

LA COSMOLOGIE THERMODYNAMIQUE $R_h = ct$

Une introduction pédagogique et non relativiste à l'Univers linéaire

« Une théorie est d'autant plus impressionnante que ses prémisses sont simples, qu'elle relie des choses diverses et que son champ d'application est vaste. C'est pourquoi la thermodynamique classique m'a profondément marqué. C'est la seule théorie physique à portée universelle dont je suis convaincu qu'elle ne sera jamais renversée, dans le cadre de l'applicabilité de ses concepts fondamentaux. »

Albert Einstein

CHAPITRE 1 — Pourquoi une cosmologie thermodynamique ?

- 1.1. La question fondamentale
- 1.2. Le principe : une cosmologie linéaire
- 1.3. Pourquoi la thermodynamique est le langage naturel de l'Univers
- 1.4. Le rôle de Haug et Tatum
- 1.5. Pourquoi une cosmologie thermodynamique est nécessaire
- 1.6. Objectifs du livret

CHAPITRE 2 — Les constantes fondamentales et les unités de Planck

- 2.1. Pourquoi les constantes fondamentales sont essentielles
- 2.2. Les trois constantes fondamentales
- 2.3. Les unités de Planck
- 2.4. Pourquoi les unités de Planck sont essentielles

CHAPITRE 3 — Le rayon de Hubble et la cosmologie linéaire

- 3.1. Une définition thermodynamique du rayon de Hubble
- 3.2. Pourquoi $R_h = ct$ est inévitable
- 3.3. Le paramètre de Hubble
- 3.4. Un Univers autosimilaire

CHAPITRE 4 — Température, énergie et densité dans un Univers $R_h = ct$

- 4.1. Introduction
- 4.2. La densité énergétique : loi de Stefan–Boltzmann
- 4.3. Évolution de la densité énergétique
- 4.4. Évolution de la température
- 4.5. Température en fonction du rayon de Hubble

CHAPITRE 5 — Le lien Planck ↔ Hubble : une relation d'échelle fondamentale

- 5.1. Introduction
- 5.2. Les deux extrêmes de l'Univers
- 5.3. Une relation d'échelle universelle
- 5.4. Interprétation thermodynamique

CHAPITRE 6 — Température d’horizon et structure thermique de l’Univers

6.1. Introduction

6.2. Pourquoi un horizon possède une température ?

6.3. Relation entre R_h et T

CHAPITRE 7 — Conséquences observationnelles du modèle

7.1. Introduction

7.2. Homogénéité du CMB

7.3. La relation $R_h = ct$

CHAPITRE 8 — Interprétation physique : un Univers autosimilaire

8.1. Introduction

8.2. Autosimilarité des grandeurs thermodynamiques

CHAPITRE 9 — Synthèse générale

9.1. Ce que nous avons vu

9.2. Une nouvelle manière de penser la cosmologie

GLOSSAIRE

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

ANNEXE : Autosimilarité dans l’Univers ($R_h = ct$)

Préface

Depuis un siècle, la cosmologie a été dominée par une approche géométrique héritée de la relativité générale. Cette vision a permis des avancées majeures, mais elle laisse ouvertes plusieurs questions fondamentales : pourquoi l’Univers possède-t-il la température que nous observons aujourd’hui ? Pourquoi la densité énergétique suit-elle des lois simples ? Pourquoi les grandeurs cosmologiques semblent-elles liées aux échelles de Planck ?

Ces questions ne sont pas géométriques. Elles sont thermodynamiques.

Ce livret propose une approche alternative, fondée exclusivement sur :

- la causalité,
- la thermodynamique,
- les échelles de Planck,
- la mécanique classique,
- les arguments dimensionnels.

Aucune équation de champ, aucune métrique, aucune courbure n’est utilisée. L’objectif est de montrer que l’Univers peut être décrit comme un système thermodynamique autosimilaire, et que la relation simple :

$$R_H = c \cdot t$$

suffit à reconstruire une cosmologie complète, cohérente et prédictive. Le modèle ne prétend pas remplacer la relativité générale, mais proposer une description thermodynamique complémentaire, valide à grande échelle.

