

Tome II

Le Modèle du Vide Actif

Dynamique, Couplages et Temps du Vide

Auteur : Esteban Rivera-Ramirez

Affiliation : Recherche indépendante en cosmologie et physique fondamentale

Date : Octobre 2025

Prépublication scientifique

Dépôt prévu sur HAL / Zenodo / DOI

Résumé. Ce *Tome II* prolonge le *Tome I* et formalise le *Modèle du Vide Actif* comme cadre *complémentaire* aux descriptions standard (RG, QFT), non pas en les rejetant, mais en proposant une lecture optique et falsifiable du redshift. Nous étudions un champ lent du vide σ_{vac} et ses couplages hiérarchisés (photonique, matière, courants faibles), introduisant un taux effectif $\kappa_{\text{vac}}(t)$ lié aux dérives de fréquence. Le Tome II précise la dynamique (potentiel, quasi-stationnarité), les tests d'achromaticité et d'adiabaticité, et l'unification *cosmologie* \leftrightarrow *laboratoire* (horloges, cavités, lentilles, CMB, gravimétrie). Nous n'*affirmons* rien de définitif : chaque proposition est accompagnée de critères de *falsifiabilité* explicites et de bornes expérimentales. L'objectif est d'offrir une piste testable reliant, de façon minimale, la stabilité du temps mesuré et la perte d'énergie photonique, dans la continuité des cadres établis.

Auteur : Esteban Rivera-Ramirez — chercheur indépendant (Toulouse, France).

Table des matières

Résumé / Abstract	3
1 Introduction générale	4
2 Fondements théoriques du champ du vide	6
2.1 Principe général.....	6
2.2 Lagrangien du champ du vide	6
2.3 Équation du mouvement.....	6
2.4 Potentiel et stabilité.....	7
2.5 Paramètres et hiérarchie des couplages	7
2.6 Équation effective pour la variable observable.....	7
2.7 Définition opérationnelle du temps du vacuum	8
2.8 Lien entre cosmologie et laboratoire	9
2.8.1 Relation d'échelle	9
2.8.2 Protocole de détection du mode commun.....	10
2.9 Signature temporelle mesurable	10
2.9.1 Ordre de grandeur attendu	10
2.9.2 Comparaison avec les expériences actuelles	11
2.9.3 Conséquence conceptuelle.....	11
3 Couplages du champ du vide	12
3.1 Hiérarchie et signification des couplages	12
3.1.1 Structure hiérarchique.....	12
3.1.2 Portée conceptuelle	13
3.2 Formulation mathématique générale des couplages	13
3.2.1 Interprétation physique des termes	14
3.2.2 Régimes limites analytiques.....	14
3.2.3 Critères de falsifiabilité.....	14
3.3 Interprétation géométrique et énergie effective.....	15
3.3.1 Tenseur d'énergie-impulsion du vacuum	15
3.3.2 Énergie effective et constante dynamique	15
3.3.3 Conservation et cohérence	16
3.4 Régimes énergétiques du champ du vide	16
4 Corrélations expérimentales et tests	18
4.1 Méthodologie générale.....	18
4.1.1 Principe d'unification des tests	18
4.1.2 Organisation du chapitre.....	19
4.2 Tests métrologiques : horloges optiques et cavités croisées.....	19
4.2.1 Horloges optiques multi-espèces	19
4.2.2 Cavités micro-ondes / optiques croisées.....	20
4.3 Tests gravitationnels : dérive de G_{eff}	21
4.3.1 Motivation et principe.....	21

4.3.2	Méthode expérimentale	21
4.3.3	Résultats expérimentaux et bornes	22
4.4	<i>Tests cosmologiques : redshift, lentilles et CMB</i>	22
4.4.1	Redshift et dérive temporelle	22
4.4.2	Lentilles gravitationnelles et délais temporels	22
4.4.3	CMB : cohérence thermique et achromaticité spectrale.....	23
4.4.4	Synthèse cosmologique	23
4.5	<i>Corrélation cosmologie–laboratoire</i>	24
4.5.1	Principe d’unicité du champ du vide.....	24
4.5.2	Méthodologie de corrélation	24
4.5.3	Bornes expérimentales.....	25
4.5.4	Conclusion du chapitre	25
5	Discussion et perspectives physiques	26
5.1	<i>Le temps comme variable interne du vacuum</i>	26
5.2	<i>Lien avec la physique quantique</i>	26
5.3	<i>Conséquences physiques et théoriques</i>	27
5.3.1	Énergie et conservation.....	27
5.3.2	Stabilité et régularité	27
5.4	<i>Portée conceptuelle</i>	27
5.5	<i>Perspectives expérimentales et théoriques</i>	28
5.5.1	Axes expérimentaux prioritaires	28
5.5.2	Perspectives théoriques.....	28
5.5.3	Feuille de route synthétique.....	29
5.6	<i>Falsifiabilité et robustesse du modèle</i>	29
5.7	<i>Conclusion générale du Tome 2</i>	30
	<i>Perspectives — Vers le Tome III</i>	30
	Bibliographie	31
	Annexe A — Références internes du projet Vacuum Actif	32
	Annexe B — Notations et unités physiques	34

Résumé / Abstract

Résumé : Ce second tome développe la dynamique interne du *Vacuum Actif*, introduit la variable temporelle du champ du vide et étend la théorie vers les couplages photonique, gravitationnel et atomique. Le champ scalaire σ_{vac} est décrit par un potentiel lent, mono-puits et stable, permettant une évolution adiabatique du vide sans expansion métrique. Les constantes fondamentales apparaissent comme des variables dérivées de l'état du vacuum, faisant du temps lui-même une observable physique du champ.

Mots-clés : Vacuum actif, champ du vide, cosmologie, temps, métrologie, adiabaticité, couplages.

Abstract : This second volume develops the internal dynamics of the *Active Vacuum*, introduces the temporal variable of the vacuum field, and extends the theory towards photonic, gravitational and atomic couplings. The scalar field σ_{vac} is described by a slow, single-well potential allowing an adiabatic evolution of the vacuum without metric expansion. Fundamental constants appear as derivatives of the vacuum state, making time itself a physical observable of the field.

Keywords : Active Vacuum, vacuum field, cosmology, time, metrology, adiabaticity, couplings.

Chapitre 1

Introduction générale

Le *Tome I* du *Vacuum Actif* établissait le fondement observationnel : le décalage spectral cosmologique, la stabilité des pulsars milliseconde et l'achromaticité des lentilles gravitationnelles pouvaient être compris sans invoquer d'expansion métrique, si l'on admettait une interaction lente et adiabatique entre le photon et le vide quantique.

Ce second volume prolonge l'analyse vers la physique intime du vide. Il ne s'agit plus d'interpréter les effets du *Vacuum Actif*, mais d'en décrire la *dynamique interne* : comment le champ du vide évolue, se stabilise, et comment il confère au temps sa texture physique.

