



**HAL**  
open science

**Analogie de l'espace-temps en tant que milieu non élastique -Peut-on établir un coefficient de dilatation thermique de l'espace à partir de la constante cosmologique  $\Lambda$  ?**

Izabel David

► **To cite this version:**

Izabel David. Analogie de l'espace-temps en tant que milieu non élastique -Peut-on établir un coefficient de dilatation thermique de l'espace à partir de la constante cosmologique  $\Lambda$  ?. International Journal of Modern Physics D, 2023, 10.1142/S0218271823500918 . hal-04227571

**HAL Id: hal-04227571**

**<https://hal.science/hal-04227571v1>**

Submitted on 4 Oct 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Analogie de l'espace-temps en tant que milieu non élastique – Peut-on établir un coefficient de dilatation thermique de l'espace à partir de la constante cosmologique $\Lambda$ ?-

Izabel David<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ingénieur INSA Rennes et professeur de mécanique, Paris, France  
Courriel : d.izabel@aliceadsl.fr

## Résumé

Cet article fait progresser l'état de l'art en prolongeant l'étude de l'analogie entre le tissu de l'espace-temps et l'élasticité. Comme il n'existe aucun travail préalable sur un coefficient de dilatation thermique potentiel de l'espace-temps,  $\alpha$  nous explorons l'analogie de la relativité générale avec la théorie de l'élasticité en considérant la constante cosmologique  $\Lambda$  comme une courbure spatiale supplémentaire de la structure de l'espace due à un gradient thermique provenant de la toile cosmique et du vide froid et nous proposons  $\left(\frac{\alpha_s \Delta T}{e}\right)^2 = \left(\frac{1}{R_0}\right)^2 = \Lambda$  avec  $R_0$  étant le rayon de courbure du tissu spatial. Il résulte de cette analogie et du modèle spatial supposé constitué de fines feuilles d'épaisseur de Planck  $l_p$  courbées par ce gradient thermique  $\Delta T$  un coefficient de dilatation thermique possible du milieu élastique équivalent  $\alpha_s = \frac{l_p \sqrt{\Lambda}}{\Delta T}$  modélisant l'espace  $\alpha_{space-QFT}$  de l'ordre de  $1,16 \times 10^{-6} K^{-1}$ . Comme l'espace-temps et pas seulement l'espace doit être considéré en relativité générale, cet article propose également une approche innovante qui consiste à introduire dans l'intervalle  $ds^2$  de la relativité restreinte un effet de température  $T$  :  $d_s^2 = (1 \pm \alpha_t T)^2 c^2 dt^2 - (1 \pm \alpha_s T)^2 [dx^2 + dy^2 + dz^2]$  (variations d'entropie corrélées avec les lapses de temps, basées sur des variations de température affectant toujours physiquement les horloges) basé sur différents coefficients de dilatation thermique pour l'espace et le temps avec pour l'écoulement du temps  $t$  :  $\frac{ct}{cn\tau} = \frac{k_B t}{nh} \times \Delta T = \alpha_t \Delta T$ . Avec  $T \approx 10^{10}$  Kelvin,  $n=1$ , l'intervalle de temps associé est de  $4.8 \times 10^{-17}$  s et  $\alpha_t = 1.0 \times 10^{-6} K^{-1}$ . La conséquence de ces hypothèses est que l'énergie noire devient potentiellement une courbure thermique de l'espace-temps  $\left(\frac{\alpha_f T}{l_p}\right)^2$  avec  $f$  égal à  $s$  ou  $t$  en fonction de la température, de la variation d'entropie thermique de l'univers, de l'épaisseur de Planck et du temps, qui augmente depuis le Big Bang, en fonction des coefficients de dilatation thermique  $\alpha_s$  et  $\alpha_t$  pour l'espace-temps comme une fonction respectivement de  $\Lambda, \frac{k_B}{h} \times t$ , par opposition à la courbure de l'espace-temps due à la densité masse/énergie telle que décrite dans la relativité générale.

Mots-clés : tissu espace-temps, relativité générale, théorie de l'élasticité, mécanique quantique, coefficient d'expansion, constante cosmologique, énergie noire, temps.

PACS: 04.50.Kd, 46.90.+s

---

Cet article a été accepté par l'International Journal of Modern Physics D le 24 septembre 2023 et peut être trouvé en anglais officiellement à (<https://doi.org/10.1142/S0218271823500918>)

---

## 1. Introduction

### *1.1 Déformations mesurées de l'espace et analogie de la théorie de la relativité générale avec la théorie de l'élasticité*

La théorie de la relativité générale d'Einstein a plus de 100 ans et est maintenant largement vérifiée. Ainsi, l'espace-temps est selon cette théorie un objet physique élastique déformable. La gravitation est donc une manifestation de la déformation géométrique de l'espace-temps sous l'effet des masses ou de la densité d'énergie qui s'y trouvent. Les manifestations des déformations de cet espace-temps sont maintenant connues et mesurées avec une grande précision. On peut citer la variation apparente de position des étoiles placées derrière le soleil lors d'une éclipse mesurée par Edington [1], l'entraînement de l'espace-temps par distorsion angulaire par la rotation de la terre (expérience prob B, Lense-Thirring et précession géodétique) [2], les déformations simultanées d'allongement et de raccourcissement dans chacun des bras des interféromètres de type Ligo/Virgo lors du passage des ondes gravitationnelles [3],[4], les lentilles gravitationnelles ou des masses substantielles situées entre une galaxie et notre champ d'observation sur Terre déforment l'espace au point de nous le faire apparaître sous la forme d'un cercle (un peu comme une bougie placée derrière le pied circulaire plat d'un verre à vin apparaît circulaire par sa réflexion de transparence), et enfin l'expansion de l'univers où les galaxies sont « fixes » dans un espace qui s'étend de manière de plus en plus accélérée caractérisé par la loi de Hubble. Toutes ces manifestations des déformations de l'espace-temps ont conduit de nombreux physiciens comme A Sakharov [5], J.L Synge [6], C. B Rayner [7], R. Grot [8], V.V Vasilev et L.V Fedorov [9] [10], J.D Brown [11], T.G. Tenev et M.F. Horstemeyer [12] , P.A Millette [13] et beaucoup d'autres comme T. Damour dans ses conférences et ses livres considèrent que la théorie de la relativité générale est une sorte de théorie de l'élasticité d'un milieu élastique déformable de l'espace-temps. On parle alors de « métrique élastique » ou de « théorie élastique de la gravitation ». C'est dans le cadre de cette analogie que nous nous plaçons dans cet article.

Si par analogie, donc, l'espace-temps est considéré comme un milieu élastique déformable à 4 dimensions équivalent, où une image simpliste à 2 dimensions est une lourde boule posée sur une feuille de caoutchouc déformée par cette boule, deux conséquences apparaissent. Nous les étudierons dans les deux prochains paragraphes.

### *1.2 Les caractéristiques mécaniques du milieu élastique équivalent dans le domaine de l'analogie de la théorie de l'élasticité avec la relativité générale – revue de l'état de l'art*

Ce milieu élastique équivalent doit donc être caractérisé avec les paramètres usuels liés à tous les milieux élastiques et à la théorie de l'élasticité (module d'Young  $Y=E$ , coefficient de Poisson  $\nu$ , densité  $\rho$ , etc.). Ainsi, divers auteurs ont cherché à établir un module d'Young équivalent de l'espace noté  $Y_{space}$ . On peut citer R. Weiss lors de son discours de prix Nobel sur les ondes gravitationnelles. Je cite « *En d'autres termes, il faut d'énormes quantités d'énergie pour déformer l'espace. Une façon de dire est que la rigidité (module d'Young) de l'espace à une fréquence de distorsion de 100 Hz est  $10^{20}$  fois plus grande que l'acier* ».

T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12] proposent en considérant l'espace-temps constitué de fines feuilles élastiques de l'épaisseur de Planck la formulation suivante (1) donnant  $Y_{space} = 4,4 \times 10^{113} N/m^2$  :

$$Y_{space} = \frac{6c^7}{2\pi\hbar G^2} = \frac{24}{l_p^2 \kappa} \quad (1)$$

Dans cette expression,  $c$  est la vitesse de la lumière,  $G$  est la constante gravitationnelle,  $\hbar$  est la constante de Planck réduite,  $l_p$  est la longueur de Planck (épaisseurs des feuilles minces supposées constituer le tissu spatial dans [12]) et  $\kappa$  est la constante gravitationnelle d'Einstein ( $\kappa = \frac{8\pi G}{c^4}$ ).

M. Beau propose un module d'élasticité isostatique [14] et arrive à  $K_{space} = 1,64 \times 10^{109} N/m^2$ .

K. McDonald [15] propose une autre expression du module d'Young (2) basée sur des équations dimensionnelles et obtient:

$$Y_{space} = \frac{c^2 f^2}{G} \quad (2)$$

où  $f$  est la fréquence de l'onde gravitationnelle. Il obtient ainsi pour une onde gravitationnelle de 100 Hz  $Y_{space} = 10^{20} Y_{acier}$  donc,  $= Y_{space} 4,5 \times 10^{31} Pa$  comme R. Weiss.

D.Izabel dans [16] arrive à une expression similaire à K.Mc Donald en étudiant les déformations élastiques en dynamique spatiale situées dans les bras des interféromètres laser Ligo/Virgo et en étudiant les déformations élastiques d'un cylindre spatial en torsion tordu par la rotation de deux trous noirs. Il obtient ainsi l'expression (3) du module d'Young de l'espace similaire à

K.McDonald au facteur  $\pi$  prêt:

$$Y_{space} = \frac{\pi f^2 c^2}{G} \quad (3)$$

Cela conduit à considérer une densité  $\rho$  de la théorie quantique des champs (hypothèse similaire à T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12]) à  $Y_{space} = 1$  à  $4,0 \times 10^{113} Pa$ .

A.C. Melissinos [17] considère les plaques vibrantes dans les plans des bras des interféromètres et arrive à l'expression suivante (4) du module d'Young de l'espace:

$$Y_{space} < \frac{\pi c^2 f^2}{4G} \times \frac{c\Delta r}{\Delta z} \quad (4)$$

Dans cette expression,  $\Delta\tau$  est la longueur du sursaut d'onde gravitationnelle et la longueur totale du trajet parcouru par le GW est désignée par  $\Delta z$ . L'application numérique est effectuée avec  $\Delta\tau \approx 1$  s et  $\Delta z \approx 400$  Mpc et conduit à une valeur suivante du module d'Young  $Y_{space} < 2,5 \times 10^{-17} (c^2 f^2 / G)$ .

Citons enfin S.R. Hwang dans [18] qui en comparant l'énergie des ondes gravitationnelles pour différentes fréquences (35 à 100 Hz et GW différents) avec l'énergie de déformation d'un ressort modélisant l'allongement et le raccourcissement des bras des interféromètres arrive à des valeurs du module d'Young de l'espace-temps  $Y_{space} = 1.0 \times 10^{36}$  at  $1.0 \times 10^{54}$  Pa.

Un autre paramètre clé de tout milieu élastique est bien sûr le coefficient de déformation transversale, le coefficient de Poisson de l'espace  $\nu$ . Encore une fois, de nombreux auteurs ont proposé des valeurs. A partir des déformations simultanées des bras des interféromètres Ligo/Vierge (alors qu'un bras est raccourci par une déformation par raccourcissement de l'ordre de  $-10^{-21}$  l'autre allonge de la même quantité de  $+10^{-21}$ ) T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12] proposent  $\nu=1$  ce qui suppose une certaine anisotropie de l'espace qui se comporte comme une sorte de mille feuilles lors du passage d'une onde gravitationnelle, chaque plan se déformant successivement en fonction des polarisations  $A^+$  et  $A^\times$ . Le coefficient de Poisson étant proche de zéro dans la direction de propagation de l'onde et égal à 1 dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation.