CHAPITRE 1 — Pourquoi une cosmologie thermodynamique ?

1.1. La question fondamentale

La cosmologie traditionnelle décrit l’Univers comme un espace qui se dilate, se courbe et se déforme. Cette approche géométrique, bien que puissante, ne répond pas à plusieurs questions essentielles :

- Pourquoi l’Univers possède-t-il une température mesurable ?
- Pourquoi la densité énergétique suit-elle des lois thermiques simples ?
- Pourquoi la constante de Hubble semble-t-elle liée à des échelles quantiques ?
- Pourquoi les grandeurs cosmologiques et les grandeurs de Planck se répondent-elles ?

Ces questions relèvent de la thermodynamique, non de la géométrie.

1.2. Le principe $R_H = c \cdot t$: une cosmologie linéaire

Le modèle repose sur une relation simple :

$$R_H = \frac{c}{H} = c \cdot t$$

où R_H est le rayon de Hubble, H le paramètre de Hubble et t l’âge cosmique. Cette relation exprime que l’horizon causal croît linéairement avec le temps : l’Univers observable s’étend à la vitesse de la lumière en termes d’information.

1.3. Pourquoi la thermodynamique est le langage naturel de l’Univers

L’Univers possède :

- une température mesurable (CMB),
- une densité énergétique régie par la loi de Stefan–Boltzmann,
- un horizon doté d’une entropie et d’une température,
- une échelle microscopique définie par les unités de Planck.

Ces propriétés sont thermodynamiques.

1.4. Le rôle de Haug et Tatum

Ils convergent vers une vision commune :

- **Haug** relie les échelles de Planck aux échelles cosmologiques.

- **Tatum** développe une cosmologie $R_H = c \cdot t$ fondée sur l'énergie et la thermodynamique.

1.5. Pourquoi une cosmologie thermodynamique est nécessaire

Les tensions observationnelles actuelles (notamment la *Hubble tension*) suggèrent que le modèle Λ CDM n'est peut-être pas complet. Une approche thermodynamique :

- relie naturellement la température cosmique au rayon de Hubble,
- explique pourquoi $H = \frac{1}{t}$ est stable,
- donne une interprétation physique aux horizons,
- prédit la température du CMB sans ajustement.

1.6. Objectifs du livret

Ce livret vise à :

- présenter $R_H = c \cdot t$ comme une cosmologie thermodynamique,
 - montrer comment les échelles de Planck déterminent les grandeurs cosmologiques,
 - démontrer la température du CMB sans relativité générale,
 - construire une cosmologie complète fondée sur la thermodynamique.
-

CHAPITRE 2 — Les constantes fondamentales et les unités de Planck

2.1. Pourquoi les constantes fondamentales sont essentielles

La cosmologie thermodynamique repose sur trois constantes universelles :

- c : vitesse limite de propagation de l'information,
- \hbar : granularité quantique de l'action,
- k_B : lien entre énergie microscopique et température.

Ces trois constantes suffisent à définir les unités de Planck.

2.2. Les trois constantes fondamentales

- **Vitesse de la lumière (c)** : fixe la vitesse maximale des interactions.
- **Constante de Planck réduite (\hbar)** : impose une granularité à l'énergie et à l'action.
- **Constante de Boltzmann (k_B)** : relie énergie microscopique et température macroscopique.

2.3. Les unités de Planck

- **Longueur de Planck :**

$$\ell_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1,616 \times 10^{-35} \text{m}$$

- **Temps de Planck :**

$$t_p = \frac{\ell_p}{c} \approx 5,391 \times 10^{-44} \text{s}$$

- **Masse de Planck :**

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2,17 \times 10^{-8} \text{kg}$$

- **Température de Planck :**

$$T_p = \frac{m_p c^2}{k_B} \approx 1,417 \times 10^{32} \text{K}$$

2.4. Pourquoi les unités de Planck sont essentielles

Le rapport :

$$\frac{R_H}{\ell_p} \sim 10^{61}$$

encode la structure énergétique de l'Univers.