Motivation et portée

Le temps, dans la physique classique, est un paramètre externe ; dans la relativité, il devient une coordonnée géométrique ; dans la présente théorie, il émerge de l'état du vide lui-même. Le champ scalaire σ_{vac} joue le rôle d'un métronome universel : ses variations lentes définissent la cadence cosmique, et donc la perception même de la durée.

Cette approche unifie trois domaines souvent traités séparément :

- la **cosmologie**, où l'évolution du redshift traduit la dynamique globale de σ_{vac} ;
- la **physique quantique et atomique**, où les constantes fondamentales dépendent faiblement de l'état du vacuum ;
- la **métrologie du temps**, où les horloges optiques et les cavités résonantes mesurent directement les dérives de $\sigma_{\text{vac}}(t)$.

Objectifs du Tome II

Ce tome expose :

1. le **formalisme dynamique** du champ du vide : équation du mouvement, potentiel et conditions d'équilibre ;
2. la **structure des couplages** (photonique, gravitationnel, atomique) compatibles avec l'achromaticité stricte ;

3. les **tests expérimentaux** et leurs seuils : dérive des horloges optiques, cavités micro-ondes, balances de Cavendish, corrélations cosmologie laboratoire ;
4. enfin, une **réflexion sur le temps** comme grandeur physique émergeant du vacuum.

Méthode

Chaque chapitre repose sur une relation directe entre théorie et observation. Aucune hypothèse n'est introduite sans falsifiabilité. Les équations sont présentées en unités naturelles ($c = \hbar = 1$) mais traduites en unités SI pour les grandeurs mesurables. Les constantes μ , λ , ξ_γ , ξ_m , ξ_ν sont considérées comme des paramètres d'ajustement soumis aux bornes expérimentales.

Transition

L'objectif final de ce volume est de montrer que la stabilité du cosmos, la constance apparente des lois physiques et la mesure du temps procèdent d'un même mécanisme : la dynamique lente et adiabatique du champ du vide.

Chapitre 2

Fondements théoriques du champ du vide

2.1 Principe général

Le *Vacuum Actif* décrit le vide non comme un état inerte, mais comme un champ scalaire lent, noté σ_{vac} , dont la valeur gouverne les propriétés locales de la matière, de la lumière et du temps. La dynamique du vide est donc interprétée comme un processus physique réel : le champ oscille faiblement autour d'un équilibre σ_* , ce qui induit des dérives infinitésimales mais mesurables dans les constantes fondamentales et les fréquences naturelles.

2.2 Lagrangien du champ du vide

Le champ σ_{vac} est supposé réel, homogène à l'échelle macroscopique, et couplé faiblement aux autres champs. Son Lagrangien minimal s'écrit :

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - \left[\Lambda_{\text{eff}} + \frac{1}{2} \mu^2 (\sigma - \sigma_*)^2 + \frac{\lambda}{4} (\sigma - \sigma_*)^4 \right] + \sigma \left(\xi_\gamma F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \xi_m \rho_m + \xi_\nu J_\nu J^\nu \right). \quad (2.1)$$

Les trois termes décrivent :

- **la cinétique** du champ : $\frac{1}{2} \partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma$;
- **le potentiel interne** : un puits quadratique stabilisé par un terme quartique ;
- **les couplages** : photonique (ξ_γ), matière lente (ξ_m) et courants faibles (ξ_ν).

2.3 Équation du mouvement

L'équation d'Euler-Lagrange appliquée à (2.1) donne :

$$\square\sigma + \mu^2(\sigma - \sigma_\star) + \lambda(\sigma - \sigma_\star)^3 = \xi_\gamma F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \xi_m \rho_m + \xi_\nu J_\nu J^\nu. \quad (2.2)$$

Cette équation exprime la réponse du champ du vide aux excitations électromagnétiques, gravitationnelles et de matière ; les couplages ξ_i régulent l'amplitude de cette réponse. Dans la limite $\xi_i \rightarrow 0$, le champ se réduit à une composante homogène et stationnaire dont la valeur moyenne définit la constante cosmologique effective Λ_{eff} .

2.4 Potentiel et stabilité

Le potentiel adopté :

$$V(\sigma) = \Lambda_{\text{eff}} + \frac{1}{2}\mu^2(\sigma - \sigma_\star)^2 + \frac{\lambda}{4}(\sigma - \sigma_\star)^4, \quad \lambda \geq 0, \quad (2.3)$$

présente un unique minimum stable en $\sigma = \sigma_\star$. Le paramètre μ fixe la fréquence de relaxation du champ, et λ sa rigidité non linéaire. Pour $\mu \ll 1 \text{ yr}^{-1}$, le champ évolue lentement : il conserve l'achromaticité du redshift, respecte l'adiabaticité du CMB et assure la stabilité temporelle observée des horloges atomiques. Dans les limites :

$$\mu \rightarrow \infty \Rightarrow \text{champ figé (régime } \Lambda\text{CDM)}, \quad \mu \rightarrow 0 \Rightarrow \text{vacuum quasi-statique (régime adiabatique)}.$$

2.5 Paramètres et hiérarchie des couplages

Les expériences imposent la hiérarchie suivante :

$$\xi_\gamma \gg \xi_m \gg \xi_\nu,$$

garantissant un couplage dominant au champ électromagnétique sans dispersion mesurable. Les bornes actuelles issues des tests de pulsars, du CMB et des horloges optiques indiquent :

$$|\xi_\gamma| \lesssim 10^{-17} \text{ m} \cdot \text{J}^{-1}, \quad |\xi_m| \lesssim 10^{-19} \text{ m} \cdot \text{J}^{-1}, \quad |\xi_\nu| \lesssim 10^{-22} \text{ m} \cdot \text{J}^{-1}. \quad (2.4)$$

Ces ordres de grandeur assurent que le champ du vide n'introduit aucune diffusion thermique ni chromaticité détectable.

2.6 Équation effective pour la variable observable

À grande échelle, il est commode d'introduire un paramètre observable κ_{vac} lié linéairement au champ :

$$\kappa_{\text{vac}} = \kappa_0 + \alpha \sigma, \quad (2.5)$$

dont l'évolution moyenne suit :

$$\dot{\kappa}_{\text{vac}} = D \nabla^2 \kappa_{\text{vac}} - \mu^2 (\kappa_{\text{vac}} - \kappa_\star) + \beta \rho_{\text{tot}}. \quad (2.6)$$

Cette équation phénoménologique résume la diffusion lente et amortie du vacuum ; elle permet de relier directement les dérives expérimentales observées ($\dot{\nu}/\nu$, \dot{G}/G) à l'évolution de σ_{vac} .

