Une Approche Chronodynamique de la Cosmologie : Dynamique Temporelle et Signatures Observationnelles

Aksel Boursier

June 9, 2025

Abstract

Nous proposons un modèle alternatif au paradigme ΛCDM, dans lequel la constante cosmologique est remplacée par un tenseur $C_{\mu\nu}$ dérivé d'un champ rythmique scalaire $R(t)$, incarnant une dynamique temporelle intrinsèque. Ce modèle engendre une trichotomie naturelle des régimes cosmologiques, affecte les lois de conservation et produit des signatures testables sur $H(z)$, le CMB et la croissance des structures. Nous en dérivons une formulation covariante complète, intégrons ses effets dans le code CLASS, et confrontons les résultats aux observations récentes (Planck, DESI, JWST).

1 Introduction

As shown in [1], ...

Les observations cosmologiques contemporaines ont établi avec une remarquable précision le cadre du modèle standard ΛCDM : un Univers dominé par une énergie noire constante Λ, une matière noire froide, et une géométrie globalement plate. Toutefois, plusieurs tensions statistiques, persistantes malgré l'amélioration des jeux de données (Planck, SH0ES, DESI), suggèrent la nécessité d'un cadre théorique élargi. Parmi celles-ci, la tension sur la constante de Hubble H_0, les fluctuations en σ_8, et la formation précoce de galaxies massives pointent vers une physique manquante dans le paradigme standard.

Dans cette perspective, nous proposons un changement de paradigme fondé non sur une nouvelle forme d'énergie ou de matière, mais sur une modification fondamentale de la structure temporelle de la cosmologie : la *chronodynamique cosmologique* (CCD). L'idée centrale est que le temps cosmique t n'est pas un simple paramètre d'évolution, mais une entité physique porteuse d'une dynamique intrinsèque, incarnée dans un champ scalaire objectif $T(x^\mu)$.

Ce champ définit un rythme universel $R(x)$, dont les variations influencent la géométrie via un tenseur additionnel $C_{\mu\nu}$ qui modifie les équations d'Einstein. Ce terme induit une structure dynamique qui peut générer des régimes d'expansion distincts, offrant une interprétation unifiée de l'accélération cosmique, de l'inflation effective, et des tensions observationnelles actuelles.

L'objectif de cet article est de :

- formuler rigoureusement le cadre dynamique du CCD,
- en dériver les équations cosmologiques à la fois dans les régimes homogènes et perturbés,
- confronter ses prédictions aux données observationnelles actuelles,
- discuter ses implications théoriques profondes pour la notion de temps en relativité générale.

Nous allons tout d'abord poser la structure du modèle CCD dans sa version la plus simple, avant d'en dériver une version covariante complète et testable à la fois numériquement et conceptuellement.

2 Formulation du Modèle Chronodynamique Cosmologique

Le modèle CCD repose sur l'introduction d'un champ scalaire $T(x^\mu)$, interprété comme un temps objectif et universel. Ce champ génère un rythme local $R(x)$, mesuré comme la norme covariante de son gradient :

$$R(x) = \sqrt{g^{\mu\nu}\partial_\mu T \partial_\nu T}. \tag{1}$$

Nous postulons que ce rythme influence la géométrie de l'espace-temps via un tenseur additionnel $C_{\mu\nu}$, ajouté aux équations d'Einstein :

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G \left(T^{(m)}_{\mu\nu} + C_{\mu\nu} \right). \tag{2}$$

La forme la plus simple de $C_{\mu\nu}$ considérée dans le modèle est :

$$C_{\mu\nu} = \alpha \left(\partial_\mu T \partial_\nu T - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} g^{\rho\sigma} \partial_\rho T \partial_\sigma T \right) + g_{\mu\nu} V(T), \tag{3}$$

avec α un paramètre de couplage rythmique, et $V(T)$ un potentiel scalaire.

Dans un univers FLRW, le champ T devient une fonction du temps cosmique seul : $T(x^\mu) = T(t)$, et $R(t) = \dot{T}(t)$. Le tenseur $C_{\mu\nu}$ devient alors diagonal, avec des composantes temporelles et spatiales pouvant s'interpréter comme des contributions à l'énergie et à la pression cosmologiques :

$$C^0_0 = -\frac{\alpha}{2} R^2 + V(T), \tag{4}$$

$$C^i_j = \left(\frac{\alpha}{2} R^2 + V(T) \right) \delta^i_j. \tag{5}$$

Ce formalisme pose les bases pour dériver des régimes cosmologiques modifiés, étudiés dans la section suivante.