CHAPITRE 3 — Le rayon de Hubble et la cosmologie linéaire $R_H = c \cdot t$

3.1. Une définition thermodynamique du rayon de Hubble

Le rayon de Hubble est la distance maximale à laquelle une information peut nous parvenir depuis l'origine du temps cosmique :

$$R_H = c \cdot t$$

3.2. Pourquoi $R_H = c \cdot t$ est inévitable

Dans tout système physique :

- l'information se propage à vitesse finie,
- l'énergie se diffuse à vitesse finie.

Ainsi, aucune interaction ne peut influencer une région située à plus de $c \cdot t$.

3.3. Le paramètre de Hubble

En combinant :

$$R_H = \frac{c}{H} \text{ et } R_H = c \cdot t$$

on obtient :

$$H = \frac{1}{t}$$

3.4. Un Univers autosimilaire

La linéarité implique :

- $R_H \propto t$,
- $\rho \propto t^{-2}$,
- $T \propto t^{-1/2}$.

Le symbole \propto signifie « est proportionnel à »

CHAPITRE 4 — Température, énergie et densité dans un Univers $R_H = c \cdot t$

4.1. Introduction

Dans un Univers linéaire :

$$R_H = c \cdot t$$

4.2. La densité énergétique : loi de Stefan–Boltzmann

$$\rho = a \cdot T^4$$

avec :

$$a = \frac{\pi^2 k_B^4}{15 \hbar^3 c^3}$$

4.3. Évolution de la densité énergétique

Le volume causal :

$$V = \frac{4\pi}{3} c^3 t^3$$

et les arguments énergétiques conduisent à :

$$\rho(t) = \frac{K_\rho}{t^2}$$

où K_ρ est une constante

4.4. Évolution de la température

En combinant :

$$\rho = a T^4 \text{ et } \rho \propto t^{-2}$$

on obtient :

$$T(t) = \frac{A}{\sqrt{t}}$$

4.5. Température en fonction du rayon de Hubble

Comme $R_H = c \cdot t$:

$$T(R_H) = A \sqrt{\frac{c}{R_H}}$$

CHAPITRE 5 — Le lien Planck ↔ Hubble : une relation d'échelle fondamentale

5.1. Introduction

L'Univers possède deux échelles naturelles :

- l'échelle **microscopique** (unité de Planck),
- l'échelle **macroscopique** (rayon de Hubble).

5.2. Les deux extrêmes de l'Univers

- **Échelle de Planck** : $\ell_p \approx 1.616 \times 10^{-35}$ m
- **Échelle de Hubble** : $R_H \approx 1.3 \times 10^{26}$ m

5.3. Une relation d'échelle universelle

Le rapport :

$$\frac{R_H}{\ell_p} \approx 8 \times 10^{60} \sim 10^{61}$$

5.4. Interprétation thermodynamique

Ce rapport relie :

- la température cosmique actuelle,
- la température de Planck,
- l'énergie contenue dans l'horizon causal.

CHAPITRE 6 — Température d'horizon et structure thermique de l'Univers

6.1. Introduction

Un horizon causal possède :

- une température,
- une entropie,
- un flux d'énergie.

6.2. Pourquoi un horizon possède une température ?

Un horizon causal est une frontière au-delà de laquelle aucune information ne peut être transmise. En thermodynamique, toute limite d'accès à l'information est associée à une température.

6.3. Relation entre T_p et T_{CMB}

En utilisant la loi de Stefan–Boltzmann et la relation d'échelle R_H/ℓ_p , on montre que :

$$T_{CMB} = \frac{T_p}{8\pi} \sqrt{\frac{2\ell_p}{R_H}} \approx 2,72 \text{ K}$$

voir :

- *Tatum, E. T., Seshavatharam, U. V. S., Lakshminarayana, S. The Basics of Flat Space Cosmology.* International Journal of Astronomy and Astrophysics, 2015.
-
- *Esben Gaarder Norwegian University of Life Sciences Haug, Stéphane Wojnow. How to predict the temperature of the CMB directly using the Hubble parameter and the Planck scale using the Stefan-Boltzman law.* 2023. [⟨hal-04269991⟩](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04269991)
- *Haug, E.G. CMB, Hawking, Planck, and Hubble Scale Relations Consistent with Recent Quantization of General Relativity Theory.* Int J Theor Phys **63**, 57 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10773-024-05570-6>

Planck scale using the Stefan-Boltzman law. 2023. [⟨hal-04269991⟩](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04269991)

La température d'horizon T_H joue un rôle central :

- elle fixe la température minimale accessible,
- elle impose une structure thermique à grande échelle.

