la conjecture matière/antimatière du document Constante de Planck et fondations stratales.*

Dans cette conjecture, le flot universel Γ correspond à la propagation de la matière, et le flot miroir $\bar{\Gamma}$ à celle de l'antimatière. L'annihilation correspond à leur rencontre sur Δ , lieu de symétrie.

Dans le contexte cosmologique 4D, cette rencontre s'effectue sur le grand cercle de S^3 qui est la trace étendue de Δ_∞ . Ce grand cercle est donc le lieu géométrique de la dualité matière/antimatière à l'échelle cosmologique.

Le rôle de Δ_∞ est ainsi préservé et enrichi :

- Dans le Volume II : droite à l'infini du plan projectif stratal.
- Dans la Section 2 cosmologique : axe de la rotation intrinsèque.
- Dans la frontière S^3 : grand cercle de rencontre des flots matière/antimatière.

Δ_∞ reste un seul objet structurel, qui acquiert naturellement une trace géométrique dans chaque dimension émergente.

6 Rétroaction de la matière : conjecture

6.1 Position du problème

La construction précédente fournit une structure d'espace-temps *purement géométrique* (boule B_+^4). Elle ne contient pas encore la matière, ni son effet sur la géométrie.

Conjecture 1 (Rétroaction stratale de la matière). *La matière, dans le cadre du programme du grain, agit comme un facteur de stratification local sur l'espace-temps B_+^4 , par analogie avec le théorème de stratification fonctionnelle.*

Plus précisément, en chaque grain de l'espace-temps, la présence de matière modifie le rapport d'homothétie local λ , ce qui se traduit par une déformation de la métrique stratale ambiante.

Cette conjecture est l'analogue stratal des équations d'Einstein de la relativité générale.

6.2 Ce qui demande à être construit

Pour transformer cette conjecture en théorème, il faudrait :

1. *Définir la matière* comme objet du programme du grain. Plusieurs pistes existent (excitations stratales, défauts dans la grille, structures topologiques non triviales), mais aucune n'est encore établie.
2. *Construire un tenseur énergie-impulsion stratal* qui encode la distribution de matière.
3. *Établir des équations stratales* analogues aux équations d'Einstein, reliant la courbure de la métrique stratale à la distribution de matière.
4. *Vérifier la cohérence* avec les prédictions observationnelles de la relativité générale (déflexion gravitationnelle, ondes gravitationnelles, cosmologie de Friedmann-Lemaître).

Chacun de ces points est un programme de recherche à part entière.

7 Statut et perspectives

7.1 Ce qui est solide

Le présent document établit, dans un cadre cohérent avec le programme du grain :

- L'élévation du plan stratal 2D en espace stratal 3D par rotation intrinsèque autour de Δ_∞ .
- L'identification des tores Γ^2 à collier nul et des sphères encapsulantes S^2 engendrées par cette rotation.
- La densification de la structure aux niveaux $-kn_\infty$ avec $k \geq 1$, donnant l'espace stratal $\bar{B}^3$.
- Le passage rigoureux $3D \rightarrow 4D$ par intégration temporelle (Théorème 2).

Ces résultats forment un *cadre géométrique cohérent* pour l'espace-temps stratifié.

7.2 Ce qui est conjectural

Plusieurs aspects restent à approfondir :

- L'identification précise de la *matière* comme objet stratal.
- Les *équations dynamiques* (évolution temporelle, ondes, propagation).
- L'*articulation avec la relativité générale* (équations d'Einstein stratales).
- L'*articulation avec la mécanique quantique stratale* (théorie quantique des champs sur espace-temps stratifié).

7.3 Perspectives

Ce cadre ouvre des directions de recherche distinctes :

- *Cosmologie observationnelle* : étudier si la cosmologie stratale produit des prédictions distinctes de la cosmologie relativiste classique (corrections stratales à l'expansion, signatures dans le fond diffus cosmologique).
- *Gravitation quantique* : la structure stratale fournit naturellement un cadre où espace-temps et fonction d'onde coexistent, ce qui pourrait éclairer le problème de l'unification relativité-quantique.
- *Topologie de l'univers* : la boule B_+^4 obtenue par intégration suggère un univers *compact et fini*, à rapprocher des modèles d'univers fermé en cosmologie.
- *Articulation avec les conjectures du programme* : flot miroir comme antimatière, rétroaction stratale, structures topologiques non triviales (singularités, trous noirs).

Conclusion

L'apport principal de cette note est de proposer un *cadre géométrique cosmologique stratal* qui prolonge naturellement le programme du grain en dimension supérieure. La construction s'effectue en deux temps : rotation intrinsèque pour passer en 3D, intégration temporelle pour passer en 4D.

Le statut épistémologique est explicitement conjectural. Le cadre géométrique est cohérent et bien défini, mais la dynamique (rétroaction de la matière, équations d'évolution) reste à construire. Ces directions constituent un programme de recherche autonome dans le prolongement du programme du grain.

L'analogie avec la relativité générale (matière comme stratification locale, équations d'Einstein comme analogue stratal du théorème de stratification fonctionnelle) est suggestive mais demande des développements indépendants pour être formalisée rigoureusement.