D.Izabel dans [16] arrive à la même conclusion sur ce coefficient de Poisson.

Concernant la densité équivalente  $\rho$  de l'espace moyen, A Sakharov [5] montre que les considérations quantiques de l'espace (théorie quantique des champs) permettent de revenir à une théorie élastique de l'espace (5). Nous le citons ci-dessous :

« Dans la théorie de la gravitation d'Einstein, il est postulé que l'action de l'espace-temps dépend de la courbure (R est l'invariant du tenseur de Ricci):

$$S(R) = -\frac{1}{16\pi G} \int (dx) \sqrt{-gR} \quad (5)$$

La présence de l'action (1) se traduit par une « élasticité métrique » de l'espace, c'est-à-dire les forces généralisées qui s'opposent à la courbe de l'espace ».

T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12] et D. Izabel [16] suivent également cette voie qui les conduit en considérant l'énergie minimale non nulle du vide à l'expression suivante (6) :

$$\rho = \frac{Y_{space}}{4c^2} = 1.3 \times 10^{96} \frac{kg}{m^3} \quad (6)$$

P.A Millette dans la formule [13] 19.36 propose l'expression suivante (7) pour la densité de l'espace:

$$\bar{\rho}_0 = \frac{32c^5}{hG^2} = 1.7 \times 10^{98} kg/m^3 \quad (7)$$

Enfin, concernant le module de cisaillement de l'espace médian P.A Millette toujours en [13] formule 19.14 et 19.22 propose l'expression suivante (8a) :

$$\bar{\mu}_0 = \mu = G = \frac{Y}{2(1+\nu)} = \frac{32c^7}{\hbar G^2} 1.5 \times 10^{115} N/m^2 \quad (8 \text{ bis})$$

Pour le module d'élasticité isostatique (formule 19.21 de [13]) et 8b ci-dessous:

$$\bar{\kappa}_0 = K = \frac{\bar{\mu}_0}{32} = \frac{c^7}{\hbar G^2} = \lambda + \frac{2}{3}\mu = \frac{Y}{3(1-2\nu)} = 0.046875 \times 10^{115} N/m^2 \quad (8 \text{ ter})$$

Voilà qui conclut cet examen des caractéristiques de l'espace en suivant l'analogie de celui-ci en tant que milieu élastique équivalent. Deux conclusions se dégagent de cet état de l'art.

Tout d'abord, les paramètres mécaniques du matériau élastique équivalent constituant dans notre analogie le tissu comique ne sont pas de la même ampleur que ceux trouvés sur Terre étant donné les ordres de grandeur extrêmement petits des déformations de ( $10^{-21}$ ), extrêmement grands du module d'Young ( $10^{113} Pa$ ), le coefficient de Poisson en dehors des normes habituelles ( $\nu=1$ ), la densité  $\rho$  du milieu aussi extrêmement grande ( $10^{98} kg/m^3$ ) et son anisotropie associée liée au rapport de Poisson s'il est égal à 1 dans une direction perpendiculaire à la propagation de l'onde.

Deuxièmement, et c'est en partie l'objet de cet article, aucune publication à notre connaissance ne traite d'un éventuel coefficient d'expansion de  $\alpha$  ce milieu spatial. Nous allons donc déterminer une approche originale et innovante dans cet article pour tenter de proposer une expression mécanique et une valeur numérique de ce coefficient d'expansion possible  $\alpha$  du tissu spatial équivalent d'une part et étudier les conséquences sur le temps d'autre part.

### *1.3 Analogie de la loi de comportement de l'espace suivant la relativité générale avec la loi de Hooke en élasticité sans et avec constante cosmologique $\Lambda$ – gradient thermique implication sur les différentes courbures qui doivent être considérées*

Le deuxième aspect de cette analogie est la loi régissant ce milieu élastique équivalent, ce tissu spatial très particulier. En effet, il est bien connu que l'équation d'Einstein de la relativité générale sans constante cosmologique  $\Lambda$  relie la courbure de l'espace  $G_{\mu\nu}$  à la densité d'énergie  $T_{\mu\nu}$  qui la déforme voir équation (9).

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (9)$$

Dans cette expression  $R_{\mu\nu}$  est le tenseur de Ricci résultant de la contraction du tenseur de Riemann, R est la courbure scalaire résultant de la contraction du tenseur de Ricci et du tenseur d'énergie impulsion  $T_{\mu\nu}$ .  $\mu\nu$  variant de 0 pour le temps à 3 pour les 3 dimensions de l'espace.

D.Izabel a montré dans [16] que l'équation de la relativité générale en 4 dimensions présente une analogie avec respectivement les expressions en une et deux dimensions de la courbure d'une poutre (10, 11) et d'une plaque (12) en flexion pure sous deux moments appliqués à chaque extrémité (voir Figure 1.) selon la théorie de la résistance des matériaux de Timoshenko issue de la théorie de l'élasticité.

$$\frac{1}{R^2} = \frac{2}{EI} \left( \frac{W_{ext(total)}}{L} \right) = K \left( \frac{W_{ext(total)}}{L} \right) \quad (10)$$

Par analogie avec :

$$G^{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4}(T^{\mu\nu}) = -\kappa(T^{\mu\nu}) \quad (11)$$

Dans ces expressions, R est le rayon de courbure d'une poutre de portée L, I le moment d'inertie et Y le module d'Young  $E=Y$  associé à un travail des forces externes W. K est la constante de couplage mécanique entre la courbure et l'énergie de déformation U de la poutre qui est égale au travail appliqué par les forces externes W.

Soit en théorie des plaques d'épaisseur h suivant [25] avec  $R_x, R_y, R_{xy}$  les rayons de courbure de la plaque en flexion dans les différentes directions, un volume élémentaire  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot t$  de la plaque d'épaisseur t,  $\nu$  le coefficient de Poisson et E le module d'Young du matériau constituant la plaque.

$$\left[ \left( \frac{1}{R_x} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_y} \right)^2 + 2(1-\nu) \left\{ \left( \frac{1}{R_{xy}} \right)^2 \right\} + 2\nu \left\{ \frac{1}{R_x} \frac{1}{R_y} \right\} \right] = \frac{24(1-\nu^2)}{Et^2} \times \frac{\Delta U}{t\Delta x\Delta y} \quad (12)$$

T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12] mais aussi T. Damour dans son livre « Si Einstein m'était compté », ont montré cette analogie d'un point tensorielle en termes de loi de Hooke (13) et (14) avec  $\sigma^{kl}$  le tenseur des contraintes,  $\varepsilon^{ij}$  le tenseur de déformation, Y le module d'Young et  $g^{kl}$  une métrique.

$$\sigma^{kl} = \frac{Y}{1+\nu} \left( \frac{\nu}{1-2\nu} g^{ij} g^{kl} + g^{ik} g^{jl} \right) \varepsilon_{ij} \quad (13)$$

$$T_{\mu\nu} = \frac{1}{\kappa} \left( R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} \right) \quad (14)$$

Dans le modèle de tissu spatial de T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12], l'espace est supposé être constitué de feuilles ultra-minces d'épaisseur de Planck, ayant un comportement élastique. C'est dans ce modèle spatial que nous nous placerons dans la suite de cette publication.

Mais l'équation tensorielle d'Einstein (9) peut aussi être écrite en considérant cette fois la constante cosmologique  $\Lambda$  comme une matérialisation d'une certaine énergie noire répulsive. Il est écrit comme suit (voir formule (15) et (16)) :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} \quad (15)$$

Ou en factorisant la constante d'Einstein  $\kappa$  :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} \left[ T_{\mu\nu} - \frac{c^4 \Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu} \right] \quad (16)$$

Mais l'équation tensorielle d'Einstein (9) considérant la constante cosmologique  $\Lambda$  peut également être écrite comme une courbure supplémentaire présente dans tout l'espace (cadre de cet article). Il est écrit comme suit formule (17):

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (17)$$

Si l'on suit complètement l'analogie de la poutre ou de la plaque en élasticité, décrit avant, il existe non pas une mais deux sources de courbure (voir chapitre 3) : une sous les masses appliquées développées en [12] et [16] et une sous le gradient de température (donc avec 0 masse), d'où notre idée d'associer la seconde à la constante cosmologique si notre analogie est correcte, la première ayant déjà été partiellement démontrée dans [16].

Nous en venons donc au sujet de cette publication. De la même manière que nous avons montré que la constante d'Einstein,  $\kappa$  par analogie avec un milieu élastique constitué de fines feuilles d'épaisseur  $l_p$ , (théorie des plaques) pouvait être exprimée en termes de constantes mécaniques  $\left( \frac{24(1-\nu^2)}{Et^2} \rightarrow \kappa \rightarrow Y = \frac{24}{l_p^2 \kappa} \right)$  [12] [16] voir expression (12), la constante cosmologique  $\Lambda$  qui est généralement associée à une énergie noire [19], contrairement à la gravitation (15 et 16), ne peut-elle pas aussi être exprimée en termes de paramètres mécaniques comme une courbure supplémentaire présente dans tout l'espace (17) due à un gradient thermique appliqué à ces fines feuilles d'épaisseurs  $l_p$  ?

Cette constante  $\Lambda$  généralement associée à une expansion de l'espace [20] « **L'énergie sombre comme courbure de l'espace-temps induite par les fluctuations quantiques du vide** », ne peut-elle pas être corrélée à un comportement mécanique caché de l'espace via un paramètre absent de l'état de l'art cité plus haut dans l'analogie de l'espace comme milieu élastique, à savoir un coefficient  $\alpha$  de dilatation thermique de celui-ci? La différence phénoménale de température entre la toile cosmique qui remplit tout l'univers et le vide glacé à -2,73 K ne constitue-t-elle pas un gradient thermique suffisant pour imposer aux feuilles [12] constituant l'espace d'une épaisseur de Planck dans le cadre de notre modèle une courbure source supplémentaire de cette constante cosmologique ? Ce sont ces hypothèses que nous étudierons dans cet article, nous plaçant ainsi dans la continuité des publications et des modèles théoriques de T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12] et D. Izabel [16].

## 2. Méthodes

La méthodologie suivante a été mise en œuvre pour estimer, dans le cadre de l'analogie de l'espace en tant que milieu élastique équivalent, la valeur d'un coefficient de dilatation thermique possible de l'espace  $\alpha$  en ligne avec la constante cosmologique  $\Lambda$  associée à une courbure thermique supplémentaire de l'espace dans le cadre d'un modèle d'espace en feuilles d'épaisseur de Planck tel que considéré par T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12]:

- 1) Dans le cadre de l'analogie d'un milieu élastique pour modéliser les déformations de l'espace en présence d'énergie massique, restructurer les modèles mécaniques simplifiés et appropriés parmi ceux déjà développés pour évaluer une éventuelle courbure thermique généralisée de celui-ci,
- 2) Recherche de certaines données scientifiques pouvant alimenter ce modèle mécanique de l'espace courbe sous l'effet d'un gradient thermique entre la toile cosmique et le vide spatial,
- 3) Considérer la constante cosmologique  $\Lambda$  non pas comme une énergie noire gravitationnellement répulsive (si elle est placée à droite des équations (15) et (16) mais comme une courbure supplémentaire présente dans tout l'espace (si elle est placée à gauche de l'équation (17)) et analyse des conséquences de cette approche,
- 4) Extraire du modèle mécanique de courbure de l'espace sous gradient thermique et des données scientifiques disponibles en relation avec ce modèle en considérant la constante cosmologique  $\Lambda$ , un éventuel coefficient de dilatation thermique  $\alpha$  de l'espace,

- 5) Discuter de la représentativité de ce modèle en faisant varier les hypothèses (valeurs de  $\Lambda$ ) et en voyant les conséquences sur la valeur du coefficient de dilatation thermique de l'espace associé au tissu spatial élastique,
- 6) Discuter des vérifications supplémentaires nécessaires pour confirmer cette approche,
- 7) Étudier par l'analyse de l'état de l'art, l'effet potentiel de la température sur le temps via la variation d'entropie et son implication profonde sur l'intervalle en relativité restreinte  $ds^2$ , valeur de  $\Lambda$  la relativité générale exprimée en termes de courbure de l'espace et du temps,
- 8) Présentation des conséquences possibles de ce modèle concernant l'interprétation de l'énergie noire,
- 9) Proposition d'un moyen de tester cette théorie.

