

# Un nouveau modèle cosmologique : Inflation pilotée par le rayonnement avec des horizons causaux locaux et redistribution de l'énergie du décalage vers le rouge

Je propose un modèle cosmologique dans lequel l'époque de l'inflation est entraînée par la pression de rayonnement plutôt que par un champ scalaire d'inflaton. À partir d'une expansion linéaire à l'époque de Planck, l'univers passe à une inflation exponentielle à  $t \approx 10^{22} t_P$  lorsque l'espace-temps s'étend au-delà des horizons causaux, redéfinissant la vitesse de la lumière ( $c$ ) comme un paramètre localement invariant. L'énergie perdue par le décalage vers le rouge des photons est supposée être redistribuée en pression de rayonnement, alimentant ainsi l'inflation et assurant la conservation de l'énergie dans un univers en expansion. Les patchs locaux de Minkowski préservent l'invariance de  $c$ , résolvant les problèmes d'horizon et de platitude tout en conciliant la relativité restreinte avec la récession superluminale cosmologique. Huit tests observationnels sont décrits, avec des signatures attendues dans le fond diffus cosmologique (CMB), les ondes gravitationnelles et la structure à grande échelle. Les données actuelles sont en accord avec  $\Lambda$ CDM mais n'excluent pas ce modèle, laissant la voie ouverte à une validation par des expériences de haute précision futures.

## 1. Introduction

La cosmologie standard  $\Lambda$ CDM décrit un Big Bang chaud à  $t = 0$ , suivi d'une brève période d'inflation de  $t \approx 10^{-36}$  s à  $10^{-34}$  s. Cette époque est entraînée par un champ scalaire « inflaton », dont le potentiel produit une expansion exponentielle ( $a(t) \propto e^{Ht}$ ) [1, 2]. Cela résout les problèmes d'horizon et de platitude et laisse des empreintes dans le fond diffus cosmologique (CMB). Malgré son succès,  $\Lambda$ CDM repose sur des ingrédients spéculatifs : une particule d'inflaton non détectée, des paysages de potentiel finement ajustés et une tolérance pour l'apparente non-conservation de l'énergie due au décalage vers le rouge des photons.

Je présente une alternative pilotée par le rayonnement. Mon modèle commence par une expansion linéaire, passe naturellement à une inflation exponentielle lorsque les photons dominent et que les horizons se déconnectent, et se prolonge dans l'ère d'accélération moderne. Trois principes centraux distinguent ce cadre :

1. **Aucun inflaton requis.** La pression de rayonnement elle-même, amplifiée par l'énergie du décalage vers le rouge, entraîne l'inflation.
2. **Conservation de l'énergie rétablie.** L'énergie perdue par le décalage vers le rouge est recyclée thermodynamiquement en pression de rayonnement, effectuant un tra-

vail sur l'univers en expansion.

3. **Invariance locale de  $c$ .** Dans chaque patch causal, les observateurs mesurent la même vitesse de la lumière, conformément aux postulats d'Einstein. Globalement, la récession superluminale découle naturellement de la déconnexion causale.

## 2. Cadre théorique

### 2.1 Expansion linéaire précoce ( $t = 0$ à $t = 10^{20} t_P$ )

À l'époque de Planck ( $t = 1 t_P = 5.39 \times 10^{-44} \text{ s}$ ), l'univers s'étend linéairement avec un facteur d'échelle  $a(t) \propto t$ . Sa taille propre est  $R(t) = ct$ , et la densité d'énergie est à l'échelle de Planck :

$$\rho \approx 5 \times 10^{96} \text{ kg m}^{-3}.$$

L'équation de Friedmann régit l'expansion :

$$H^2 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2},$$

avec  $H = 1/t$  et une courbure négligeable. À ce stade, les photons sont absents, donc la pression de rayonnement ne contribue pas encore.