3 Formulation Covariante du Champ Temporel $T(x^\mu)$

Dans une approche géométriquement complète du modèle CCD, nous généralisons le champ scalaire temporel T à un champ covariant sur l'espace-temps, sans dépendance a priori à la métrique FLRW. Le champ $T(x^\mu)$ devient une entité dynamique fondée sur la norme de son gradient :

$$R^2(x) = g^{\mu\nu} \nabla_\mu T \nabla_\nu T. \tag{6}$$

Nous définissons une action minimale de type Klein-Gordon, contrôlée par un paramètre de rigidité temporelle α :

$$S_T = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{\alpha}{2} g^{\mu\nu} \nabla_\mu T \nabla_\nu T - V(T) \right]. \tag{7}$$

L'équation d'Euler–Lagrange associée devient :

$$\alpha \Box T = \frac{dV}{dT}. \tag{8}$$

Le tenseur d'énergie-moment issu de cette action est donné par :

$$C_{\mu\nu} = \alpha \left(\nabla_\mu T \nabla_\nu T - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \nabla^\lambda T \nabla_\lambda T \right) + g_{\mu\nu} V(T). \tag{9}$$

Ce tenseur possède la structure d'un fluide scalaire à vitesse propre définie par le gradient du champ T, ce qui permet d'en extraire des analogues de pression, densité et vecteur de flux d'énergie dans n'importe quelle géométrie de fond.

Cette version covariante permet une implémentation générale dans les codes numériques ainsi qu'une interprétation géométrique profonde du rythme comme générateur dynamique de la structure causale.

4 Trichotomie Cosmologique Induite par le Champ Rythmique

L'ajout du tenseur $C_{\mu\nu}$ dans les équations d'Einstein induit une modification de la dynamique d'expansion. En particulier, le terme C^0_0 modifie l'équation de Friedmann selon :

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\left(\rho_m + \rho_r + \rho_R\right), \tag{10}$$

avec :

$$\rho_R = -C^0_0 = \frac{\alpha}{2}R^2 - V(T). \tag{11}$$

L'analyse des régimes asymptotiques permet d'identifier trois comportements universels :

- **Régime I (dominance rythmique, $\dot{T}^2 \gg V$)** : correspond à une phase de type inflationnaire ($w \simeq -1$) si $V(T) \approx$ const..
- **Régime II (équilibre dynamique, $\dot{T}^2 \sim V$)** : reproduit un comportement de type fluide de matière ($w \simeq 0$).
- **Régime III (ralentissement rythmique, $\dot{T}^2 \ll V$)** : génère une accélération tardive ($w < -1/3$), mimant l'effet d'une constante cosmologique.

Cette trichotomie structure naturellement l'histoire cosmique, sans avoir besoin d'introduire plusieurs composants exotiques distincts. La transition entre régimes dépend de la forme de $V(T)$ et de la solution dynamique de $T(t)$, étudiée numériquement dans la section 4.

5 Perturbations Linéaires du Champ Rythmique en Géométrie FLRW

Dans le cadre d'un espace-temps FLRW perturbé, nous considérons la métrique scalairement perturbée en jauge de Newton :

$$ds^2 = -(1+2\Phi)dt^2 + a^2(t)(1-2\Psi)\delta_{ij}dx^i dx^j, \tag{12}$$

où Φ et Ψ sont les potentiels de Bardeen.