2.7 Définition opérationnelle du temps du vacuum

Nous définissons le *temps du vacuum* comme la grandeur intensive qui gouverne la cadence de toutes les horloges idéales couplées faiblement au champ du vide. Opérationnellement, pour une horloge (ou résonateur) i de fréquence propre $\nu_i(t)$, on postule l'ansatz linéaire local :

$$\frac{\dot{\nu}_i}{\nu_i}(t) = k_i \dot{\sigma}_{\text{vac}}(t), \quad k_i \in \mathbb{R} \text{ petit, constant à long terme.} \quad (2.7)$$

L'achromaticité exige que k_i ne dépende pas de la *fréquence d'observation* (bande), mais seulement de la *technologie/espèce* (Sr, Yb, Hg, Al⁺, micro-ondes, etc.).

Temps du vacuum. On introduit alors la variable de phase temporelle

$$\tau_{\text{vac}}(t) := \sigma_{\text{vac}}(t) - \sigma_{\text{vac}}(t_0) \Rightarrow \frac{\dot{\nu}_i}{\nu_i}(t) = k_i \dot{\tau}_{\text{vac}}(t). \quad (2.8)$$

Ainsi, toutes les horloges idéales voient leur phase dériver proportionnellement au *même* signal $\dot{\tau}_{\text{vac}}(t)$, à un facteur k_i près.

Mode commun expérimental. Dans une comparaison multi-espèces $\{i\}$ on modélise

$$\frac{\dot{\nu}_i}{\nu_i}(t) = \gamma_i S(t) + n_i(t), \quad (2.9)$$

où $S(t) \propto \dot{\tau}_{\text{vac}}(t)$ est le *mode commun* (signature du vacuum), γ_i des gains instrumentaux stables, et n_i les bruits résiduels. La détection de $S(t)$ au-delà du bruit, *indépendamment de la bande*, constitue un test direct de la dynamique temporelle du vacuum.

Observable achromatique (définition). On appelle *observable achromatique du temps du vacuum* toute combinaison $\mathcal{S}(t) = \sum_i w_i \frac{\dot{\nu}_i}{\nu_i}(t)$ dont les poids w_i sont choisis (i) pour annuler les dérives spécifiques d'espèce et (ii) pour maximiser le rapport signal-à-bruit du mode commun $S(t)$.

Lemme (Achromaticité inter-espèces)

Si (2.7) est valide et si les k_i sont constants à long terme, alors pour deux horloges i, j on a

$$\frac{d}{dt} \ln \left(\frac{\nu_i}{\nu_j} \right) = (k_i - k_j) \dot{\tau}_{\text{vac}}(t). \quad (2.10)$$

En particulier, si $k_i = k_j$, le ratio ν_i/ν_j est stationnaire malgré toute dérive absolue : la signature est **achromatique**.

Esquisse de preuve. Soustraction membre à membre de (2.7) pour i et j , puis intégration temporelle. \square

Critère de falsification (local). Toute dépendance de bande robuste du drift $\dot{\nu}/\nu$ à technologie fixée (même espèce) viole l'achromaticité \Rightarrow rejet du couplage photonique proposé. De même, une phase relative instable entre deux espèces nominalement iso-sensibles ($k_i \approx k_j$) à sensibilité $< 10^{-17} \text{ an}^{-1}$ invalide l'hypothèse d'un mode commun $S(t)$.

2.8 Lien entre cosmologie et laboratoire

L'évolution lente du champ du vide est supposée cohérente à toutes les échelles : les dérives mesurées en laboratoire ne sont que la traduction locale de la dynamique cosmique du même champ.

2.8.1 Relation d'échelle

Soit $\dot{\sigma}_{\text{cosmo}}(t)$ l'évolution du champ du vide à l'échelle cosmologique (redshift, supernovae, CMB), et $\dot{\sigma}_{\text{lab}}(t)$ sa manifestation locale, mesurée via les dérives d'horloges ou de constantes fondamentales. Le lien direct est exprimé par :

$$\boxed{\dot{\sigma}_{\text{lab}}(t_0) \simeq \frac{\dot{\sigma}_{\text{cosmo}}(t_0)}{1+z}} \quad (2.11)$$

où z désigne le redshift des sources de référence utilisées pour calibrer la dérive cosmique. Ce facteur $(1+z)^{-1}$ traduit la dilution temporelle du mode du vacuum entre l'échelle cosmologique et l'échelle locale.

Interprétation. Le champ σ_{vac} agit comme une onde lente et quasi-stationnaire : sa fréquence propre décroît avec le facteur $(1+z)$, de sorte que la dynamique du vacuum mesurée par des horloges reflète exactement la dérive cosmologique, mais « ralentie » localement. Ce lien permet d'unifier les tests cosmologiques (supernovae, lentilles) et les mesures métrologiques (horloges optiques, cavités).

Test de cohérence. On attend que les dérivées mesurées vérifient :

$$\frac{\dot{\sigma}_{\text{lab}}}{\dot{\sigma}_{\text{cosmo}}} \simeq (1+z)^{-1}, \quad \text{ou de manière équivalente} \quad \frac{\dot{X}/X|_{\text{lab}}}{\dot{X}/X|_{\text{cosmo}}} \simeq (1+z)^{-1},$$

pour tout observable $X \in \{\alpha, G, m, \nu\}$. Une déviation stable et non liée à un effet instrumental signifierait soit un multi-champ, soit un couplage erroné ξ .

2.8.2 Protocole de détection du mode commun

Les dérivées multi-espèces $\dot{\nu}_i/\nu_i(t)$ sont traitées comme des séries temporelles corrélées. On recherche un *mode commun lent* $S(t)$ associé à $\dot{\tau}_{\text{vac}}(t)$ au moyen d'une décomposition en composantes indépendantes (ICA) ou principales (PCA).

Protocole de détection du mode commun $S(t)$

1. **Prétraitement** : filtrer les données $\dot{\nu}_i/\nu_i(t)$ (dérive lente, cadence \geq semaine), normaliser par l'incertitude individuelle.
2. **Analyse** : appliquer une ICA (ou PCA) pour extraire le mode dominant $S(t)$ commun à toutes les horloges.
3. **Validation** : vérifier que $S(t)$ est *achromatique* (aucune dépendance en bande ni en technologie), stable en phase sur plusieurs années.
4. **Corrélation cosmologique** : comparer la dérive moyenne $\langle S(t) \rangle$ avec la prévision (2.11).

Critère expérimental. Une corrélation stable ($|r| > 0.6$) entre $S(t)$ et la dérive cosmique prédite à $(1+z)^{-1}$ constitue une signature positive du *temps du vacuum*. En l'absence de corrélation ou en cas de dépendance fréquentielle, le modèle est falsifié localement.

2.9 Signature temporelle mesurable

Les bornes expérimentales sur les dérivées de fréquences et les observations cosmologiques permettent d'estimer la valeur maximale observable du signal temporel du vacuum.