### **3. Recherche d'un modèle mécanique simplifié de l'espace permettant de représenter une courbure thermique de celui-ci**

#### *3.1 Analogie de la courbure thermique d'un milieu élastique avec une approche simplifiée de la résistance des matériaux en une dimension - poutre sous gradient thermique*

Dans la résistance des matériaux, deux phénomènes et seulement 2 peuvent créer une courbure:

- masses supportées par l'objet,
- gradient thermique appliqué à l'objet (poutre, plaque, coque).

Nous avons étudié le premier type de courbure en [16] et montré que les masses placées sur une poutre créent une courbure (18). Ainsi nous avons montré dans [16] que la courbure d'une poutre en flexion pure (sollicitée par deux moments  $M$  à chaque extrémité) (18) prend une forme similaire à l'équation d'Einstein du point de vue de l'analogie de l'espace comme milieu élastique sous la forme courbure  $=K \times$  une densité d'énergie de déformation linéaire  $U/L$  :

$$\frac{1}{R^2} = \frac{2}{EI} \left( \frac{U}{L} \right) \quad (18)$$

Avec  $U$  l'énergie de déformation de la poutre,  $L$  sa portée,  $E$  le module d'Young du matériau,  $I = \frac{be^3}{12}$  son moment d'inertie, ( $b \times e$ ) sa section et  $R$  son rayon de courbure (voir figure 1).

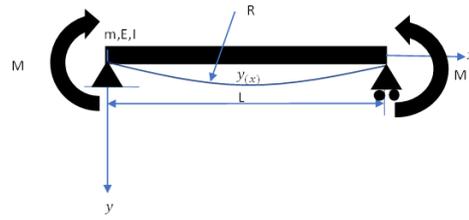


Figure 1 : Définition d'une poutre de Timochenko en flexion pure -

Le deuxième type de courbure, nous l'étudions dans cet article, c'est la courbure créée par la différence de température entre les deux fibres extrêmes de la poutre. La poutre est alors soumise à un gradient thermique  $\Delta T$  qui conduit à un allongement des fibres chauffées et à un raccourcissement des fibres refroidies. Ces différences d'allongement créent une courbure sans forces internes de la poutre si celle-ci n'est pas contrainte en déplacement quelque part le long de sa surface.

T. Damour nous dit dans ses diverses conférences et dans les publications [9] [11] que la courbure au sens d'Einstein a la dimension un angle divisé par une surface (voir aussi la première définition de la courbure et de la géométrie différentielle dans les travaux de C. F Gauss [21]). Nous montrerons que c'est bien le cas de poutre chargée par un gradient thermique (différence de température  $T$  entre les fibres inférieures et supérieures de la poutre)  $\Delta T = T_{ext} - T_{int}$  avec  $T_{ext}$  et  $T_{int}$  la température de chaque côté de la feuille considérée. Considérons maintenant le cas d'une poutre identique en flexion pure subissant un gradient thermique (voir figure 2) :

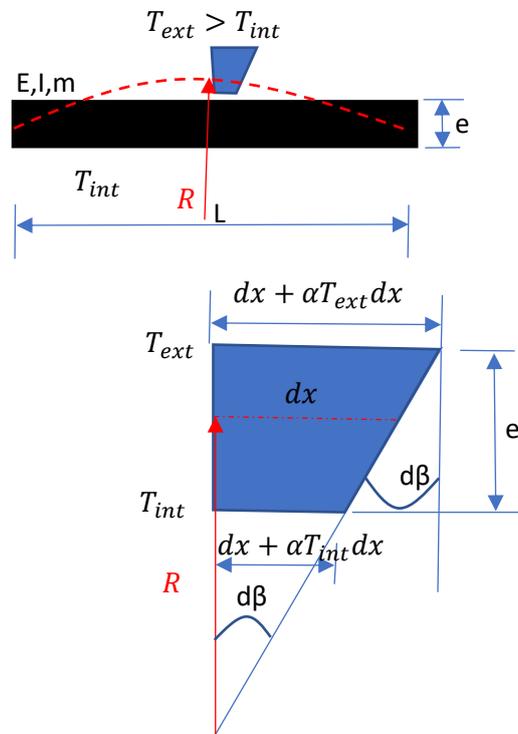


Figure 2 : Déformation d'une poutre en flexion sous un gradient thermique  $\Delta T$  –

L'énergie de déformation  $U$  (19) est toujours avec  $M$  un moment de flexion pour une poutre de portée  $L$ , d'épaisseur  $e$  et de rigidité  $EI$  :

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M^2}{EI} dx \quad (19)$$

La figure 2 et la formule (20) permettent d'écrire les relations géométriques suivantes entre l'angle  $\beta$  (radian) et la courbure ( $1/R$ ) de la poutre avec  $h$  la hauteur de la poutre,  $\alpha$  son coefficient de dilatation et  $\Delta T$  le gradient thermique appliqué à cette poutre :

$$\tan(d\beta) = \frac{dx}{R} = \frac{(dx + \alpha T_{ext} dx) - (dx + \alpha T_{int} dx)}{e} = \frac{(\alpha T_{ext} - \alpha T_{int}) dx}{e} = \frac{\alpha \Delta T dx}{e} \quad (20)$$

Étant donné la figure 2, à partir de la relation entre la courbure d'une poutre sous un gradient thermique et la dérivée seconde de  $y(x)$  son équation de déplacement, on obtient l'expression (21):

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} = \frac{1}{R} = \frac{\tan(d\beta)}{dx} = \frac{d\beta}{dx} = \frac{\alpha \Delta T}{e} \quad (21)$$

Considérant la nouvelle expression du moment  $M$  à partir de (21):

$$M = EI \frac{d\beta}{dx} \quad (22)$$

En remplaçant le moment  $M$  par son expression ci-dessus (22) dans l'expression de l'énergie de déformation  $U$  de la poutre (19), on obtient alors (23):

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{\left(EI \frac{d\beta}{dx}\right)^2}{EI} dx \quad (23)$$

Ainsi, après simplification ( $EI =$  constante le long de la poutre) on obtient (24) :

$$U = \frac{EI}{2} \left(\frac{d\beta}{dx}\right)^2 L \quad (24)$$

Après quelques calculs mathématiques, le résultat final est l'équation (25):

$$\left(\frac{d\beta}{dx}\right)^2 = \frac{2 U}{EI L} \quad (25)$$

Cela peut être comparé à l'expression rappelée ci-dessus dans le cas de la poutre en flexion pure (18).

On a donc bien un angle divisé par une aire comme la définition de la courbure ( $1/R$ ) au carré d'une poutre (26).

$$\left(\frac{d\beta}{dx}\right)^2 = \frac{d\beta^2}{dx \times dx} = \left(\frac{1}{R}\right)^2 \quad (26)$$

Ceci corrobore l'expression de T. Damour à partir de la géométrie différentielle de Gauss développée par Riemann [21] et donnée à nouveau dans la formule (27):

$$Courbure = \frac{\alpha + \beta + \gamma - 180^\circ}{Surface} \quad (27)$$

L'énergie de déformation d'une poutre de portée L, de rigidité EI=YI pour un gradient thermique constant  $\Delta T$  est donnée par la formule (28):

$$U_{\Delta T} = \frac{EI}{2} \left( \frac{d\beta}{dx} \right)^2 L = \frac{EI}{2} \left( \frac{\alpha \Delta T}{e} \right)^2 L \quad (28)$$

Ainsi:

$$\left( \frac{\alpha \Delta T}{e} \right)^2 = \frac{2 U_{\Delta T}}{EI L} \quad (29)$$

Comme notre analogie est basée sur la théorie de l'élasticité, nous pouvons superposer les cas de charge et ainsi superposer le cas d'une poutre en flexion pure (en raison des 2 moments M dus aux masses à chaque extrémité de la poutre voir figure 1.) avec le cas de la poutre sous gradient thermique constant uniforme  $\Delta T$  (voir figure 2). On obtient alors la formule (30) de la courbure généralisée d'une poutre sous charge et gradient thermique avec  $W_{ext(total(M+\Delta T))}$  le travail extérieur total des forces extérieures sous moment et gradient thermique:

$$\frac{1}{R^2} + \left( \frac{\alpha \Delta T}{e} \right)^2 = \frac{2}{EI} \left( \frac{U_M}{L} \right) + \frac{2}{EI} \left( \frac{U_{\Delta T}}{L} \right) = \frac{2}{EI} \left( \frac{W_{ext(total(M+\Delta T))}}{L} \right) \quad (30)$$

Cette expression est compatible du point de vue de l'analogie élastique avec l'expression (17) de l'équation de champ d'Einstein avec constante cosmologique  $\Lambda$  selon les correspondances (31) et (32) si l'on suppose (hypothèse de cet article) que la constante cosmologique  $\Lambda$  est par analogie corrélée à un gradient thermique appliqué dans tout l'espace :

- Pour la courbure des masses, l'analogie entre la relativité générale et la résistance des matériaux/élasticité est la suivante:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R \rightarrow \frac{1}{R^2} \quad (31)$$

- Pour la courbure thermique, l'analogie entre la relativité générale et la résistance du matériau/élasticité est la suivante :

$$\Lambda g_{\mu\nu} \rightarrow \left( \frac{\alpha \Delta T}{e} \right)^2 \quad (32)$$

A propos de la formule (31), en effet, pour la mémoire, on peut prouver que le tenseur de Ricci pour une 2sphère classique est  $2/R^2$  (voir livre What is space time made of ? de D.Izabel).

*3.2 Analogie de l'espace comme milieu élastique avec la courbure thermique d'une plaque mince associée selon la théorie de Timoshenko*

Considérer l'espace comme un tissu composé de fines feuilles a déjà été exploré comme nous l'avons dit plus haut par de nombreux auteurs. Citons Melissinos [17], T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12], D. Izabel [16], H A Perko [22].

C'est donc tout naturellement que nous reprenons cette hypothèse sur la structure du tissu de l'espace.

De plus, si l'on prend localement un morceau de l'univers, sa surface sera considérée comme presque plate selon la valeur de la courbure cosmologique  $k=0$  obtenue par les mesures du satellite Planck [23]. Dans ces publications, il est prouvé que la contrainte conjointe avec les mesures BAO sur la courbure de l'espace est compatible avec un univers plat,

$$\Omega_k = -0,0010 \pm 0,0018 / -0,0019. \gg -kc^2(r_0 H_0)^{-2}$$

Pour rappel, le facteur d'échelle d'expansion spatiale s'écrit  $R(t) = a(t) = \frac{r(t)}{r_0}$ .  $r_0$  est le rayon de référence et  $r(t)$  le rayon de la 3sphère dans la métrique de Friedmann-Lemaitre-Robertson Walker.