CHAPITRE 7 — Conséquences observationnelles du modèle $R_H = c \cdot t$

7.1. Introduction

Le modèle $R_H = c \cdot t$ fait plusieurs prédictions robustes :

- absence de problème d'horizon,
- homogénéité naturelle du CMB,
- relation $H = \frac{1}{t}$,
- température du CMB prédite.

7.2. Homogénéité du CMB

Dans $R_H = c \cdot t$, toutes les régions observables ont été en contact causal.

7.3. La relation $H = \frac{1}{t}$

Cette relation est vérifiée par les observations actuelles par définition.

CHAPITRE 8 — Interprétation physique : un Univers autosimilaire

8.1. Introduction

La relation d'échelle :

$$\frac{R_H}{\ell_p} \sim 10^{61}$$

montre que l'Univers est un système autosimilaire.

8.2. Autosimilarité des grandeurs thermodynamiques

- $T \propto R_H^{-1/2}$
 - $\rho \propto R_H^{-2}$
 - $E \propto R_H$
-

CHAPITRE 9 — Synthèse générale

9.1. Ce que nous avons vu

1. L'Univers peut être décrit comme un système thermodynamique.
2. La relation $R_H = c \cdot t$ est une conséquence de la causalité.
3. La température du CMB est prédite : $T_{\text{CMB}} \approx 2.72 \text{ K}$.

9.2. Une nouvelle manière de penser la cosmologie

Cette approche :

- ne dépend d'aucune géométrie,
 - repose uniquement sur la thermodynamique,
 - relie microphysique et cosmologie.
-

GLOSSAIRE

Ce glossaire rassemble les notions essentielles utilisées dans ce livret. Chaque entrée est rédigée de manière concise et indépendante de toute relativité générale.

Autosimilarité

Propriété d'un système dont la structure reste identique lorsqu'on change d'échelle. Dans $R_H = ct$, l'Univers conserve la même structure thermodynamique à toutes les échelles de temps.

Comobile (observateur)

Un observateur **comobile** est un observateur qui se déplace avec l'expansion de l'Univers, sans vitesse propre par rapport au fluide cosmique. Dans $R_H = ct$, un observateur comobile :

- voit l'Univers évoluer de manière homogène,
- ressent une accélération effective liée à l'horizon causal,
- mesure la température cosmique et la température d'horizon.

Il constitue le référentiel naturel de la cosmologie thermodynamique.

Constante de Boltzmann (k_B)

Constante fondamentale reliant l'énergie microscopique à la température macroscopique. Elle permet de définir la température de Planck et intervient dans la loi de Stefan–Boltzmann.

Constante de Planck réduite (\hbar)

Constante quantique fondamentale définissant la granularité de l'action. Elle intervient dans la définition des unités de Planck et dans la température d'horizon.

Constante de radiation (a)

Constante reliant la densité énergétique d'un rayonnement thermique à sa température :

$$\rho = aT^4.$$

Avec :

$$a = \frac{8\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^3}$$

Densité énergétique (ρ)

Énergie contenue par unité de volume. Dans un Univers $R_H = ct$:

$$\rho \propto t^{-2}.$$

Échelle de Hubble

Échelle cosmologique définie par le rayon causal :

$$R_H = ct.$$

Elle représente la taille de l'Univers observable.

Échelle de Planck

Ensemble de grandeurs fondamentales définies à partir de c , \hbar et k_B . Elles représentent les limites quantiques de la physique.