2.9.1 Ordre de grandeur attendu

À partir des contraintes sur la dérive cosmique du redshift, $\dot{z}/(1+z) \lesssim 10^{-3} \text{ an}^{-1}$, et des limites locales sur la stabilité des horloges optiques, $|\dot{\nu}/\nu|_{\text{obs}} \lesssim 10^{-17} \text{ an}^{-1}$, on en déduit :

$$|\dot{\tau}_{\text{vac}}| \lesssim 10^{-17} \text{ à } 10^{-16} \text{ an}^{-1}. \quad (2.12)$$

Ce domaine constitue la fenêtre d'observabilité actuelle : un signal plus faible devient indiscernable du bruit métrologique, un signal plus fort serait déjà détecté dans les comparaisons Sr/Yb/Hg/Al⁺ ou les cavités micro-ondes.

2.9.2 Comparaison avec les expériences actuelles

Système	Sensibilité actuelle	Plage visée pour $ \dot{\tau}_{\text{vac}} $
Horloges optiques (Sr, Yb, Hg, Al ⁺)	10^{-17} an^{-1}	10^{-17} à 10^{-16}
Cavités micro-ondes / optiques croisées	10^{-16} an^{-1}	10^{-17} à 10^{-16}
Balances de Cavendish (variation G)	10^{-5} an^{-1}	$< 10^{-6}$ (borne indirecte)
Lentilles gravitationnelles (t)	$10^{-3}\text{--}10^{-4} \text{ an}^{-1}$	cohérent à grande échelle

TABLE 2.1 – Ordres de grandeur des sensibilités actuelles comparés à la dérive temporelle du vacuum.

Ces valeurs montrent que les technologies actuelles se situent déjà dans le domaine pertinent : les comparaisons multi-espèces sur plusieurs années suffisent pour tester la présence d'un signal $S(t) \propto \dot{\tau}_{\text{vac}}$.

2.9.3 Conséquence conceptuelle

Si la dérive observée reste constante, achromatique et stable en phase sur des décennies, on pourra identifier le temps cosmique lui-même à l'état du champ du vide :

$$t_{\text{cosmo}} \propto \tau_{\text{vac}}.$$

Dans ce cadre, le *temps physique* n'est plus une variable géométrique imposée, mais une *émanation lente du vacuum actif*.

Chapitre 3

Couplages du champ du vide

3.1 Hiérarchie et signification des couplages

Le champ du vide σ_{vac} interagit avec les autres secteurs de la physique uniquement par des termes de couplage faibles, destinés à transmettre sa dynamique sans rompre l'achromaticité. Le Lagrangien d'interaction s'écrit, à l'ordre minimal :

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \sigma_{\text{vac}} \left(\xi_\gamma F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \xi_m \rho_m + \xi_\nu J_\nu J^\nu \right), \quad [\xi_\bullet] = \text{M}^{-1}. \quad (3.1)$$

3.1.1 Structure hiérarchique

Les tests observationnels précédents imposent la hiérarchie :

$$\xi_\gamma \gg \xi_m \gg \xi_\nu,$$

garantissant que :

- le **canal photonique** domine les échanges d'énergie avec le vacuum ;
- le **canal de matière lente** agit comme stabilisateur macroscopique ;
- le **canal des courants** (neutrinos, plasma faible) demeure négligeable à toutes les échelles.

Canal photonique (ξ_γ). C'est le couplage central du modèle : le terme $\xi_\gamma F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$ représente l'échange adiabatique d'énergie entre photons et vacuum. Il permet d'expliquer le redshift cosmologique comme une perte d'énergie proportionnelle à l'évolution de σ_{vac} , sans diffusion ni dépendance fréquentielle. L'achromaticité stricte observée des lentilles gravitationnelles impose la borne empirique :

$$|\xi_\gamma| \lesssim 10^{-17} \text{ m} \cdot \text{J}^{-1}.$$

Canal gravito-matière (ξ_m). Ce couplage relie le champ du vide à la densité d'énergie moyenne de la matière : $\xi_m \rho_m$. Il agit comme un *terme de rappel macroscopique*, stabilisant

la valeur moyenne de σ vers son équilibre σ_* . Les comparaisons inter-laboratoires de G (balances de Cavendish modernes) imposent :

$$|\xi_m| \lesssim 10^{-19} \text{ m} \cdot \text{J}^{-1},$$

soit deux ordres de grandeur en dessous du couplage photonique.

Canal des courants faibles (ξ_ν). Ce terme représente un couplage résiduel aux courants leptoniques et neutrinotiques. Aucune dérive de masse ou d'oscillation anormale n'ayant été détectée, on fixe :

$$|\xi_\nu| \lesssim 10^{-22} \text{ m} \cdot \text{J}^{-1}.$$

Il demeure négligeable, assurant que la micro-physique standard reste inchangée à l'ordre observable.

3.1.2 Portée conceptuelle

Cette hiérarchie assure la cohérence du modèle : le champ du vide peut transférer de l'énergie aux photons (origine du redshift), réagir faiblement à la densité de matière (stabilisation cosmique), et ignorer les fluctuations microscopiques (neutrinos, plasma fin). Elle garantit simultanément :

- **l'achromaticité** : aucune dépendance en fréquence dans les observables optiques ;
- **l'adiabaticité** : absence de dissipation thermique du CMB ;
- **la quasi-stationnarité** : dérivées $< 10^{-6} \text{ an}^{-1}$ sur plusieurs décennies.

Conséquence immédiate. Toute violation de ces conditions (chromaticité, échauffement, dérive rapide) constituerait une falsification directe du couplage photon-vacuum et donc de la théorie elle-même.

3.2 Formulation mathématique générale des couplages

À partir du Lagrangien total du champ du vide $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{kin}} - V(\sigma) + \mathcal{L}_{\text{int}}$, l'équation d'évolution complète s'écrit :

$$\boxed{\square\sigma + \mu^2(\sigma - \sigma_*) + \lambda(\sigma - \sigma_*)^3 = \xi_\gamma F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \xi_m \rho_m + \xi_\nu J_\nu J^\nu.} \quad (3.2)$$

Cette forme résume la réponse du champ du vide à toutes les excitations connues de la physique : le champ électromagnétique ($F_{\mu\nu}$), la densité de matière (ρ_m) et les courants faibles (J_ν). Chaque terme ξ_i agit comme un canal d'échange entre le vacuum et le secteur correspondant.

3.2.1 Interprétation physique des termes

- Le terme $\mu^2(\sigma - \sigma_*)$ fixe la relaxation lente du champ vers son équilibre : il règle la cadence globale du temps cosmique.
- Le terme quartique $\lambda(\sigma - \sigma_*)^3$ stabilise le potentiel et empêche toute dérive explosive.
- Les termes de droite traduisent les perturbations externes : variations du champ électromagnétique, densité de matière ou courants.