La constante de Hubble au carré ( $1/s^2$ ) est  $H_0^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_c$  : avec  $\rho_c$  la densité critique du milieu.

Ainsi, la courbure  $k$  (unité  $1/m^2$ ) de l'univers peut être considérée comme plate (33).

$$\Omega_k = -kc^2(r_0 H_0)^{-2} = -\frac{3kc^2}{8\pi G \rho_c a^2} \quad (33)$$

$\Omega_k$  est donc le paramètre de courbure sans dimension de l'espace (34):

$$\frac{\frac{1}{m^2} \times \frac{m^2}{s^2}}{\frac{m^3}{kg s^2} \times \frac{kg}{m^3} \times 1} = 1 \quad (34)$$

Il n'est donc pas absurde de considérer l'espace comme une superposition de plaques infiniment longues compte tenu du très grand rayon de courbure de l'univers associé à sa taille gigantesque [24].

Dans ce cas, la courbure d'une plaque mince sous un gradient thermique est bien connue et est donnée dans S. Timoshenko dans son livre [25] au chapitre 14 formule 50. On donne l'expression ci-dessous (formule 35) similaire à celle obtenue dans le cas d'une poutre :

$$\frac{\alpha \Delta T}{e} = \frac{1}{R} \quad (35.a)$$

Ou au carré pour rester cohérent avec le paragraphe précédent concernant la théorie des poutres (35.b):

$$\left(\frac{\alpha\Delta T}{e}\right)^2 = \left(\frac{1}{R}\right)^2 \quad (35.b)$$

Dans ces deux expressions la courbure au carré de la plaque  $\left(\frac{1}{R}\right)^2$  est donc liée à l'épaisseur de la plaque considérée  $e$ , au coefficient de dilatation thermique  $\alpha$  associé au matériau élastique et au gradient de température thermique  $\Delta T$  entre les fibres extrêmes de la plaque.

C'est donc ce modèle que nous examinerons plus loin dans la continuité des auteurs cités plus haut [12], [16]. Il faut donc établir les différents paramètres impliqués dans ce modèle. À savoir, quelle épaisseur  $e$  des feuilles? quelle intensité du gradient thermique  $\Delta T$ ?, quelle valeur de la courbure  $1/R$ ?. C'est ce que nous étudierons dans le chapitre suivant.

#### **4. Recherche de certaines données scientifiques pouvant alimenter ce modèle mécanique de courbure thermique du tissu spatial**

##### *4.1 Quelle épaisseur de tôle prendre en compte ?*

Nous savons par A. Sakharov [5] que la nature quantique potentielle du vide peut générer une métrique élastique de l'espace. T.G Tenev et M.F Horstemeyer dans [12] considèrent les feuilles d'épaisseur de Planck. D. Izabel dans [16] parvient à trouver les modules d'Young des différents auteurs en considérant également une longueur de Planck. P.A Millette [13] fait de même.

En conséquence, nous considérerons comme dans [12] dans le cadre de cette publication, une épaisseur  $e$  de feuille ou de fibre du tissu élastique de l'espace égale à  $l_p$  la longueur de Planck (36).

$$e = e_p = l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \quad (36)$$

#### **Remarque**

Ce modèle de tissu élastique d'épaisseur  $l_p$  a été étudié dans la thèse de T. Tenev pour modéliser la gravité solaire. Il y a une parfaite concordance entre la théorie et le modèle [12] et [30].

#### 4.2 Quel gradient thermique prendre en compte ?

De nouvelles données montrent un gradient de température entre le vide absolu à 2,73 K et la toile cosmique voir [26] « The Cosmic Thermal History Probed by Sunyaev-Zeldovich Effect Tomography ». Dans cet article, nous pouvons lire:

*« Nous estimons  $T_e$ , la température électronique pondérée en densité de l'univers, qui va de  $7 \times 10^5$  K à  $z = 1$  à  $2 \times 10^6$  K aujourd'hui » L'histoire thermique cosmique sondée par la tomographie par effet Sunyaev-Zeldovich YI-KUAN CHIANG, RYU MAKIYA, BRICE MÉNARD ET EIICHIRO KOMATSU " [26].*

Dans cet article, les auteurs mettent donc en évidence un certain gradient thermique entre les zones froides de l'univers et les zones très chaudes au niveau de la toile cosmique. Ainsi, cet article récent suggère que la température moyenne du gaz présent dans les grandes structures de l'Univers observable a été multipliée par 10 au cours des dix derniers milliards d'années pour atteindre environ deux millions de Kelvin aujourd'hui.

On retiendra donc cette hypothèse :  $\Delta T = 2\,000\,000$  °K.

#### 4.3 Quelle courbure de l'espace associée à ce gradient thermique prend-on en compte ?

P. J. E. Peebles dans son article [19] passe en revue les différentes approches pour relier la constante cosmologique et l'énergie noire.

Emilio Santos dans [20] son article étudie l'énergie noire induite par la courbure de l'espace-temps par les fluctuations quantiques du vide.

Sur la base de ces deux articles en particulier, nous postulons donc que la constante cosmologique est à l'origine d'une courbure de l'espace liée à un gradient thermique agissant sur les fines feuilles d'espace d'épaisseur quantique égale à la longueur de Planck.

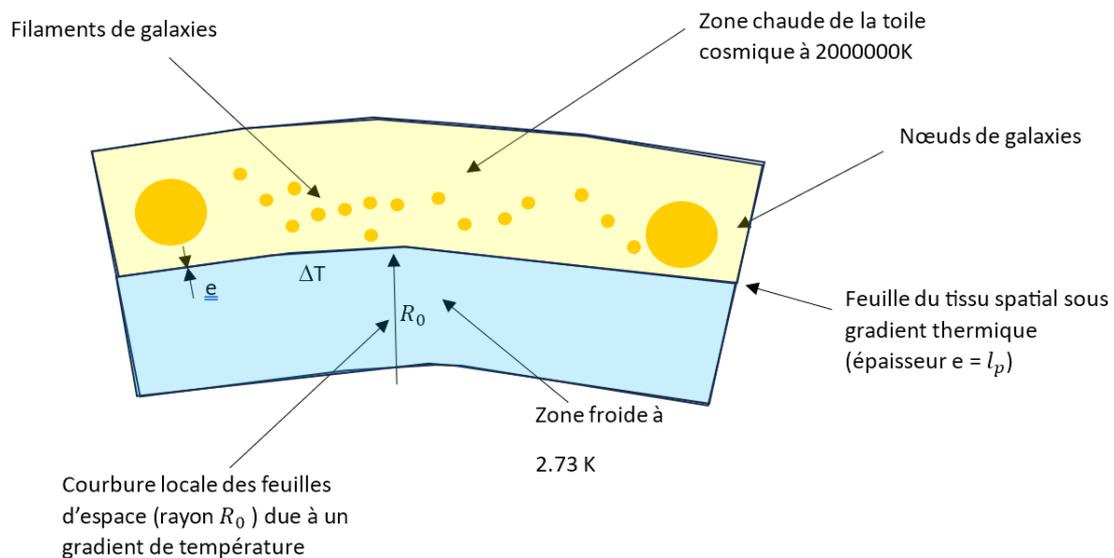
Pour être cohérent avec les approches de A. Sakharov [5] et T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12], nous considérons dans cette étude la constante cosmologique résultant des fluctuations du vide (théorie quantique des champs). Nous verrons au chapitre 6 comment explorer toutes les options scientifiques, ce qui donne d'autres valeurs de la constante cosmologique  $\Lambda$ - résultant des observations cosmologiques.

Nous faisons cette hypothèse basée sur la théorie quantique des champs en tenant compte de tous les paragraphes précédents:

- 1) l'analogie du tissu spatial en tant que milieu élastique fonctionne bien avec l'équation de relativité générale pour la masse / énergie [5] à [17],
- 2) l'analogie élastique suggère deux courbures possibles et seulement deux : l'une résultant des masses/énergie agissant dans le milieu et l'autre résultant du gradient thermique agissant sur le milieu [16],
- 3) il y a évidemment un gradient thermique présent dans l'espace suivant [26],
- 4) De nombreux auteurs [12],[16],[22] et les mesures des ondes gravitationnelles [3] [4] suggèrent la présence de déformations planes des milieux élastiques (tissu spatial),
- 5) A.Sakharov [5] a montré que la relativité générale est corrélée à une métrique élastique résultant de la fluctuation quantique de l'espace.

#### 4.4 Modèle final retenu pour estimer un coefficient de dilatation thermique du tissu de l'espace équivalent

Compte tenu des paragraphes précédents, nous arrivons donc au modèle simplifié donné à la figure 3 ci-dessous.



**Figure 3 : Modèle mécanique simplifié d'espace élastique subissant une courbure par un gradient thermique entre une zone très chaude et une zone très froide de l'univers**

Ainsi, les fines feuilles d'espace presque plates ( $k=0$ ,  $T$  de courbure de l'espace tendant vers l'infini [12],[23] et [24]) de l'épaisseur de Planck ( $l_p$ ) selon le raisonnement de A. Sakharov [5] et T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12] subissent un gradient thermique résultant des différences de température moyenne entre la toile cosmique et le vide spatial [26]. Cela provoque leur courbure. C'est cette courbure que peut représenter la constante cosmologique  $\Lambda$  [19] [20]. En nous plaçant dans l'analogie de l'espace fonctionnant comme un milieu, un tissu élastique, la mécanique des milieux continus par la théorie des plaques de Timoshenko [25] nous permet de modéliser son comportement de manière simplifiée et d'extraire un coefficient de dilatation thermique  $\alpha$  du tissu spatial.

**Remarque**

La conductivité thermique  $\lambda$  du vide est par définition 0 W/m<sup>2</sup>.K. Cela nous permet d'avoir un gradient thermique entre les deux faces d'épaisseur  $e = l_p$ .

**5. Conséquence de considérer la constante cosmologique comme une courbure thermique généralisée**

*5.1 Détermination du coefficient de dilatation de la structure spatiale*

De l'expression de Timoshenko (36) (voir aussi [5]) d'une courbure spatiale de plaque ( $k=0$ ) voir [23] et [24] en flexion pure chargée par un gradient thermique  $\Delta T$  [26] et en considérant la constante cosmologique  $\Lambda$  comme une courbure supplémentaire (et non une énergie noire) associée au gradient thermique agissant dans l'espace [19] [20], nous postulons l'équation (37):

$$\left(\frac{\alpha_S \Delta T}{e}\right)^2 = \left(\frac{1}{R_0}\right)^2 = \Lambda \tag{37}$$

$R_0$  est le rayon de courbure d'une des feuilles minces supposées constituer le tissu spatial [12] (voir Figure 3).