### 2.2 Apparition de la pression de rayonnement ( $t = 10^{20} t_P$ )

À  $t \sim 10^{20} t_P$  ( $\sim 10^{-36} \text{ s}$ ), la formation de particules produit des photons dans un plasma quark-gluon à  $T \approx 10^{28} \text{ K}$ . La pression de rayonnement émerge :

$$P = \frac{1}{3}\rho c^2, \quad \rho = \frac{aT^4}{c^2},$$

avec  $a = 7.566 \times 10^{-16} \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-4}$ . Cela donne  $P \sim 10^{92} \text{ Pa}$ . Bien que gigantesque, la gravité domine encore, et l'expansion reste décélérée.

### 2.3 Déconnexion causale et invariance locale de $c$ ( $t = 10^{22} t_P$ )

À  $t \approx 10^{22} t_P$  ( $\sim 10^{-34} \text{ s}$ ), le rayon de l'univers dépasse son horizon de type Schwarzschild :

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad M = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi R^3, \quad R = ct.$$

Lorsque l'horizon des particules  $d_p \approx ct$  dépasse  $r_s$ , les régions se déconnectent causalement.

Dans chaque patch d'horizon, les observateurs mesurent  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , conformément aux expériences de pensée d'Einstein sur le train et la fusée. Globalement, cependant, les vitesses de récession dépassent  $c$ , comme dans la cosmologie standard. Je paramètre cela comme suit :

$$c_{\text{eff}} = c_0 \left( \frac{a_0}{a} \right)^\beta, \quad \beta > 0,$$

ce qui n'implique pas une variation littérale de  $c$ , mais encode plutôt sa localité. Ainsi,  $c$  reste invariant pour tout observateur dans son horizon causal, tandis que l'expansion superluminale globale reflète la déconnexion, et non une violation de la relativité.

## 2.4 Redistribution de l'énergie du décalage vers le rouge

Dans  $\Lambda$ CDM, l'énergie des photons diminue à mesure que les longueurs d'onde s'étirent :

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad \lambda \propto a, \quad E \propto a^{-1}.$$

La perte apparente d'énergie est attribuée à l'expansion, sans loi de conservation globale.

Mon modèle résout ce paradoxe : l'énergie perdue par le décalage vers le rouge est absorbée aux horizons causaux et redistribuée en pression de rayonnement, effectuant effectivement un travail sur la métrique :

$$\Delta E_{\text{décalage vers le rouge}} \rightarrow \Delta P_{\text{rayonnement}} \cdot V.$$

### 2.4.1 Décalage vers le rouge comme travail sur la métrique

Le principe d'équivalence d'Einstein identifie la gravité à l'accélération. Cela offre un moyen concret de considérer le décalage vers le rouge non comme une destruction d'énergie, mais comme sa conversion en travail cinétique.

**Expérience de pensée :** Considérez un laser bleu émis vers le haut depuis la surface d'une planète. Les photons grimpent hors du potentiel gravitationnel et arrivent décalés vers le rouge chez un observateur lointain. Pour l'observateur, chaque photon semble porter moins d'énergie. Pourtant, le laser à la source a expérimenté l'énergie-masse complète des photons émis : il a transféré un moment correspondant à leur énergie non décalée et à la pression de rayonnement.

Où est passée l'énergie "manquante" ? Elle a été investie dans le champ gravitationnel, effectuant le travail nécessaire pour extraire les photons du puits de potentiel.

Par analogie, en cosmologie, les photons émis à des temps précoces perdent de l'énergie par le décalage vers le rouge cosmologique. Localement, la région émettrice subit leur pleine pression de rayonnement. Mais globalement, le déficit apparent n'est pas perdu ; il a été converti en **travail sur la métrique** - spécifiquement, en une expansion accélérée.

$$\Delta E_{\text{photon}} = W_{\text{expansion}}.$$

### 2.4.2 Thermodynamique des horizons et mécanisme de redistribution

En m'appuyant sur cette analogie, je propose que les horizons causaux agissent comme des médiateurs de l'énergie du décalage vers le rouge :