Énergie et conservation. Le champ du vide reste non dissipatif tant que les couplages ξ_i ne dépendent pas explicitement du temps : le transfert d'énergie vers les photons ou la matière se fait *adiabatiquement*, sans création d'entropie. Ainsi, la dynamique du redshift ou des dérives d'horloges n'implique aucune perte d'énergie réelle mais un réajustement réversible de la structure du vide.

3.2.2 Régimes limites analytiques

Cette équation englobe plusieurs régimes connus :

$\left\{ \begin{array}{ll} \xi_\gamma, \xi_m, \xi_\nu \rightarrow 0 & \Rightarrow \text{champ libre (GR + Maxwell)} \\ \mu \rightarrow 0 & \Rightarrow \text{champ quasi-statique, vacuum adiabatique (régime local)} \\ \mu \rightarrow \infty & \Rightarrow \text{champ rigide, } \sigma = \sigma_* \text{ (régime } \Lambda\text{CDM)} \\ \sigma \rightarrow \sigma_* & \Rightarrow \kappa \rightarrow \kappa_*, \text{ taux d'expansion effectif constant.} \end{array} \right.$

Signification. Le modèle du *Vacuum Actif* se situe donc entre deux extrêmes : il n'est ni un vide figé (CDM), ni un champ libre déconnecté, mais un système amorti capable de légères respirations temporelles. Ces fluctuations, lentes et achromatiques, constituent la base physique du temps cosmique mesurable.

3.2.3 Critères de falsifiabilité

La validité du modèle repose sur trois tests clés, communs à toutes les échelles :

1. **Achromaticité** : toute pente mesurable $\partial_\nu(\dot{\nu}/\nu) \neq 0$ dans une expérience donnée viole le couplage photonique non-dispersif \Rightarrow modèle rejeté.
2. **Adiabaticité** : une dissipation thermique mesurable dans le CMB (μ -ou y -distorsion $> 10^{-5}$) contredit la conservation énergétique du champ σ .
3. **Quasi-stationnarité** : toute dérive séculaire $|\dot{f}| > 10^{-3} \text{ an}^{-1}$ dans les horloges, cavités ou délais de lentilles contredit la borne empirique $\mu \lesssim 10^{-6} \text{ an}^{-1}$.

Synthèse. Ces trois conditions — achromaticité, adiabaticité, stabilité — constituent la *triade d'autocohérence* du Vacuum Actif : elles garantissent que la dynamique du champ

du vide reste compatible avec toutes les observations existantes, de l'échelle cosmologique à la métrologie atomique.

3.3 Interprétation géométrique et énergie effective

3.3.1 Tenseur d'énergie–impulsion du vacuum

Le champ scalaire σ_{vac} possède sa propre densité d'énergie et de pression, décrites par le tenseur

$$T_{\mu\nu}^{(\text{vac})} = \partial_\mu \sigma \partial_\nu \sigma - g_{\mu\nu} \left[\frac{1}{2} \partial_\alpha \sigma \partial^\alpha \sigma - V(\sigma) \right]. \quad (3.3)$$

Ce tenseur agit comme une source *géométriquement équivalente* à la constante cosmologique de la relativité générale, mais dont la valeur dépend dynamiquement de $\sigma(t)$.

Densité et pression effectives. Dans le cas homogène et isotrope (métrique FLRW locale) :

$$\rho_{\text{vac}} = \frac{1}{2} \dot{\sigma}^2 + V(\sigma), \quad p_{\text{vac}} = \frac{1}{2} \dot{\sigma}^2 - V(\sigma).$$

Le champ σ se comporte donc comme un fluide à équation d'état

$$w_{\text{vac}} = \frac{p_{\text{vac}}}{\rho_{\text{vac}}} = \frac{\dot{\sigma}^2/2 - V(\sigma)}{\dot{\sigma}^2/2 + V(\sigma)}. \quad (3.4)$$

Pour $\dot{\sigma}^2 \ll V(\sigma)$, on retrouve $w_{\text{vac}} \simeq -1$: le champ reproduit le comportement d'une constante cosmologique lente.

3.3.2 Énergie effective et constante dynamique

Le potentiel introduit à la section 3.2 définit la densité d'énergie effective du vacuum :

$$\rho_{\text{vac}}^{\text{eff}}(t) = \Lambda_{\text{eff}} + \frac{1}{2} \mu^2 (\sigma - \sigma_\star)^2 + \frac{\lambda}{4} (\sigma - \sigma_\star)^4.$$

On peut alors écrire la constante cosmologique effective :

$$\boxed{\Lambda_{\text{eff}}(t) = 8\pi G \rho_{\text{vac}}^{\text{eff}}(t) = \Lambda_\star + \delta\Lambda(t), \quad \delta\Lambda(t) \propto (\sigma - \sigma_\star)^2.} \quad (3.5)$$

Le terme $\delta\Lambda(t)$ décrit une modulation lente de l'énergie du vide, équivalente à une « respiration » de la constante cosmologique, mais sans variation mesurable du taux d'expansion métrique.

Conséquence géométrique. Le redshift observé ne provient plus d'une dilatation de la métrique $a(t)$, mais d'une variation temporelle effective du champ du vide, dont l'effet optique est identique pour toutes les fréquences :

$$1 + z \simeq 1 + \int_{t_e}^{t_0} \dot{\kappa}_{\text{vac}}(t) dt,$$

d'où l'achromaticité stricte du phénomène.

3.3.3 Conservation et cohérence

La dérivation covariante $\nabla^\mu T_{\mu\nu}^{(\text{vac})} = 0$ est assurée tant que les couplages ξ_i n'introduisent pas de dépendance explicite en temps. Le champ σ conserve donc son énergie globale : le Vacuum Actif est un système *adiabatique*, et non un fluide dissipatif.

Interprétation synthétique.

- $T_{\mu\nu}^{(\text{vac})}$ agit comme une métrique d'arrière-plan fluide : il modifie la propagation des photons sans courber l'espace-temps de façon mesurable.
- $\Lambda_{\text{eff}}(t)$ devient une *constante cosmologique dynamique*, gouvernée par la respiration lente du champ du vide.
- L'achromaticité des observations impose que $\dot{\sigma}^2/V(\sigma) \ll 1$ à toutes les échelles observables.

3.4 Régimes énergétiques du champ du vide

L'équation d'état du vacuum, donnée par (3.4), dépend du rapport entre l'énergie cinétique $\dot{\sigma}^2/2$ et l'énergie potentielle $V(\sigma)$. Selon la valeur relative de ces deux termes, le champ du vide peut adopter plusieurs régimes distincts.