On déduit de l'expression ci-dessus le coefficient de dilatation thermique  $\alpha_S$  du tissu spatial :

$$\alpha_S = \frac{e\sqrt{\Lambda}}{\Delta T} \tag{38}$$

Par définition de la constante cosmologique avec  $\rho_{vacuum}$  la densité du vide et  $c$  la vitesse de la lumière on obtient (39) :

$$\frac{c^4 \Lambda}{8\pi G} = \rho_{vacuum} c^2 \tag{39}$$

Donc, après quelques calculs mathématiques (40):

$$\Lambda = \frac{8\pi G \rho_{vacuum}}{c^2} \quad (40)$$

En transférant cette expression dans la formule du coefficient de dilatation thermique du tissu spatial (38), on obtient l'expression du coefficient de dilatation thermique de l'espace  $\alpha_S$  à partir de la densité du vide (41):

$$\alpha_S = \frac{e \sqrt{\frac{8\pi G \rho_{vacuum}}{c^2}}}{\Delta T} = \frac{e \sqrt{\Lambda}}{\Delta T} \quad (41)$$

Si l'on considère une épaisseur de plaque spatiale  $e$  de dimension de Planck (35) comme T. Tenev et M.H Horstemeyer [12] et l'énergie de vide associée, on obtient (42) une première approximation de ce coefficient de dilatation thermique.  $\alpha_S$

$$\alpha_S = \frac{\sqrt{\frac{hG}{2\pi c^3} \sqrt{\frac{8\pi G \rho_{vacuum, QFT}}{c^2}}}}{\Delta T} \quad (42)$$

Ainsi, tous les calculs effectués donnent (43):

$$\alpha_S = \frac{2G \sqrt{\frac{h \rho_{vacuum, QFT}}{c^5}}}{\Delta T} \quad (43)$$

Avec  $\hbar$  la constante de Planck réduite ( $h/2\pi$ ),  $\rho$  la densité quantique du vide selon la théorie quantique des champs,  $G$  la constante gravitationnelle,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\Delta T$  le gradient thermique appliqué à ces feuilles d'espace.

Considérons l'expression du coefficient de dilatation thermique  $\alpha_S$ , nous vérifions que l'équation dimensionnelle (44) est satisfaite :

$$\alpha_S = \frac{\frac{m^3}{kg s^2} \sqrt{\frac{\frac{kg m^2}{s} \times \frac{kg}{m^3}}{\frac{m^5}{s^5}}}}{K} = K^{-1} \quad (44)$$

L'application numérique utilisant les constantes de la physique et utilisant les mêmes hypothèses que P.A Millette [13] et T.G Tenev et M.F Horstemeyer [12] donne:

$$G = 6,6743015 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}.\text{s}^2$$

$$h = 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2.\text{kg}/\text{s}$$

$$\rho_{vacuum, QFT} = 1,11 \times 10^{96} \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\Delta T = 2000000 \text{ K}$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m}/\text{s}$$

On obtient pour le coefficient de dilatation thermique du tissu spatial :

$$\alpha_{S,QFT}=1,16317 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

Pour la mémoire, le coefficient de dilatation de l'acier vaut  $12,0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ .

On obtient donc un résultat qui semble réaliste puisque l'espace est plutôt rigide si l'on se réfère à la valeur de  $\kappa$  qui représente la flexibilité (1/rigidité) de l'espace et qui est égale à  $2,0766 \times 10^{-43} \text{N}^{-1}$ .

Nous trouvons ce résultat directement à partir de l'équation (41) avec les données suivantes en considérant à partir de  $\Lambda$  la théorie quantique des champs:

$$\Lambda_{QFT}=2,0717 \times 10^{70} \text{m}^{-2}$$

$$e = l_p = 1,61626 \times 10^{-35} \text{m}$$

$$\Delta T = 2000000 \text{K}$$

## 6. Discussion de la représentativité du modèle mécanique de courbure thermique de l'espace

Il est bien connu que l'un des plus grands défis de la physique aujourd'hui est ce problème de la constante cosmologique  $\Lambda$  qui, selon l'hypothèse retenue pour l'établir (énergie du vide résultant des fluctuations quantiques de l'état fondamental fournies par la théorie quantique des champs ou les observations cosmologiques via le satellite Planck notamment) conduit à un rapport de  $10^{120}$  entre les deux valeurs de  $\Lambda$ ! Nous ne prétendons pas dans cet article résoudre ce problème, simplement d'un point de vue scientifique il est important d'explorer ce que ces deux valeurs de la constante cosmologique impliquent sur le coefficient de dilatation thermique potentielle du tissu de l'espace. Dans ce cas, l'application de la formule (41) avec les valeurs numériques suivantes:

$$l_p = e = 1,61626 \times 10^{-35} \text{m}$$

$$\Lambda = 1,088 \times 10^{-52} \text{m}^{-2}$$

$$\Delta T = 2000000 \text{K}$$

Conduit à un coefficient de dilatation thermique extrêmement faible...

$$\alpha_{S,astrophysics}=8,42936 \times 10^{-68} \text{K}^{-1}$$

## **7. Discussion des vérifications supplémentaires nécessaires pour valider ou non ce modèle**

Pour vraiment valider notre modèle, il faudrait bien sûr résoudre ce problème de la variation possible des valeurs de la constante cosmologique  $\Lambda$ . Un modèle de l'univers reproduisant la construction de la toile cosmique à partir de la relativité générale et des observations existe, cependant ces modèles n'intègrent aucun comportement mécanique tel que l'analogie de l'espace comme un milieu élastique déformable.

Il faudrait sans doute modéliser l'espace, contenant et contenu dans une structure en feuilles, pour mettre en place la toile cosmique et imposer le gradient thermique entre les zones chaudes et froides pour vérifier ou non si une courbure d'origine thermique apparaît en moyenne sur l'univers en entier, rechercher quelle est son intensité et donc en profiter pour évaluer la vraie valeur de la constante cosmologique  $\Lambda$  et donc la vraie valeur du coefficient de dilatation thermique du tissu spatial.

## **8. Conséquence d'un coefficient de dilatation thermique sur le temps pour la relativité restreinte, la relativité générale et la gravité quantique**

### *8.1 Transition nécessaire de l'espace à l'espace-temps dans la prise en compte de la température*

Nous avons vu dans les chapitres précédents que l'analogie avec un milieu élastique continu propose une sorte de courbure de masse nulle de l'espace liée à un effet de température. Mais puisque la relativité générale vise la courbure de l'espace-temps, et pas seulement de l'espace, il est nécessaire de préciser comment cet effet de température pourrait agir sur le temps.

### *8.2 Effet de la température sur le temps*

#### 8.2.1 Généralités sur les horloges et leurs sensibilités physiques à la température

Il est bien connu que les variations de température peuvent affecter les horloges de différentes manières, en particulier dans les horloges mécaniques et électroniques.

Dans les horloges mécaniques, les pièces métalliques peuvent se dilater ou se contracter en fonction de la température. Cela peut entraîner des variations minimales dans les dimensions des composants, ce qui peut affecter la précision du mouvement. Les matériaux utilisés dans les mécanismes peuvent réagir différemment aux changements de température, ce qui peut provoquer des changements dans le rythme de l'horloge. Nous avons donc un effet spatial.

Dans les horloges électroniques, la température peut influencer la fréquence des oscillateurs à quartz utilisés pour mesurer le temps. Les cristaux de quartz ont une résonance électromécanique sensible à la température. Les variations de température peuvent légèrement modifier la fréquence à laquelle le quartz oscille, ce qui peut entraîner des écarts dans le décompte du temps. Si l'équivalent du quartz est très petit, voir le cas des horloges atomiques où c'est la fréquence d'un atome qui intervient, on a un effet quantique.

En ce qui concerne les processeurs électroniques, les variations de température peuvent également avoir un impact sur leurs performances. Lorsqu'un processeur chauffe, ses composants peuvent se dilater légèrement, ce qui pourrait potentiellement affecter la vitesse des signaux électriques à travers le circuit. Cependant, les conceptions de processeurs modernes intègrent généralement des mécanismes de contrôle de la température pour minimiser cet effet.

Ainsi, en y réfléchissant, la température influence réellement le temps en jouant sur les variations dimensionnelles de l'espace ou sur les vibrations du quartz, donc plus profondément au niveau quantique via  $E = h\nu$ .

Ainsi, pour mesurer le temps, nous avons besoin d'horloges qui, quelles que soient la physique et la technologie utilisées, seront systématiquement sensibles à la température du milieu dans lequel elles sont immergées. Telle est la conclusion de ce paragraphe.

La question suivante se pose alors : s'il est clair que la température affecte les appareils de mesure du temps, affecte-t-elle aussi fondamentalement le temps, qui est une entité abstraite en physique indépendante de tout instrument de mesure ?

Nous verrons dans le chapitre suivant en passant en revue l'état de l'art sur cette question, comment différents auteurs ont abordé cette question en se concentrant sur le temps comme un changement d'entropie, c'est-à-dire à une augmentation du désordre, qui à son tour est lié à un effet de la température.

### 8.2.2 État de l'art sur le lien entre le temps, une horloge, la variation d'entropie et la température dans un corps noir

Dans les publications [27] et [29], les auteurs étudient qu'est-ce qu'une horloge ? quel type de mesures peut-on faire ? comment la température peut affecter le temps fondamentalement et ils expliquent comment le temps passe en fonction de l'augmentation de l'entropie et donc de la température.

Dans ces articles, il est clair que le temps lui-même ne peut être défini sans un processus physique pour le mesurer. Je cite [27]:

« Einstein a souligné que la définition du temps doit être basée sur la mesure de l'horloge, mais il a été souligné la nécessité d'une signification physique pour les coordonnées temporelles. Dans l'analyse des horloges, une relation de pointage a été introduite; Il affirme qu'il existe une relation conceptuellement nécessaire entre le temps et un processus physique qui fonctionne comme le noyau

d'une horloge. Cette relation temps-horloge implique qu'un processus physique doit exister comme base d'une horloge. Le temps et le processus physique ne peuvent pas être définis indépendamment. La relation temps-horloge implique également une référence à un processus physique conforme aux lois physiques. Par conséquent, une utilisation bien définie du temps exige que le temps ait une base physique. »

Ainsi, à partir de cette réflexion, le temps est inséparable d'un processus physique et comme au paragraphe 8.2.1 nous avons rappelé que tous les processus physiques sont soumis à des effets de température, donc le temps devrait également être affecté par la température en plus de ce qu'Einstein a montré en relativité restreinte, à savoir que le temps dépend de la vitesse de l'observateur.

Par conséquent, les auteurs de la formule [27] (1) de [29] introduisent la définition de l'intervalle de temps par rapport à l'entropie locale  $S$  et au taux d'entropie locale  $\dot{S}$ , comme suit (45):

$$t = \frac{S}{\dot{S}} \tag{45}$$

Et de la variation d'entropie les auteurs obtiennent en [27] formule (12) et [29] une variation  $\tau$  de la fonction de décalage temporel de fréquence  $\nu$  de l'objet physique utilisé pour construire une horloge physique comme l'exige A. Einstein. Cependant cette fois-ci cette horloge dépend de la température  $T$ , de la constante de Planck  $h$  et de la constante de Boltzmann  $k_B$ . Ils obtiennent alors l'expression fondamentale (46):

$$\tau_{(T)} = \frac{1}{\nu} = \frac{h}{k_B} \times \frac{1}{T} = \frac{4.799243 \times 10^{-11} [K.s]}{T [K]} \tag{46}$$

Enfin selon [27] formule (13) et [29] dans le domaine d'un corps noir, il existe une relation (47) donnant la variation de l'écoulement du temps  $t$  en fonction de la température  $T$ , le temps périodique d'oscillation  $\tau$  et  $n$  est un entier naturel.

$$t_{(T)} = n\tau = n \frac{h}{k_B} \times \frac{1}{T} = n \cdot \frac{4.799243 \times 10^{-11} [K.s]}{T} \approx n \frac{4.80 \times 10^{-11} [K.s]}{T} \tag{47}$$

**Remarque 1**

Dans le tableau 1 de l'article [27], nous pouvons voir que l'effet de la température sur le temps est très faible.