1. **Transfert d'énergie.** L'énergie des photons diminue selon  $E \propto a^{-1}$ . Au lieu de disparaître, cette énergie est absorbée aux horizons des particules ou aux frontières causales de type Schwarzschild.
2. **Mappage du décalage gravitationnel.** Tout comme le décalage gravitationnel transfère l'énergie au champ, le décalage cosmologique transfère l'énergie à l'expansion de la métrique.
3. **Thermodynamique des horizons.** Les horizons possèdent une entropie ( $S \propto A/4$ ) et une température (Gibbons-Hawking). L'énergie décalée contribue à l'entropie de l'horizon, et via le cadre de la gravité thermodynamique de Padmanabhan [3], elle réapparaît sous forme de pression effectuant un travail sur l'expansion.
4. **Amplification de la pression.**

$$P = \frac{1}{3} \rho c_{\text{eff}}^2 + \Delta P_{\text{décalage vers le rouge}},$$

modifiant l'équation d'accélération :

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3P}{c^2} \right).$$

Avec  $\Delta P_{\text{décalage vers le rouge}} > 0$ , l'expansion s'accélère sans invoquer un inflaton.

### 2.4.3 Considérations formelles

Pour formaliser ce mécanisme, il faut :

- Une théorie des champs quantiques en espace-temps courbe pour décrire les interactions photon-horizon.
- Une thermodynamique des horizons (gravité émergente de Padmanabhan, entropie de Bekenstein-Hawking) pour modéliser l'absorption et la réémission d'énergie.
- Des simulations numériques des dynamiques de Friedmann modifiées avec  $\Delta P_{\text{décalage vers le rouge}}$ .

## 2.5 Ère moderne

À  $t \approx 2.6 \times 10^{11} t_P$  (13,8 milliards d'années), la température du CMB est de  $T = 2.7 \text{ K}$ , et la pression de rayonnement a diminué à  $P \sim 10^{-31} \text{ Pa}$ . Pourtant, le même mécanisme médié par les horizons persiste : l'énergie du décalage vers le rouge continue d'alimenter l'accélération cosmique, contribuant aux dynamiques tardives généralement attribuées à l'énergie sombre ( $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ ).

## 3. Avancées conceptuelles

1. **Aucun inflaton requis.** L'inflation découle naturellement de la pression de rayonnement amplifiée par l'énergie du décalage vers le rouge, éliminant le besoin d'un champ scalaire non détecté.
2. **Conservation de l'énergie rétablie.** L'énergie du décalage vers le rouge est recyclée en pression de rayonnement, alignant l'expansion sur les principes

thermodynamiques.

3. **Invariance locale de  $c$ .** Le postulat d'Einstein est valable dans les patchs causaux, tandis que la récession superluminale est expliquée par la séparation des horizons.

## 4. Tests observationnels et signatures attendues

Je propose huit tests observationnels, chacun avec des signatures distinctes qui pourraient différencier ce modèle de  $\Lambda$ CDM.

### 4.1 Anisotropies du CMB

- **Test :** Mesurer le spectre de puissance du CMB et la polarisation en mode B avec une haute précision.
- **Signature attendue :** Amplification des fluctuations à petite échelle aux multipôles  $l > 1000$ , avec une polarisation en mode B détectable à  $l < 100$  ( $r \approx 0.05-0.1$ ).

### 4.2 Densité d'énergie de rayonnement dépendante du décalage vers le rouge

- **Test :** Observer l'évolution de la densité d'énergie de rayonnement  $\rho_{\text{rayonnement}}$  avec le décalage vers le rouge.
- **Signature attendue :** À  $z > 1100$ ,  $\rho_{\text{rayonnement}}$  devrait s'écarter de l'évolution standard  $\propto a^{-4}$ .

### 4.3 Fond d'ondes gravitationnelles (GWB)

- **Test :** Rechercher un fond d'ondes gravitationnelles stochastique de l'époque d'inflation.
- **Signature attendue :** Un pic à  $\sim 10^{-9}$  Hz, avec une contrainte caractéristique  $h_c \approx 10^{-15}$ .