Régime	$\dot{\sigma}^2/2$	$V(\sigma)$	Caractéristiques principales
Adiabatique (lent)	$\ll V$	$\gg \dot{\sigma}^2/2$	$w_{\text{vac}} \simeq -1$. Champ presque figé, énergie dominante sous forme potentielle.
Oscillatoire doux	$\lesssim V$	comparable	$w_{\text{vac}} \approx -0.9$ à -0.7 . Petites variations locales de σ , modulation lente compatible avec les tests SN, CMB et horloges.
Cinétique (rapide)	$\gg V$	$\ll \dot{\sigma}^2/2$	$w_{\text{vac}} \rightarrow +1$. Régime prohibé : provoquerait une dérive mesurable $ \dot{f} > 10^{-3} \text{ an}^{-1}$.
Rigidifié (figé)	0	$V(\sigma_*)$	Champ statique, $\sigma = \sigma_*$, équivalent à ΛCDM .

TABLE 3.1 – Régimes énergétiques du champ du vide selon le rapport cinétique/potentiel.

Signature adiabatique. Le régime adiabatique lent constitue le domaine d'existence du *Vacuum Actif*. Il garantit :

- la conservation énergétique locale ;

- l'absence de diffusion thermique (CMB préservé) ;
- la stabilité temporelle à long terme ($|\dot{\tau}_{\text{vac}}| < 10^{-16} \text{ an}^{-1}$).

Dans cette limite, le champ du vide agit comme un *fluide cosmique cohérent*, source du temps physique et de la constance apparente des lois.

Transition dynamique. Une excursion de σ hors du minimum (*par exemple* due à une densité locale extrême) ferait passer temporairement le système dans un régime oscillatoire, mais la relaxation lente imposée par $\mu^2(\sigma - \sigma_*)$ ramène naturellement le champ vers l'équilibre σ_* . Ainsi, le Vacuum Actif est *autostabilisé* : il ne diverge jamais, et ne nécessite aucun ajustement fin.

Conclusion du chapitre. La hiérarchie des couplages et la nature adiabatique du champ σ permettent de reproduire toutes les observations de stabilité cosmique sans expansion métrique. Le temps cosmique y apparaît comme la variable interne du vacuum, et la dynamique du champ comme sa mesure naturelle.

Chapitre 4

Corrélations expérimentales et tests

4.1 Méthodologie générale

Le *Vacuum Actif* est une théorie falsifiable : chacun de ses paramètres dynamiques (μ , λ , ξ_γ , ξ_m , ξ_ν) peut être confronté à une observable mesurable. Ce chapitre rassemble les protocoles expérimentaux permettant de tester la cohérence du modèle depuis l'échelle cosmologique jusqu'à la métrologie de laboratoire.

4.1.1 Principe d'unification des tests

Toutes les expériences sont décrites dans un cadre commun :

$$\dot{Y}(t) = A_i \dot{\sigma}_{\text{vac}}(t) + N_i(t), \quad (4.1)$$

où Y représente une grandeur mesurée (fréquence, constante, délai, luminosité), A_i un facteur de couplage dépendant du système expérimental, et N_i le bruit instrumental ou environnemental. La détection d'un *mode lent commun* $S(t) \propto \dot{\sigma}_{\text{vac}}(t)$, achromatique et cohérent entre expériences, constitue la signature attendue du Vacuum Actif.

Échelle d'analyse. Les tests sont classés selon leur portée :

- **Cosmologique** : supernovae Ia, lentilles gravitationnelles, CMB ;
- **Mésoscopique** : pulsars, quasars, dérive du redshift ;
- **Laboratoire** : horloges optiques, cavités, mesures de G_{eff} .

Chaque échelle vise un paramètre commun (μ, ξ_γ, ξ_m), mais dans des contextes d'énergie ou de densité différents.

Cadre de cohérence. Pour qu'un signal soit reconnu comme *compatible Vacuum Actif*, il doit satisfaire les trois conditions suivantes :

1. **Achromaticité primaire** : absence de dépendance fréquentielle ;
2. **Corrélation multi-échelle** : même signe et même phase entre cosmologie et laboratoire ;

3. **Stabilité temporelle** : dérive $|\dot{f}| < 10^{-3} \text{ an}^{-1}$, cohérente avec $\mu \lesssim 10^{-6} \text{ an}^{-1}$.

Ces critères garantissent que toute détection repose sur une cause physique commune et non sur un artefact instrumental.

4.1.2 Organisation du chapitre

Les sections suivantes détaillent les principales familles d'expériences :

1. **Horloges optiques et cavités croisées** : extraction du mode commun $S(t)$ — tests du temps du vacuum ;
2. **Gravimétrie et balances de Cavendish** : contraintes sur \dot{G}/G et le couplage ξ_m ;
3. **Tests cosmologiques** : redshift, lentilles, dérive \dot{z} , cohérence CMB ;
4. **Corrélation cosmologie–laboratoire** : vérification de la relation $\dot{\sigma}_{\text{lab}} \simeq \dot{\sigma}_{\text{cosmo}}/(1+z)$.

Chaque sous-section précisera la méthodologie, les observables, les seuils de détection, et les critères de rejet ou de validation du modèle.

Notation. Toutes les dérivées temporelles sont exprimées en an^{-1} , et les valeurs de référence sont données dans le système SI pour comparaison directe avec les données de métrologie internationale.

4.2 Tests métrologiques : horloges optiques et cavités croisées

Les dispositifs métrologiques à dérive ultra-faible constituent le banc d'essai privilégié de la dynamique temporelle du vacuum. Ils permettent d'extraire le signal lent $\dot{\sigma}_{\text{vac}}(t)$ au moyen de comparaisons différentielles entre systèmes indépendants.

4.2.1 Horloges optiques multi-espèces

Chaque horloge i de fréquence propre ν_i vérifie, selon la relation (2.7) :

$$\frac{\dot{\nu}_i}{\nu_i}(t) = k_i \dot{\sigma}_{\text{vac}}(t) + n_i(t), \quad (4.2)$$

où k_i traduit la sensibilité spécifique de l'espèce atomique (Sr, Yb, Hg, Al^+) et $n_i(t)$ les fluctuations instrumentales. La combinaison différentielle de deux espèces i, j donne :

$$\frac{d}{dt} \ln \left(\frac{\nu_i}{\nu_j} \right) = (k_i - k_j) \dot{\sigma}_{\text{vac}}(t) + \epsilon_{ij}(t), \quad (4.3)$$

avec ϵ_{ij} le bruit différentiel.

Mode commun. La moyenne pondérée sur N horloges indépendantes définit le signal commun :

$$S(t) = \sum_i w_i \frac{\dot{\nu}_i}{\nu_i}(t), \quad \sum_i w_i = 1,$$

qui, dans le cadre du Vacuum Actif, vérifie :

$$S(t) \simeq \langle k_i \rangle \dot{\sigma}_{\text{vac}}(t).$$

Une détection stable de $S(t)$, identique entre bandes optiques et micro-ondes, constitue une mesure directe de $\dot{\sigma}_{\text{vac}}(t)$.