Pour  $T = 10^6$  Kelvin,  $n = 1$  l'intervalle de variation du temps lié à cette température est de  $4.8 \times 10^{-17}$  s

**Remarque 2**

Si nous prenons l'inverse de l'expression (47) et multiplions par le temps  $t$  chaque côté de l'équation on obtient (48) qui permet de définir un coefficient de dilatation thermique dépendant du temps:

$$\frac{t}{n\tau} = \frac{k_B t}{nh} \times T = \alpha_t T \quad (48)$$

Ainsi, le terme  $\frac{k_B t}{nh}$  a la dimension d'un coefficient d'expansion ( $K^{-1}$ ) fonction du temps que l'on notera  $\alpha_t$ :

Ainsi, le temps est influencé dans ce modèle d'horloge physique au niveau quantique par la température  $T$ , la constante de Planck  $h$ , la constante de Boltzmann  $k_B$  et donc par l'entropie du milieu  $S$ . Le temps est quantifié par l'expression  $(n \times h)$ .

Ainsi, associé à  $T=1 \times 10^6$  Kelvin (voir ordre de grandeur de la température de la toile cosmique [26]),  $n=1$  et considérant un intervalle de temps de  $4.8 \times 10^{-17}$  s (suivant [27] tableau 1), on obtient avec (48) une évaluation de l'amplitude de ce coefficient de dilatation thermique dépendant du temps :

$$\alpha_t = 1.0 \times 10^{-6} K^{-1}$$

Donc, un ordre de grandeur pour  $\alpha_t$  similaire à celui que nous avons obtenu pour  $\alpha_s$  dans la première partie de notre article basée sur la constante cosmologique  $\Lambda$  comme une valeur de la courbure thermique du tissu de l'espace.

### Remarque 3

Dans le modèle du tissu cosmique [12], T.Tenev et M.F Horstemeyer ont lié les laps de temps à la vitesse de propagation du signal dans le tissu.

Ainsi la variation du laps de temps (49) s'écrit comme suit :

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{(1+\varepsilon^{3D})} \quad (49)$$

Avec la formule (50):

$$\varepsilon_{,kk}^{3D} = c^2 \kappa \rho \quad (50)$$

Où  $\varepsilon_{,kk}^{3D} \equiv \nabla^2 \varepsilon^{3D}$  est le laplacien de la déformation volumétrique,  $c$  est la vitesse de la lumière,  $\kappa$  est la constante d'Einstein, et  $\rho$  est la densité matière-énergie.

Dans cette expression  $\varepsilon^{3D}$  est un champ scalaire qui représente l'augmentation fractionnaire du volume moyen d'hypersurface du tissu (51):

$$\varepsilon^{3D} \equiv \varepsilon_i^i \quad (51)$$

Et le tenseur de déformation habituel est (52):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(g_{ij} - \delta_{ij}) \quad (52)$$

Ainsi le temps dépend d'une variation de volume due au tenseur d'énergie de déformations qui génère une déformation sur le milieu élastique (53) :

$$\frac{dV}{d\bar{V}} = (1 + \varepsilon^{3D}) \quad (53)$$

Mais pour revenir à l'analogie complète avec le milieu élastique cette variation de volume peut aussi provenir de la température (54) :

$$\frac{dV}{d\bar{V}} = \alpha_S \Delta T \quad (54)$$

Et enfin dans l'équation (48) nous pouvons transposer cela au temps comme un rapport de longueur du tissu spatial (nous voyons ainsi l'importance de la vitesse de la lumière comme caractéristique intrinsèque du tissu spatial) voir (55):

$$\frac{ct}{cn\tau} = \frac{k_B t}{nh} \times \Delta T \quad (55)$$

### 8.2.3 Etat de l'art sur le temps cosmologique, le temps coordonné lié à l'entropie et la dynamique de l'expansion de l'univers

Dans [31] « Temps cosmologique, entropie et infini » les auteurs vont dans le même sens que [27] et [29] en liant le temps à l'entropie mais vont plus loin en associant cette variation d'entropie à l'évolution temporelle dynamique de l'univers dans son intégralité depuis le Big Bang jusqu'à nos jours.

Je cite : « Le temps est un paramètre qui joue un rôle central dans notre modélisation la plus fondamentale des lois naturelles. La théorie de la relativité montre que la comparaison des temps mesurés par différentes horloges dépend de leur mouvement relatif et de la force du champ gravitationnel dans lequel elles sont intégrées. En cosmologie standard, le paramètre de temps est celui mesuré par les horloges fondamentales (c'est-à-dire les horloges au repos par rapport à l'espace en expansion). Ce temps propre est supposé s'écouler à un rythme constant tout au long de l'histoire de l'univers. Nous faisons l'hypothèse alternative que la vitesse à laquelle le temps cosmologique s'écoule dépend de l'état dynamique de l'univers. En thermodynamique, la flèche du temps est fortement liée à

la deuxième loi, qui stipule que l'entropie d'un système isolé augmentera toujours avec le temps ou, au mieux, restera constante. Par conséquent, nous supposons que le temps mesuré par les horloges fondamentales est proportionnel à l'entropie de la région de l'univers qui leur est causalement connectée. Sous cette simple hypothèse, nous trouvons qu'il est possible de construire des modèles cosmologiques jouets qui présentent une accélération de leur expansion sans aucun besoin d'énergie noire tout en étant spatialement fermés et finis, évitant ainsi la nécessité de traiter des valeurs infinies. »

Dans cet article, l'hypothèse suivante est faite, je cite encore « le temps cosmologique  $t$  mesuré par de tels observateurs est proportionnel à l'entropie de la région de l'univers qui leur est causalement connectée ».

Les auteurs proposent donc l'expression suivante de la fonction temps de l'entropie au niveau de l'univers :

- D'abord le lien entre l'entropie de l'univers et la température spatiale T :

En se basant sur le gaz de photons CMB que les auteurs [32] supposent très proche de l'équilibre thermodynamique, l'entropie S s'écrit de la manière suivante (voir (56)):

$$S = \frac{4\pi^2 k_B^4}{45c^3 \hbar^3} VT^3 \quad (56)$$

Avec V le volume considéré (par exemple horizon  $V_{horiz}$ ),  $\hbar$  la constante de Planck réduite, c la vitesse de la lumière,  $k_B$  la constante de Boltzmann. et T la température associée.

- Deuxièmement, le lien entre la variation temporelle de l'entropie à l'horizon (57) et l'expansion dynamique de l'univers :

$$\frac{dS_{horiz}}{dt} = \frac{64\pi^3 k_B^4}{45\hbar^3} T_0^3 \frac{1}{H_{0,t}^2 \Omega_{0,t}^2} (\Omega_{0,t} + R(1 - \Omega_{0,t})) \quad (57)$$

Avec la température actuelle du CMB ( $T_0 T \times R = T_0 \times R_0$ ), R le facteur d'échelle classique (parfois noté a aussi), k la courbure, la métrique de Robertson Walker, t la variable temporelle classique,  $H_{0,t}$  (58) la constante de Hubble,  $\Omega_{0,t}$  (59) le paramètre de densité de matière.

$$H_{0,t} = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dt} \Big|_{t=t_0} \quad (58)$$

$$\Omega_{0,t} = \frac{8\pi G \rho_0}{3H_{0,t}^2} \quad (59)$$

- Troisièmement, le lien entre la variation d'entropie et le temps cosmique  $d\tau$  (voir 60):

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{dS_{horiz}/dt}{dS_{horiz}/dt|_{BB}} = 1 + R \left( \frac{1}{\Omega_{0,t}} - 1 \right) \quad (60)$$

Avec  $\frac{dS_{horiz}}{dt|_{BB}}$  pour la variation temporelle de l'entropie dans le volume causalement connecté au BigBang (le temps de coordonnées  $t(s)$  qui s'écoule à vitesse constante est égal au temps  $\tau$  cosmologique au Big Bang dont l'unité est la longueur variable).

- Quatrièmement, la courbure de l'espace qui est liée à l'interaction de variation d'entropie, elle-même liée au temps et à la température:

Si  $\frac{d\tau}{dt} = 1$  pour un univers plat ( $\Omega_{0,t} = 1$ ) le temps cosmologique s'écoule à un taux constant. Ce n'est pas le cas dans l'espace courbe que nous avons (61).

$$\Omega_{0,\tau} = \frac{1}{\Omega_{0,t}} \quad (61)$$

Et la courbure  $k$  est pour  $R_0 = 1$  donnée dans (62):

$$k = \frac{H_{0,t}^2(\Omega_{0,t}-1)}{c^2} \quad (62)$$

En conclusion de cet état de l'art, on trouve avec [31] et [32], équation par équation, un lien direct entre la température, l'évolution de l'entropie  $S$ , l'évolution du temps  $t$  et les courbures  $k$  associées de l'univers. Nous nous concentrerons dans les paragraphes suivants sur ce lien direct entre température et temps via un coefficient de dilatation thermique équivalent du temps pour être en ligne avec notre analogie mécanique de l'espace-temps. Bien entendu, en se basant sur [27] [29] [31] et [32] ce lien entre temps et température passe en relativité générale par la notion d'espace-temps associé cette fois à la courbure du temps mais aussi de l'espace associé donc à un effet de température. Cela va donc quelque part dans le sens d'une confirmation de notre idée initiale d'une constante cosmologique liée à la courbure thermique de l'espace.

### 8.3 Généralisation de l'intervalle de relativité restreinte en tenant compte de la température

En se basant sur les paragraphes précédents et la formule (48) ou (55), cela nous invite à aller plus loin et à postuler une réécriture de l'intervalle  $ds^2$  de relativité restreinte pour introduire un effet thermique mécanique qui donne l'équation (63) avec un coefficient de dilatation potentiel du temps  $\alpha_t$  et un coefficient de dilatation potentielle de l'espace supposé homogène  $\alpha_s$  :

$$d_s^2 = c^2(dt \pm \alpha_t T dt)^2 - (dx \pm \alpha_s T dx)^2 - (dy \pm \alpha_s T dy)^2 - (dz \pm \alpha_s T dz)^2 \quad (63)$$

Nous postulons que:

$\alpha_s$  est relié à la constante cosmologique  $\Lambda$  de l'espace par l'expression  $\alpha_s = \frac{l_p \sqrt{\Lambda}}{\Delta T}$ .

$\alpha_t$  est relié à la mécanique quantique et à la thermodynamique et au temps suivant [27] et [29] par l'expression  $\alpha_t \approx \frac{k_B t}{nh}$ .

En effet, étant donné le caractère particulier et le caractère inconnu du temps, il n'y a aucune raison en première approche qu'un coefficient de dilatation du temps soit identique à celui de l'espace.

Ainsi l'Expression (63) devient expression (64) si l'on sépare la partie spatiale de la partie temps soit :

$$d_s^2 = (1 \pm \alpha_t T)^2 c^2 dt^2 - (1 \pm \alpha_s T)^2 [dx^2 + dy^2 + dz^2] \quad (64)$$

Quelques points importants découlent de cette expression.

- a) Les deux quantités de l'équation (64) ci-dessus ont un signe opposé donc un effet contradictoire potentiel,
- b) Selon la théorie du Big Bang, l'espace et le temps sont créés en même temps. Selon la relativité générale, nous arrivons à une singularité au début de l'univers où l'énergie (et donc la masse associée) est infiniment grande et donc la courbure est infiniment grande dans un volume infiniment petit qui nécessite l'introduction de la mécanique quantique et donc la création d'une théorie de la gravité quantique. Mais nous oublions aussi souvent, à ce moment dans l'univers la température est également infinie et constitue donc dès le début une variable du problème influençant potentiellement l'espace-temps, donc l'espace et le temps dans notre modèle cosmique de tissu sont influencés par la température. Il est donc logique pour nous de l'introduire dans la formule d'intervalle,
- c) Bien sûr, s'il n'y a pas d'effet thermique, l'intervalle revient à l'intervalle classique en relativité spatiale.