### 4.4 Tension de Hubble et accélération tardive

- **Test :** Mesurer la constante de Hubble  $H_0$  et l'équation d'état de l'énergie sombre  $w$ .
- **Signature attendue :**  $H_0 \approx 70$  km/s/Mpc, avec  $w$  entre  $-0.8$  et  $0$  à  $z < 1$ .

### 4.5 Structure à l'échelle de l'horizon

- **Test :** Cartographier la structure à grande échelle à 10–100 Mpc.
- **Signature attendue :** Regroupement amplifié et vides anormalement grands.

### 4.6 Décalages des lignes spectrales

- **Test :** Analyser les spectres à haut décalage vers le rouge.
- **Signature attendue :** Élargissement ou décalages d'énergie de 0,1–1 % à  $z > 5$ .

### 4.7 Signatures thermodynamiques des horizons

- **Test** : Sonder l'entropie et le flux aux horizons cosmiques.
- **Signature attendue** : Croissance de l'entropie des horizons  $\Delta S \sim 10^{120} k_B$ .

## 4.8 Nucléosynthèse primordiale

- **Test** : Mesurer les abondances des éléments légers.
- **Signature attendue** : Augmentation de 1–5 % de  $^4\text{He}$  et diminution du deutérium.

## 5. Comparaison avec $\Lambda\text{CDM}$

Caractéristique	$\Lambda\text{CDM}$	Modèle piloté par le rayonnement
Moteur de l'inflation	Champ scalaire d'inflaton	Pression de rayonnement + énergie du décalage vers le rouge
Conservation de l'énergie	Non définie globalement	Imposée thermodynamiquement via les horizons
Vitesse de la lumière	Globalement invariante	Localement invariante dans les horizons
Problèmes d'horizon/platitude	Résolus par l'inflaton	Résolus par le rayonnement + horizons
Énergie sombre	Constante cosmologique ( $\Lambda$ )	Continuation du mécanisme rayonnement-décalage
Prédictions CMB	Spectre standard	Amplifications à petite échelle, différences possibles en mode B
Tension de Hubble	Non résolue	$H_0$ intermédiaire naturel
Statut observationnel	Soutenu mais incomplet	Compatible avec les données, non falsifié

## 6. Discussion

Ce cadre reformule l'inflation comme un processus thermodynamique intrinsèque au rayonnement, ne nécessitant aucun inflaton spéculatif. Il fournit un mécanisme pour la conservation de l'énergie dans l'espace-temps en expansion et concilie les postulats locaux de la relativité avec les horizons cosmologiques.

Des défis subsistent. La dynamique exacte de la redistribution de l'énergie du décalage vers le rouge nécessite un développement mathématique supplémentaire, et des simulations numériques des équations de Friedmann modifiées sont essentielles. La discrimination observationnelle dépendra des futures missions (CMB-S4, Euclid, LISA, SKA).

## 7. Conclusion

Je présente une cosmologie dans laquelle la pression de rayonnement, modulée par les horizons causaux et l'énergie du décalage vers le rouge, entraîne à la fois l'inflation et l'expansion actuelle. Ce modèle élimine le besoin d'un inflaton hypothétique, rétablit la cohérence thermodynamique et concilie l'invariance locale de  $c$  d'Einstein avec la superlumina-

lité cosmologique. Les données actuelles sont compatibles avec  $\Lambda$ CDM, mais les tests observationnels proposés offrent une voie pour la validation ou la falsification.

## Références

[1] Collaboration Planck, *Planck 2018 Results. VI. Paramètres cosmologiques*, Astron. Astrophys. 641, A6 (2020). [2] Guth, A. H., *Univers inflationniste*, Phys. Rev. D 23, 347 (1981). [3] Padmanabhan, T., *Aspects thermodynamiques de la gravité : nouvelles perspectives*, Rep. Prog. Phys. 73, 046901 (2010). [4] Collaboration BICEP2/Keck, *Contraintes améliorées sur les ondes gravitationnelles primordiales*, Phys. Rev. Lett. 121, 221301 (2018).