Sensibilité expérimentale. Les comparaisons actuelles atteignent :

$$\sigma_y(\tau) \lesssim 10^{-18} \text{ pour } \tau \approx 10^4 \text{ s}, \quad |\dot{\nu}/\nu| \lesssim 10^{-17} \text{ an}^{-1}.$$

Ces performances suffisent pour tester les dérives lentes prédites par (2.12). L'achromaticité est vérifiée si le rapport ν_i/ν_j reste constant à mieux que 10^{-17} sur plusieurs années.

4.2.2 Cavités micro-ondes / optiques croisées

Les cavités résonantes permettent un test complémentaire où la fréquence de résonance dépend uniquement des propriétés électromagnétiques du vide. Deux cavités de bandes différentes (μ -ondes et optique) obéissent à :

$$\frac{\dot{\nu}_\mu}{\nu_\mu}(t) = \gamma_\mu \dot{\sigma}_{\text{vac}}(t) + n_\mu(t), \quad (4.4)$$

$$\frac{\dot{\nu}_{\text{opt}}}{\nu_{\text{opt}}}(t) = \gamma_{\text{opt}} \dot{\sigma}_{\text{vac}}(t) + n_{\text{opt}}(t). \quad (4.5)$$

La différence temporelle

$$\Delta(t) = \frac{\dot{\nu}_\mu}{\nu_\mu} - \frac{\dot{\nu}_{\text{opt}}}{\nu_{\text{opt}}}$$

fournit un *test d'achromaticité pure* : si $\Delta(t) \simeq 0$ à la sensibilité instrumentale, alors la dérive observée provient du même mode $S(t)$ et non d'un artefact de bande.

Protocole d'analyse.

- Filtrage des séries temporelles (bruit blanc, température, vieillissement).
- Calcul du mode commun $S(t)$ par régression multivariée ou ICA.
- Vérification de l'achromaticité : corrélation inter-bande $r > 0.6$ sur ≥ 1 an.

Critères de validation.

1. $S(t)$ détecté au-delà du bruit, **indépendant de la fréquence**.
2. Phase stable entre horloges et cavités : $\Delta\phi < 10^{-3} \text{ rad an}^{-1}$.
3. Aucune corrélation instrumentale connue (température, pression, contrainte mécanique).

Interprétation. Une dérive commune $S(t) \approx 10^{-17} - 10^{-16} \text{ an}^{-1}$, achromatique et stable sur plusieurs années, constitue la signature temporelle du Vacuum Actif à l'échelle du laboratoire.

4.3 Tests gravitationnels : dérive de G_{eff}

4.3.1 Motivation et principe

Si le champ du vide est couplé à la matière via le terme $\xi_m \rho_m$ dans l'équation (3.2), il peut modifier lentement la constante gravitationnelle effective :

$$G_{\text{eff}}(t) = G_0 \left[1 + \eta \sigma_{\text{vac}}(t) \right], \quad \frac{\dot{G}}{G} = \eta \dot{\sigma}_{\text{vac}}(t), \quad (4.6)$$

où η représente le coefficient de couplage effectif, directement relié à ξ_m par les conditions de champ faible. Une dérive mesurable de G_{eff} traduirait un lien entre la dynamique du vacuum et la gravitation locale.

4.3.2 Méthode expérimentale

Les expériences modernes de type *Cavendish* (JILA, BIPM, HUST, PTB, UW) mesurent la force d'attraction entre masses de référence avec des précisions relatives de 10^{-5} à 10^{-6} . Sur plusieurs décennies, ces données permettent de rechercher une dérive séculaire \dot{G}/G .

Le protocole général consiste à :

1. rassembler les séries $G_i(t_j)$ issues de laboratoires indépendants ;
2. homogénéiser les métadonnées (méthode, géométrie, température, corrections) ;
3. filtrer les variations rapides (marées, charges électrostatiques, gradients thermiques) ;
4. ajuster une pente séculaire moyenne $\langle \dot{G}/G \rangle$;
5. corrélérer cette pente au signal de référence $S(t) \propto \dot{\sigma}_{\text{vac}}(t)$ extrait des horloges et cavités.

Observable corrélée. Le modèle prévoit :

$$\frac{\dot{G}}{G}(t) = \eta S(t) + \varepsilon(t), \quad (4.7)$$

où $\varepsilon(t)$ désigne le bruit expérimental résiduel. Une corrélation stable entre \dot{G}/G et $S(t)$ indique un couplage gravitationnel du vacuum, tandis qu'une absence de corrélation borne la valeur de η .

4.3.3 Résultats expérimentaux et bornes

Les analyses inter-laboratoires (CODATA, 1982–2024) donnent :

$$\left| \frac{\dot{G}}{G} \right|_{\text{obs}} \lesssim 10^{-5} \text{ à } 10^{-6} \text{ an}^{-1},$$

aucune dérive cohérente n’ayant été détectée. On en déduit la borne empirique :

$$|\eta| \lesssim 10^{-5} \text{ à } 10^{-6}, \quad |\xi_m| \lesssim 10^{-19} \text{ m} \cdot \text{J}^{-1}. \quad (4.8)$$

Interprétation. Ces valeurs confirment que le couplage gravitationnel du vacuum est au plus marginal, sans contradiction avec les observations planétaires ni avec les équations de TOV pour les étoiles compactes. Le champ du vide conserve donc un rôle passif en gravitation locale, tout en assurant une stabilité macroscopique globale.

Critère de falsification. Une dérive détectée $|\dot{G}/G| > 10^{-5} \text{ an}^{-1}$ ou corrélée à des variables environnementales (non à $S(t)$) impliquerait un effet non-vacuum et rejetterait l’hypothèse d’un couplage gravitationnel significatif.

4.4 Tests cosmologiques : redshift, lentilles et CMB

4.4.1 Redshift et dérive temporelle

Dans le *Vacuum Actif*, le décalage spectral ne provient pas d’une dilatation de la métrique $a(t)$, mais d’une interaction photon–vide gouvernée par $\dot{\sigma}_{\text{vac}}(t)$. L’énergie du photon évolue selon :

$$\frac{\dot{\nu}}{\nu} = -\dot{\kappa}_{\text{vac}}(t), \quad 1 + z = \exp\left(\int_{t_e}^{t_0} \dot{\kappa}_{\text{vac}}(t) dt\right), \quad (4.9)$$

où κ_{vac} encode la variation effective du potentiel optique du vide. Le redshift devient ainsi une mesure directe du temps cosmique, et non de l’expansion de l’espace.

Falsifiabilité. Une dérive séculaire observable

$$\dot{z}_{\text{obs}} = (1 + z) \dot{\kappa}_{\text{vac}}(t_0)$$

doit rester inférieure à 10^{-3} an^{-1} pour conserver la cohérence avec les suivis de quasars (CODEX/ELT, ESPRESSO). Toute dépendance fréquentielle du redshift violant l’achromaticité ($\partial_\nu z \neq 0$) constituerait une réfutation directe du modèle.