#### *8.4 La courbure, le temps et la température peuvent-ils être liés en relativité générale ?*

La théorie de la relativité générale dans sa version actuelle ne prend pas directement en compte un effet de ralentissement du temps dû à la chaleur ou à la température, ni ne propose spécifiquement une « courbure thermique du temps ». C'est ce que nous déduisons de nos précédentes réflexions au chapitre 8.3 basées sur [29] à [32]. En effet, à partir de (64) nous avons plutôt un simple effet de dilatation et non un effet de courbure dans potentiellement toutes les directions.

Cependant, dans certaines circonstances, la chaleur peut indirectement avoir un effet sur le temps en modifiant la courbure de l'espace-temps. Par exemple, dans les objets astrophysiques très massifs et chauds, comme les étoiles à neutrons ou les trous noirs, les effets de la chaleur et de la pression peuvent influencer la courbure de l'espace-temps et donc les trajectoires des objets en mouvement mais aussi le temps (le temps et l'espace deviennent comme inversés) (voir [28]). La température de Hawking du trou noir, qui est la première équation de gravité quantique dépendant de  $c$ ,  $h$ ,  $k_B$  et  $G$  et  $M$  la masse du trou noir, va dans ce sens.

Il existe également des concepts connexes en physique théorique, tels que la théorie des cordes et la gravité quantique, qui tentent d'unifier la relativité générale avec la mécanique quantique. Dans ces théories, il est possible que les phénomènes liés à la température puissent avoir des implications sur la nature de l'espace-temps, mais cela reste un domaine de recherche en cours et les détails exacts ne sont pas encore bien établis.

Ainsi, en se basant sur (64) pour la nouvelle définition de l'intervalle, en tenant compte de [27] « Time & clocks: A thermodynamic approach » et de [29] « Time and Thermodynamics Extended Discussion on \Time & clocks: A thermodynamic approach » pour la variation temporelle en fonction de la température et du coefficient d'expansion temporelle associé  $\alpha_t$ , de l'équation (37) pour la relation entre la constante cosmologique  $\Lambda$  et le coefficient d'expansion de l'espace  $\alpha_s$ , de [12] pour la structure en feuilles minces d'épaisseur  $l_p$ , de [31] et [32] pour la relation entre la température, la variation temporelle, la variation entropique liée à l'expansion de l'univers et la courbure associée, on a donc la modification suivante de l'équation d'Einstein (17) exprimée en termes de courbure mécanique :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - \left(\frac{\alpha_f T}{l_p}\right)^2 g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (65)$$

Ainsi la constante cosmologique  $\Lambda$  introduite par Einstein, considérée comme potentiellement la source de l'énergie noire, devient dans notre article une courbure thermique additionnelle  $\left(\frac{\alpha_f T}{l_p}\right)^2$ , connectée pour l'espace et le temps à deux paramètres mécaniques complémentaires liés au tissu espace-temps, à savoir son coefficient de dilatation thermique de l'espace ( $f=s$ )  $\rightarrow \alpha_s$  et son coefficient de dilatation thermique du temps ( $f=t$ )  $\rightarrow \alpha_t$  ainsi qu'à la texture en sandwich de celui-ci (multicouche d'épaisseur  $l_p$ ) le tout dépendant de la température  $T(\rightarrow \Delta T)$  agissant en lien avec la variation d'entropie au cours de l'évolution temporelle de l'univers [31].

### Remarque 1

Nous ne sommes pas certains aujourd'hui que l'énergie noire traduite dans notre modèle élastique sous forme de courbure thermique doit être strictement constante ou non.

Ainsi, dans l'équation d'Einstein, la constante cosmologique est constante, mais dans notre approche, elle peut potentiellement varier en fonction de la température ou du gradient de température.

### **Remarque 2**

Le coefficient de dilatation thermique du temps dépend de  $t$  si nous partons des approches de [27] et [29].

### *8.5 Synthèse sur l'approche spatio-temporelle pour considérer la température sur la courbure du tissu spatio-temporel*

Tout d'abord nous rappelons notre hypothèse issue de l'analyse des ondes gravitationnelles. Les déformations de l'espace semblent découplées entre les déformations transversales dans les plans ( $xy$ ) et la distance  $z$  de propagation des ondes. Ainsi ( $ct$  et  $z$ ) agissent au même niveau (dans le même sens) dans une jauge TT dans l'expression des déformations des ondes gravitationnelles. Ce qui conduit T. Tenev et M.Horstemeyer a supposé l'espace constitué de fines feuilles épaisses de Planck. Je cite [12].

« L'épaisseur doit être très faible pour que le tissu puisse se comporter comme un objet essentiellement 3D à des échelles de longueur ordinaires et être une analogie appropriée de l'espace physique 3D. L'épaisseur elle-même définit une échelle de longueur microscopique à laquelle le comportement du monde physique devrait différer considérablement de notre expérience ordinaire. Une valeur égale ou comparable à la longueur  $l_p$  de Planck répond à ce critère. Cependant, la valeur exacte de l'épaisseur n'est pas essentielle au modèle tant qu'elle est petite, mais pas de manière insignifiante».

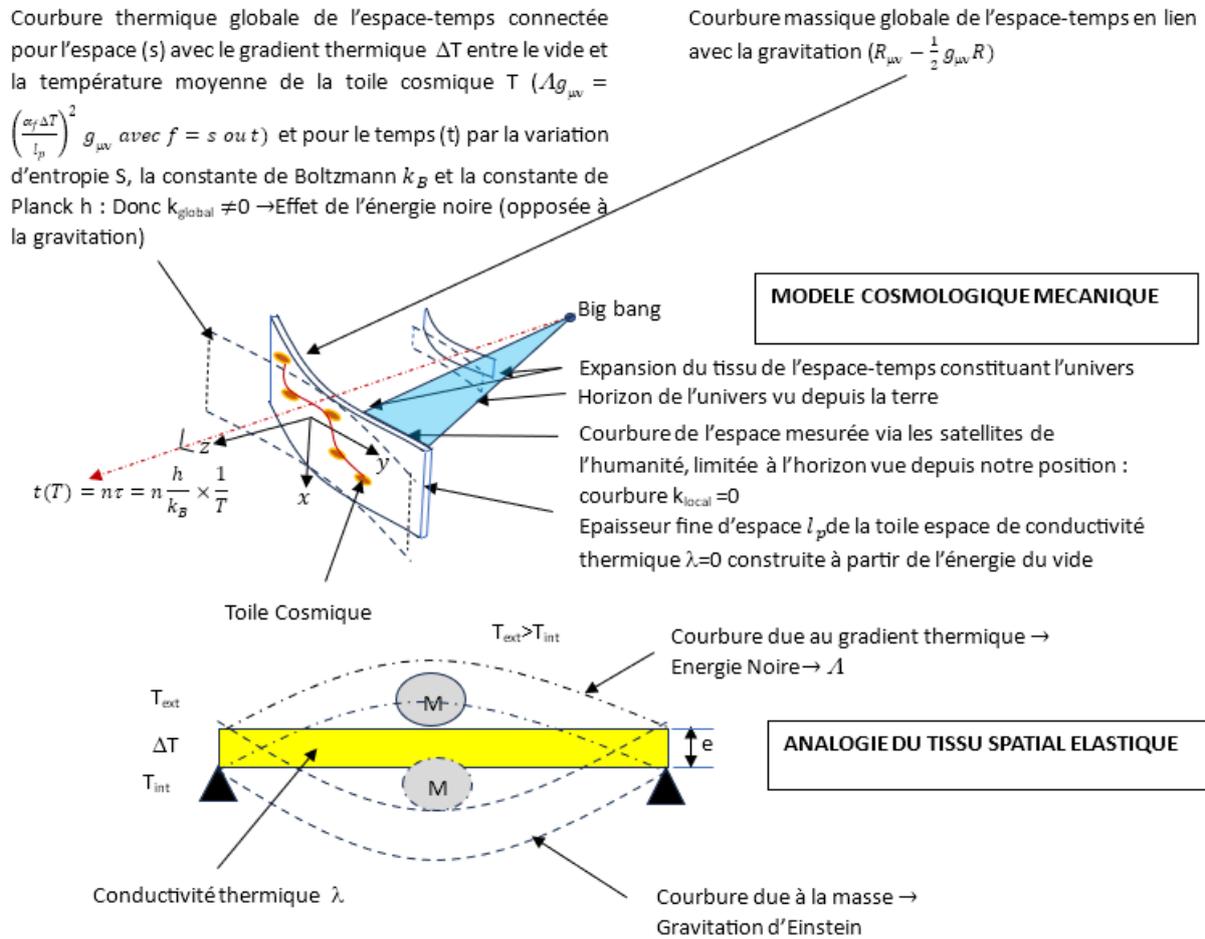
Nous nous plaçons à distance de la toile cosmique de manière à considérer sur une feuille d'espace donnée une température moyenne constante appliquée à ladite feuille (il faut en effet dissocier l'effet thermique quantique, local et global associé au facteur d'échelle, grande courbure thermique de l'espace) ce qui nous permet de nous prémunir contre les inévitables variations thermiques à plus petite échelle associées à la toile cosmique.

Ces deux postulats en place, nous avons:

Un premier effet associé à notre coefficient de dilatation thermique de l'espace qui implique une dilatation thermique de l'espace dans le plan  $xy$ (voir figure 4). La courbure de l'espace  $k$  étant quasi nulle, elle nous apparaît comme une feuille qui se dilate en partie à cause de la température moyenne de la toile cosmique.

Un second effet associé à notre coefficient de dilatation thermique temporelle implique cette fois une courbure thermique suivante liée cette fois entre la différence de température entre deux couches de l'espace d'épaisseur de Planck suivant la direction  $z$ .

La figure 4 ci-dessous donne une idée des concepts développés dans cet article.



**Figure 4: Vue d'ensemble des principes et concepts développés dans cet article (courbure thermique de l'espace-temps connecté à  $\Lambda$ , temps, variation d'entropie et température) -**

Ainsi, dans notre modèle illustré à la figure 4 d'une manière proche de [31]:

- 1) L'espace-temps s'étend à mesure que le temps progresse à chaque instant depuis le Big bang,
- 2) Le moteur du temps, le fait que chaque moment présent se renouvelle indéfiniment est corrélé avec la variation d'entropie qui ne peut qu'augmenter avec le temps:  $t = \frac{S}{\dot{S}}$ ,
- 3) La fonction temporelle de température car liée à la variation d'entropie elle-même est quantifiée par:  $t(T) = n\tau = n \frac{h}{k_B} \times \frac{1}{T}$ ,
- 4) L'entropie  $S$  est liée à un effet de température par la constante de Boltzmann et par  $\Omega$  différents micro-états par :  $(S = k_B \log \Omega)$ ,

- 5) L'espace se dilate et via l'intervalles  $ds^2$  non seulement en présence de masse (par relativité générale) mais aussi en fonction de la température ou du delta de température (apport de l'analogie de la relativité générale avec la théorie de l'élasticité) que nous proposons de corrélérer avec la constante cosmologique  $\Lambda$  comme courbure thermique des feuilles d'espace quantique d'épaisseur  $l_p$ ,
- 6) Par la relativité générale, non seulement l'espace est courbé, mais l'espace-temps l'est aussi, donc voir ce qui précède le temps ( $\times c$ ) se dilate et se courbe par l'effet de la variation de l'entropie elle-même liée à une évolution de la température [27], [29], [31].
- 7) La courbure de l'espace-temps due à la masse s'oppose à la courbure de l'espace-temps due à la température à savoir la contribution de courbure qui est identifiée par la constante cosmologique  $\Lambda$ .