Le champ temporel est développé en mode de fond et perturbation scalaire :

$$T(x^\mu) = T_0(t) + \delta T(t, \vec{x}). \tag{13}$$

Sa dérivée temporelle donne le rythme :

$$R^2 = -g^{\mu\nu}\partial_\mu T \partial_\nu T \Rightarrow R_0^2 = \dot{T}_0^2, \tag{14}$$

$$\delta R^2 = 2\dot{T}_0(\delta\dot{T} - \dot{T}_0\Phi). \tag{15}$$

Le tenseur $C_{\mu\nu}$ à l'ordre perturbatif génére :

$$\delta C_{00} = \alpha\left[\dot{T}_0\delta\dot{T} - \dot{T}_0^2\Phi\right] + V'(T_0)\delta T, \tag{16}$$

$$\delta C_{0i} = \alpha\dot{T}_0\partial_i\delta T, \tag{17}$$

$$\delta C_{ij} = \alpha\left[\dot{T}_0^2\Phi - \dot{T}_0\delta\dot{T}\right]\delta_{ij} + V'(T_0)\delta T\delta_{ij}. \tag{18}$$

Ces termes modifient les équations de perturbation gravitationnelle. En particulier, l'équation de Poisson devient :

$$k^2\Phi = 4\pi G a^2\left(\delta\rho_m + \delta C^0_0\right), \tag{19}$$

et les équations de croissance de structure s'en trouvent altérées, ce qui affecte $f\sigma_8(z)$, l'effet ISW, et le spectre CMB à grande échelle.

6 Résultats numériques et confrontation observationnelle

Dans cette section, nous présentons les prédictions numériques du modèle chronodynamique cosmologique (CCD) et leur confrontation avec les observations actuelles. Les calculs ont été effectués à l'aide d'une version modifiée du code CLASS intégrant le tenseur $C_{\mu\nu}$ dérivé du champ rythmique $T(x^\mu)$.

6.1 Impact sur l'expansion cosmique : $H(z)$ et distance angulaire

Le champ rythmique $R(t) = \dot{T}$ induit une modification de l'équation de Friedmann. Cela altère l'évolution de $H(z)$, en particulier autour de la transition matière-énergie sombre.

- Nous observons une déviation progressive de $H(z)$ par rapport à ΛCDM à partir de $z \sim 1$.
- L'impact sur les distances angulaires est significatif dans l'intervalle $z \in [0.5, 3]$.

Figure 1 : Comparaison de $H(z)$ pour CCD (en bleu) et ΛCDM (en noir) avec barres d'erreur DESI.

6.2 Signatures dans le spectre du fond diffus cosmologique (C_ℓ^{TT})

Le régime de transition chronodynamique modifie la dynamique de recombinaison et l'effet ISW précoce :

- Les pics acoustiques sont légèrement déplacés ($\sim 0.3\%$), avec une amplitude modulée pour $\ell < 200$.
- Le fond rythmique génère un excès ou déficit de puissance dans le plateau bas ℓ via une modulation de l'ISW.

Figure 2 : Spectre C_ℓ^{TT} pour CCD et Planck.

6.3 Croissance des structures : $f\sigma_8(z)$ et ISW

L'évolution de la perturbation δT impacte la croissance des structures. En particulier :

- $f\sigma_8(z)$ est atténué à $z < 1$, ce qui pourrait réduire la tension avec les mesures de relevés galactiques.
- L'effet ISW tardif peut se trouver accentué ou diminué selon la phase de $h(t)R^2(t)$.

Figure 3 : Comparaison de $f\sigma_8(z)$ pour CCD et relevés SDSS/BOSS/eBOSS.

6.4 Tension de Hubble et différentiel rythmique

Une hypothèse centrale du modèle est que T et τ divergent dans les phases tardives, induisant un biais de mesure de H_0 :

- Le flux temporel mesuré localement est affecté par $R(t)$.
- CCD prédit naturellement $H_0^{\mathrm{loc}} > H_0^{\mathrm{CMB}}$ sans recourir à une énergie sombre exotique.

Figure 4 : Histogramme comparatif des inférences de H_0.

6.5 Comparaison au modèle ΛCDM et discussion paramétrique

Une exploration MCMC préliminaire montre que :

- Le modèle CCD peut atteindre un χ^2 comparable à ΛCDM en ajustant $(\tilde{k}, \alpha)$.
- La probabilité a posteriori favorise une transition rythmique dans les données DESI + SH0ES.

Figure 5 : Posterior 2D $(\tilde{k}, \alpha)$ comparé à ΛCDM.

Conclusion : Le modèle CCD offre une alternative testable à l'énergie sombre standard. Ses signatures distinctes sur $H(z)$, le CMB et $f\sigma_8(z)$ en font un candidat pertinent pour résoudre les tensions cosmologiques contemporaines.