Horizon causal

Frontière au-delà de laquelle aucune information ne peut être transmise. Dans $R_H = ct$:

$$R_H = ct.$$

Horizon thermique

Horizon causal doté d'une température effective, conséquence de la limitation d'accès à l'information. Sa température vaut :

$$T_H = \frac{T_p}{8\pi} \sqrt{\frac{2\ell_p}{R_H}}$$

Longueur de Planck (ℓ_p)

Plus petite longueur physique significative :

$$\ell_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}.$$

Masse de Planck (m_p)

Masse fondamentale définie par :

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}.$$

Paramètre de Hubble (H)

Taux d'expansion cosmique. Dans $R_H = ct$:

$$H = \frac{1}{t}.$$

Rayon de Hubble (R_H)

Distance maximale atteignable par l'information depuis l'origine du temps cosmique :

$$R_H = ct.$$

Température cosmique (T)

Température moyenne du rayonnement thermique de l'Univers. Dans $R_H = ct$:

$$T = \frac{T_p}{8\pi} \sqrt{\frac{2\ell_p}{R_H}}.$$

Température d'horizon (T_H)

Température associée à l'horizon causal :

$$T_H = \frac{T_p}{8\pi} \sqrt{\frac{2\ell_p}{R_H}}$$

Température de Planck (T_p)

Température maximale possible dans un système physique :

$$T_p = \frac{m_p c^2}{k_B}.$$

Temps de Planck (t_p)

Plus petit intervalle de temps significatif :

$$t_p = \frac{\ell_p}{c}.$$

Univers linéaire

Univers dont le rayon causal croît linéairement avec le temps :

$$R_H = ct.$$

Cette linéarité est la signature de la cosmologie $R_H = ct$.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

La bibliographie générale rassemble les références utilisées dans l'ensemble du livret. Elles sont classées par auteur pour faciliter la consultation.

Haug, E. G.

- *Quantum Cosmology: Cosmology Linked to the Planck Scale*. HAL Archives, 2021.
- *Unified Quantum Gravity Field Equation*. Physics Essays, 2022.
- *Planck Units Measured Independently of G*. Open Journal of Microphysics, 2022.
- *Finding the Planck Length Without G, c or \hbar* . Journal of Physics Communications, 2020.
- *Cosmological Scale Versus Planck Scale: As Above, So Below*. Physics Essays, 2022.
- *Esben Gaarder Norwegian University of Life Sciences Haug, Stéphane Wojnow. How to predict the temperature of the CMB directly using the Hubble parameter and the Planck scale using the Stefan-Boltzmann law*. 2023. (hal-04269991)
- *Haug, E.G. CMB, Hawking, Planck, and Hubble Scale Relations Consistent with Recent Quantization of General Relativity Theory*. *Int J Theor Phys* **63**, 57 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10773-024-05570-6>

Tatum, E. T., Seshavatharam, U. V. S., Lakshminarayana, S.

- *The Basics of Flat Space Cosmology*. International Journal of Astronomy and Astrophysics, 2015.
-

Planck, M.

- *Natürliche Massseinheiten*. Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, 1899.
-

Boltzmann, L.

- *Ableitung des Stefan'schen Gesetzes*. 1884.
 - *Lectures on Gas Theory*. 1896.
-

Stefan, J.

- *Über die Beziehung zwischen Wärmestrahlung und Temperatur*. 1879.
-

ANNEXE : Autosimilarité dans l'Univers (Rh = ct)

L'**autosimilarité** est une propriété fascinante qui signifie qu'un système (comme l'Univers, dans ce contexte) conserve la **même structure** à différentes échelles de temps ou d'espace.

Pour un système thermodynamique comme l'Univers, cela implique que les lois et les relations entre les grandeurs physiques (température, densité, énergie, etc.) restent **inchangées** lorsque l'on change d'échelle. Voici une explication détaillée et concrète, adaptée à ton modèle $R_h = ct$:

1. Définition de l'autosimilarité

Un système est **autosimilaire** si, en le "zoomant" ou en le "dézoomant" (c'est-à-dire en changeant d'échelle), sa structure ou ses propriétés restent identiques. Par exemple :

- Une **fractale** (comme un flocon de neige ou une côte maritime) a la même apparence, que vous la regardiez de près ou de loin.
 - Dans l'Univers, cela signifie que les **relations entre les grandeurs physiques** (comme la température, la densité d'énergie ou le rayon de Hubble) restent les mêmes à tout âge de l'Univers.
-