## 9. Présentation des conséquences possibles de ce modèle concernant l'interprétation de l'énergie noire

Les publications de [19] et [20] en particulier et de bien d'autres semblent indiquer que la source d'énergie noire d'expansion de l'univers est reliée à la constante cosmologique en particulier lorsque celle-ci est positionnée à droite des équations (15) et (16). On s'intéresse à cet article à une constante cosmologique placée à gauche de l'équation (17) c'est-à-dire à une courbure supplémentaire présente dans tout espace-temps. Cette approche plus mécanistique permet de ne plus avoir recours à une énergie d'origine inconnue et se rapproche plus d'un fonctionnement de l'univers en tant que structure « chargée » en son sein par la toile cosmique et subissant le gradient thermique de celle-ci.

Mais cette approche soulève d'autres questions (quel gradient thermique considéré? l'espace a-t-il vraiment une structure de feuilles se déformant les unes par rapport aux autres comme les déformations associées aux polarisations  $A^+$  et  $A^\times$  que semblent suggérer les ondes gravitationnelles? Quelle est l'épaisseur réelle de ces feuilles ? comment intégrer l'anisotropie de l'espace suggérée par un coefficient de Poisson de 1 ? L'approche de la théorie quantique des champs semble plus cohérente car elle conduit à un coefficient de dilatation thermique compatible avec les matériaux sur Terre, néanmoins la différence avec la valeur astrophysique de la constante cosmologique soulève une vraie question fondamentale. De plus les valeurs des modules d'Young que nous avons rappelées au début de l'article d'une part et les densités d'énergie du vide d'autre part étant tellement en dehors des valeurs habituelles des matériaux élastiques sur Terre qu'il convient d'être particulièrement prudent par rapport à cette valeur « quasi-normale » du coefficient de dilatation thermique que nous proposons dans cette étude.

Une autre conséquence de notre étude est que, étant donné que la relativité générale s'applique à l'espace-temps, l'introduction d'un lien entre la constante cosmologique et un effet de température implique que la température influence également le temps.

On a donc en interprétant l'expression (64), à droite une partie spatiale qui ne varie qu'en fonction de la température  $T$  et du coefficient de dilatation thermique spatiale  $\alpha_s$  qui est aujourd'hui celui du vide (froid) en interaction avec la température de la toile cosmique (chaude) qui crée le gradient thermique et la courbure (donc plutôt stable au jour en moyenne), alors que la partie gauche liée au temps et au coefficient de dilatation thermique temporel  $\alpha_t$  qui n'a fait qu'augmenter depuis le Big Bang. Ainsi le terme de courbure en (65)  $-(\alpha_f T/l_p)^2$  représente la courbure thermique qui s'oppose à la courbure gravitationnelle due à la masse.

La partie de la courbure thermique associée au temps pourrait avoir un effet apparent d'accélération de l'expansion de l'espace. Dans (65) la courbure temporelle globale de l'espace thermiquement affecté est donc dans notre modèle dans la direction opposée de la courbure de masse pour jouer le rôle d'énergie noire.

La température de la toile cosmique reflétait également une expansion de l'espace dans son plan  $xy$  (voir Figure 4) avec ( $k$  apparent = 0).

Ainsi, notre approche est similaire à [31] mais en utilisant un formalisme mécanique basé sur le coefficient de dilatation thermique du tissu spatio-temporel.

Suite à notre réflexion, nous pourrions avoir une courbure générale de l'espace-temps liée à la température qui se décompose en 2 parties. Une première spatiale due à un gradient thermique appliqué aux fines feuilles de tissu spatial qui pourrait être lié à la constante cosmologique  $\Lambda$  (expansion de l'univers et courbure positive  $k$ ). Une seconde résultant d'un effet temps/entropie/température. Les deux créant une courbure thermique négative totale  $k$  opposée à la courbure liée à la masse et donc à la gravitation.

#### 10. Comment vérifier cet effet de la température sur le temps

Mesurer la variation du temps en fonction de la température sur les horloges atomiques est un bon moyen de tester les idées de cet article.

L'idée est de mettre deux horloges atomiques strictement identiques dans les mêmes conditions de hauteur dans le champ de gravité terrestre et de faire varier la température de l'une d'entre elles afin de mesurer le décalage temporel possible par rapport à la restante. à la température initiale.

## 11. Conclusions

Nous explorons dans cette étude l'analogie de l'espace en tant que milieu élastique en nous concentrant sur les paramètres mécaniques associés à tout tissu élastique quadridimensionnel, ses coefficients de dilatation thermique  $\alpha_S$  pour l'espace et  $\alpha_t$  pour le temps. L'état de l'art est plutôt faible voire inexistant sur leur définitions et leur intensités dans le cadre d'un modèle élastique de l'espace. Certaines recherches existent pour la fonction de dilatation temporelle de la température. En s'inspirant de modèles de tissu spatial sous forme de feuilles minces, en nous plaçant dans le cadre de la théorie quantique des champs tant sur la valeur de la constante cosmologique  $\Lambda$  que sur l'épaisseur de ces feuilles de l'ordre de la longueur de Planck, en considérant les mesures récentes permettant d'établir les ordres de grandeur du gradient thermique spatial entre les zones chaudes et froides de l'univers et enfin en considérant que ces feuilles se courbent sous ce gradient thermique par analogie avec les plaques mécaniques, nous proposons une formulation et une valeur des coefficients de dilatation du tissu spatial.

Puisque la relativité générale est construite sur l'espace-temps, cette approche de courbure thermique implique que non seulement l'espace mais aussi le temps pourraient varier en fonction de la température. Nous proposons donc ainsi une expression du coefficient d'expansion temporelle  $\alpha_t$  basée sur le rapport entre la constante de Boltzmann et la constante de Planck en liaison avec une variation d'entropie de l'univers et donc sa température. Puisque la relativité générale est elle-même basée sur la relativité restreinte, il en résulte la nécessité de prendre en compte les variations de distance et de temps en fonction de la température. Nous proposons donc un moyen de modifier la définition de l'invariant de l'espace-temps  $ds^2$  en introduisant à la fois un coefficient d'espace-temps et un coefficient d'expansion temporelle.

Lorsque l'on reprend l'analogie simpliste citée au début du tissu tendu supportant une balle lourde, il apparaît en effet logique que le tissu supportant cette boule s'allonge plus ou moins en fonction de sa température en plus de la souplesse spécifique à l'espace et à la masse/énergie qui le déforme.

Ainsi, la gravitation influence l'espace et le temps mais serait également liée à la température. La température influencerait la courbure de l'espace-temps à l'échelle quantique (nature possible du coefficient d'expansion temporelle) et à grande échelle (effet

de la constante cosmologique possible en lien avec la toile cosmique). La réponse dans notre analogie du milieu élastique serait de deux types. Une première sur un allongement et un raccourcissement de l'espace-temps, une seconde sur une courbure thermique de l'espace-temps reliée à l'énergie noire.

Cette étude reste une première approche qui éclaircit en quelque sorte cette voie étant donné la grande variabilité de l'intensité de la constante cosmologique selon que l'on considère sa valeur à partir de la théorie quantique des champs ou sa valeur à partir de mesures cosmologiques. D'autres modélisations sont certainement nécessaires pour affiner la valeur de ces coefficients de dilatation thermique du tissu espace-temps et cette étude ne reste qu'une première approche.

Einstein a dit que Dieu ne joue pas aux dés quand il parle de mécanique quantique, mais peut-être que Dieu joue à l'ingénieur structurel avec une structure cosmique sollicitée par un gradient thermique se manifestant en une énergie noire agissant dans tout l'univers – du moins c'est la question que pose cet article.

## Remerciements

Merci enfin au regretté R Grégoire, un grand mécanicien, qui à travers son enseignement basé sur la recherche du « comment ça marche » m'a guidé dans ma réflexion.

Nous remercions chaleureusement le relecteur pour toutes ses suggestions et corrections, en particulier sur la nécessité de répartir cet effet thermique à la fois spatialement et temporellement.

## Références

- [1] F.W. Dyson, A. S. Eddington and C. Davidson, *Phil. Trans. Of. The. R. Soc. Lond.* **220** 291 (1929)
- [2] C.W. F. Everitt, *Phys. Rev. Let.* **106** (2011) 221101
- [3] Collective and al, *Phys. Rev. Let.* **116** (2016) 061102
- [4] Collective and al, *Phys. Rev. Let.* **119** (2017) 161101
- [5] A. D. Sakharov, *Sov. Phys. Dokl.* **12** (1968) 1040
- [6] J. L. Synge, *Math. sch. of. phy. sc.* **72** (1959) 82
- [7] C. B. Rayner and R. Proc, *Soc. A. Math. Phys. And. Eng.* **272** (1963) 44
- [8] R. Grot and A. Eringen, *Int. J. Eng. Sc.* **2** (1966) 1
- [9] V. V. Vasiliev and L. V. Fedorov, *Mech. of. Sol.* **53** (2018) 256
- [10] V.V. Vasilev and L.V. Fedorov, *Mech. of. Sol.* **56** (2021) 404
- [11] J. D. Brown, *Class. And. Quan. Grav.* **38** (2021) 085017

- [12] T. G. Tenev and M. F. Horstemeyer, *Int. J. Of. Mod. Phy. D* **27** (2018) 1850083
- [13] P. A. Millette, *Elastodynamic of the space time continuum* (NewMexico, USA, STCED, American, Research, Press, NewYork, 2019)
- [14] M. Beau, *On the acceleration of the expansion of a cosmological medium* (Boston, US, Univ, Massachusetts, Boston, 2018)
- [15] K. McDonald, *What is the Stiffness of Spacetime* (Princeton, J, Henry, Lab, Princ, Univ, 2018)
- [16] D. Izabel, *Pram. J. Of. Phys.* **94** (2020) 119
- [17] A. C. Melissinos, *Upper limit on the Stiffness of space-time* (Rochester, Dept, Phys, Astro, Univ, Rochester, 2018)
- [18] S. R. Wang, *Estimation of spacetime stiffness based on LIGO observations* (Taiwan, ,Keelung, univ, 2003)
- [19] P. J. E. Peebles and B. Ratra, *Rev.of. Mod. Phys.* **75** (2003) 559
- [20] E. Santos, *Astr. Sp. Sc.* **332** (2011) 423
- [21] C. F. Gauss, *Disquisitiones generales circa superficies curvas* (Gottingen, Societate, Regiae, Oblatae, D, Gottingae, 1828)
- [22] H. A. Perko, *J. Phy. Conf. series.* **1956** (2021) 1
- [23] Collectif and al, *Astron. And. Astrop. Rev.* **571** (2014) 1
- [24] D. Izabel, *What is space time made of?* ( Paris, Edp, sciences, 2021)
- [25] S. Timoshenko and J.N. Goodier, *Theory of elasticity* (NewYork, McGraw, Hill, 1951)
- [26] Y. K. Chiang, R. Makiya, B. Ménard and E. Komatsu, *Astr. J.* **902** (2020) 56
- [27] U. Lucia, G. Grisolia, *Results. in. Physics.***16** (2020) 102977
- [28] H.Hadi, K.Atazadeh, F.Darabi, *Physics. Letters. B.* **834** (2022) 137471
- [29] A. Chatterjee,G. Iannacchione, *arXiv:2007.09398v1* **1** (2020) 1
- [30] T.Tenev, *thesis An elastic constitutive model of spacetime and its applications* (Mississippi State, Mississippi, univ 2018)
- [31] C. Hauret, P. Magain, and J. Biernaux,*MDPI. Entropy.* **19** (2017) 357
- [32] CHAS. A. Eganc, H. Lineweaver, *Astr. J.* **710** (2010) 1825–1834