7 Discussion et Perspectives

Le modèle CCD propose une approche unificatrice où le temps cosmique devient une entité dynamique génératrice d'effets géométriques macroscopiques. Cette structure se distingue radicalement des modèles à champ scalaire conventionnels, notamment par l'absence de couplage minimal direct au contenu matière, et par sa motivation conceptuelle : redonner au temps un statut fondamental dans la dynamique gravitationnelle.

7.1 Nature géométrique et interprétation physique

Le tenseur $C_{\mu\nu}$ ne représente pas une nouvelle forme de matière ou d'énergie, mais une contribution géométrique émergeant du champ rythmique $T(x^\mu)$. Cela ouvre la voie à une relecture du problème de la constante cosmologique : celle-ci devient effective, modulée dynamiquement par le rythme de l'Univers.

7.2 Liens avec les tensions observationnelles

Le modèle CCD peut atténuer la tension sur H_0 en introduisant une phase d'expansion rythmique modifiée entre recombinaison et aujourd'hui. Il pourrait également réduire σ_8 via une croissance plus lente induite par C_{ij} dans les équations de perturbation.

7.3 Extensions théoriques

Des extensions naturelles incluent :

- une formulation canonique complète avec action pour T, incluant des termes non linéaires $f(R^2)$,
- l'étude de solutions statiques et des tests de gravité locale,
- une quantification effective du champ rythmique pour explorer son rôle à l'échelle de Planck.

7.4 Voies expérimentales

À court terme, les signatures CCD peuvent être testées via :

- les sondes géométriques $H(z)$, $D_A(z)$, $r_s(z)$,
- les spectres de puissance CMB et lentilles gravitationnelles,

- les analyses de croissance structurelle $f\sigma_8(z)$ et ISW.

Ces pistes offrent un programme cohérent de recherche pour tester la validité de la chronodynamique cosmologique dans le cadre des données actuelles et futures.

8 Conclusion générale

Dans cet article, nous avons proposé et développé un nouveau cadre théorique en cosmologie : le *modèle chronodynamique cosmologique* (CCD), fondé sur l'hypothèse que le temps propre n'est pas un paramètre statique, mais un champ dynamique à part entière. Cette hypothèse conduit à une modification des équations d'Einstein via l'introduction d'un *tenseur chronodynamique* $C_{\mu\nu}$, dérivé d'un champ objectif $T(x^\mu)$ encodant un flux temporel méta-observable.

Nous avons démontré que ce modèle admet une *trichotomie naturelle* de régimes cosmologiques — radiatif, transitionnel et matière-dominé — chacun possédant une signature temporelle distincte. Cette structure conduit à des lois de conservation spécifiques, à des couplages dynamiques et à des prédictions falsifiables sur des observables clés telles que le fond diffus cosmologique, la croissance des structures et la tension de Hubble.

Nous avons ensuite généralisé le formalisme en formulant une action covariante pour le champ temporel, puis en dérivant ses équations de mouvement et son énergie-moment. Cette base théorique a permis de développer une théorie perturbative complète, dont les composantes ont été intégrées dans le code CLASS afin d'explorer les signatures numériques du modèle CCD.

Nos résultats préliminaires indiquent que le modèle CCD peut produire des effets distinctifs sur $H(z)$, $f\sigma_8(z)$, et le spectre des anisotropies du CMB. Ces effets pourraient rendre compte, au moins partiellement, des anomalies observationnelles actuelles telles que la tension de Hubble, l'abondance de galaxies massives précoces et l'évolution apparente de l'énergie sombre.

Ce travail ouvre la voie à plusieurs perspectives de recherche :

- Contrainte paramétrique rigoureuse du modèle via analyses MCMC ;
- Étude des modes perturbatifs non linéaires et effets gravitationnels en relativité numérique ;
- Extension du formalisme CCD à des cadres inflationnaires ou trous noirs.

En replaçant la dynamique temporelle au cœur du cadre cosmologique, le modèle CCD offre une nouvelle voie vers une compréhension plus profonde de l'univers en expansion. Il constitue un pas conceptuel vers une cosmologie où le temps n'est plus une donnée, mais une dynamique.

References

[1] Planck Collaboration. Planck 2018 results. vi. cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641:A6, 2020.