Dans ton modèle, l'autosimilarité se manifeste par le fait que **toutes les grandeurs thermodynamiques évoluent de manière cohérente et proportionnelle** avec le temps ou le rayon de Hubble. Voici comment :

a. Le rayon de Hubble (R_h)

- $R_h = c \times t$: Le rayon de Hubble croît linéairement avec le temps.
- Cela signifie que **la taille de l'Univers observable est toujours proportionnelle à son âge**. Peu importe à quel moment de l'histoire de l'Univers on se place, cette relation reste vraie.

b. Le paramètre de Hubble (H)

- $H = 1 / t$: Le paramètre de Hubble (qui mesure la vitesse d'expansion) est inversement proportionnel au temps.
- Si l'Univers a 1 milliard d'années, $H = 1/(1 \text{ milliard d'années})$. S'il a 10 milliards d'années, $H = 1/(10 \text{ milliards d'années})$. La relation reste la même, seule l'échelle change.

c. La température (T)

- $T \propto 1 / t^2$: La température de l'Univers diminue proportionnellement à l'inverse du temps.
- Si l'Univers était 100 fois plus jeune, sa température serait 10 fois plus élevée. La relation est toujours la même.

d. La densité d'énergie (ρ)

- $\rho \propto 1 / t^2$: La densité d'énergie diminue avec le carré du temps.

- Si l'Univers était 2 fois plus jeune, sa densité d'énergie serait 4 fois plus élevée. Là encore, la relation est conservée.
-

3. Exemple concret : le fond diffus cosmologique (CMB)

- Aujourd'hui, la température du CMB est de **2,7 K**, et le rayon de Hubble est d'environ **13,8 milliards d'années-lumière**.
- Il y a 10 milliards d'années, l'Univers était plus jeune et plus chaud. La température du CMB était plus élevée, mais la **relation entre T et Rh** était la même :
 - $T \times Rh^{-2} = \text{constante}$ (car $T \propto 1/Rh^2$).
- Cela montre que l'Univers "grandit" et "refroidit" de manière autosimilaire : sa structure thermique reste la même, seules les échelles changent.

4. Pourquoi l'autosimilarité est importante ?

- **Simplicité** : Elle permet de décrire l'Univers avec des lois **universelles et intemporelles**, sans avoir besoin de paramètres ajustables.
 - **Prédicibilité** : Si on connaît l'état de l'Univers à un instant donné, on peut prédire son état à n'importe quelle autre époque, simplement en changeant d'échelle.
 - **Lien micro-macro** : Elle relie les échelles de Planck (les plus petites) aux échelles cosmologiques (les plus grandes), en montrant que les mêmes lois s'appliquent partout.
-

5. Analogies pour visualiser l'autosimilarité

- **Un ballon qui gonfle** : Si on dessine des points sur un ballon et qu'on le gonfle, les distances entre les points augmentent, mais leur **répartition relative** reste la même. C'est une forme d'autosimilarité géométrique.
 - **Un feu de camp** : La chaleur ressentie à 1 mètre d'un feu est 4 fois moins intense qu'à 0,5 mètre (loi en $1/r^2$). La relation entre distance et chaleur est autosimilaire.
 - **Un cours d'eau** : Les tourbillons dans une rivière ont la même structure, qu'ils fassent 1 cm ou 1 mètre de diamètre.
-

6. Conséquences pour la cosmologie thermodynamique

Dans ton modèle $Rh = ct$, l'autosimilarité implique que :

- **L'Univers n'a pas besoin d'une "inflation"** (une phase d'expansion ultra-rapide) pour expliquer son homogénéité : sa structure est naturellement autosimilaire.
- **La température du CMB** est une conséquence directe de la relation $T \propto 1/Rh^2$, sans ajustement arbitraire.
- **Les lois de la thermodynamique** (comme la conservation de l'énergie et l'entropie) s'appliquent à toutes les échelles, des particules aux galaxies.

En résumé

L'autosimilarité de l'Univers signifie que :

"L'Univers est une version agrandie ou réduite de lui-même à différentes époques. Ses propriétés thermodynamiques (température, densité, énergie) évoluent de manière prévisible et proportionnelle, comme les notes d'une mélodie qui restent harmonieuses même si on change de tonalité."