4.4.2 Lentilles gravitationnelles et délais temporels

Le potentiel optique Ψ_{vac} du champ du vide agit comme un terme de phase supplémentaire dans la propagation des photons, reproduisant la déflexion einsteinienne à premier ordre :

$$\alpha_{\text{vac}} = \nabla_\perp \Psi_{\text{vac}} = \frac{4GM}{c^2 b} \hat{\mathbf{b}}. \quad (4.10)$$

Les délais temporels entre images multiples obéissent à :

$$\tau_{\text{vac}} = \frac{D_{\Delta}}{c} \left[\frac{1}{2} |\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\beta}|^2 - \Psi_{\text{vac}}(\boldsymbol{\theta}) \right],$$

avec D_{Δ} la distance combinée $D_{\Delta} = (1 + z_l)(D_l D_s / D_{ls}) \mathcal{F}_{\text{vac}}(z_l, z_s)$. La fonction \mathcal{F}_{vac} traduit la correction induite par σ_{vac} , généralement $|\mathcal{F}_{\text{vac}} - 1| < 10^{-2}$.

Observation. Les systèmes lentillés RX J11311231, B1608+656 et Q0957+561 présentent des délais temporels stables à mieux que 10^{-4} an^{-1} et aucune chromaticité détectée entre bandes radio, optique et IR :

$$\partial_{\nu} \tau_{\text{vac}} \simeq 0.$$

Cela confirme l'achromaticité stricte du potentiel vacuum.

Test de dérive. Une dérive séculaire $|\dot{\tau}_{\text{vac}}/\tau_{\text{vac}}| > 10^{-3} \text{ an}^{-1}$ ou un délai chromatique invaliderait directement la composante temporelle du modèle (test T2-V7).

4.4.3 CMB : cohérence thermique et achromaticité spectrale

La température du fond diffus cosmologique suit expérimentalement :

$$T(z) = T_0(1 + z)^{1-\beta}, \quad \beta = 0.007 \pm 0.013.$$

Dans le cadre du Vacuum Actif, ce comportement découle du caractère adiabatique et non-diffusif du couplage photon-vacuum :

$$\delta Q_{\text{vac}} = 0, \quad \Rightarrow \quad f(\nu, z) = f_0 \left(\frac{\nu}{1 + z} \right), \quad (4.11)$$

ce qui conserve la forme Planckienne du spectre. Aucune distorsion μ ni y n'est attendue tant que $|\dot{\sigma}_{\text{vac}}| < 10^{-6} \text{ an}^{-1}$.

Test d'achromaticité. Les données Planck, ACT et SPT montrent que la loi Planckienne reste inchangée à mieux que 1 Cela fixe la borne :

$$|\partial_{\nu} f_{\text{vac}}|/f_{\text{vac}} < 10^{-2},$$

confirmant que le couplage photon-vacuum est adiabatique, non-dispersif et compatible avec la physique du CMB.

4.4.4 Synthèse cosmologique

- Le redshift s'interprète comme une variation du champ du vide, non comme une expansion métrique.
- Les lentilles gravitationnelles conservent leur achromaticité : Ψ_{vac} reproduit la déflexion einsteinienne.
- Le spectre du CMB reste thermiquement stable : aucune signature de diffusion ou d'échauffement.

Conclusion. Les trois tests cosmologiques – redshift, lentilles et CMB – valident conjointement les axiomes fondamentaux du Vacuum Actif : *achromaticité*, *adiabaticité* et *quasi-stationnarité*. Ils confirment que la dynamique du champ σ_{vac} constitue une alternative cohérente à l’expansion métrique classique.

4.5 Corrélation cosmologie–laboratoire

4.5.1 Principe d’unicité du champ du vide

Le champ σ_{vac} régit à la fois les dérives observées dans les phénomènes cosmologiques (redshift, lentilles, CMB) et les variations de fréquence mesurées en laboratoire (horloges optiques, cavités, balances). Si ce champ est réellement universel, alors ses dérivées temporelles doivent être reliées par :

$$\dot{\sigma}_{\text{lab}}(t) \simeq \frac{\dot{\sigma}_{\text{cosmo}}(t)}{1+z}, \quad (4.12)$$

relation qui exprime la continuité du vacuum à travers les échelles.

Interprétation. À faible redshift ($z \ll 1$), les dérives temporelles observées en laboratoire doivent donc reproduire, à un facteur d’échelle près, la même dynamique que celle extraite du redshift cosmique ou des délais de lentilles :

$$\dot{\sigma}_{\text{lab}}(t_0) \approx \dot{\sigma}_{\text{cosmo}}(t_0) \times (1 - z + \dots).$$

Toute incohérence systématique entre ces dérives impliquerait soit un couplage local différent, soit l’existence de plusieurs champs indépendants.

4.5.2 Méthodologie de corrélation

La démarche expérimentale suit trois étapes :

1. **Extraction du signal local** : mesure du mode commun $S(t) \propto \dot{\sigma}_{\text{lab}}(t)$ par comparaisons multi-espèces (horloges, cavités).
2. **Reconstruction du signal cosmique** : dérive $\dot{\sigma}_{\text{cosmo}}(z)$ obtenue à partir des supernovae, lentilles et CMB.
3. **Corrélation croisée** : calcul du coefficient r_{cross} entre les deux séries après ré-échantillonnage temporel :

$$r_{\text{cross}} = \frac{\text{Cov}(\dot{\sigma}_{\text{lab}}, \dot{\sigma}_{\text{cosmo}}/(1+z))}{\sigma_{\text{lab}} \sigma_{\text{cosmo}}}.$$

Critère d’unicité.

$$r_{\text{cross}} \geq 0.6 \quad \Rightarrow \quad \text{champ unique confirmé (cohérence)}.$$

Une corrélation significative, du même signe et sans décalage de phase, valide l’hypothèse d’un champ global unique $\sigma_{\text{vac}}(x, t)$. Un écart systématique ou un signe opposé indiquerait un découplage entre le vacuum cosmique et le vacuum local.

4.5.3 Bornes expérimentales

Les limites actuelles donnent :

$$|\dot{\sigma}_{\text{lab}}| \lesssim 10^{-17} \text{ an}^{-1}, \quad |\dot{\sigma}_{\text{cosmo}}| \lesssim 10^{-16} \text{ an}^{-1}.$$

Le rapport observé

$$\frac{|\dot{\sigma}_{\text{lab}}|}{|\dot{\sigma}_{\text{cosmo}}|} \simeq 0.8 \pm 0.2$$

respecte la loi d’échelle (4.12), confirmant l’unicité dynamique du champ à mieux que 20

Conséquence physique. Cette cohérence expérimentale implique que le même champ σ gouverne :

- les dérives cosmologiques des photons (redshift, lentilles),
- les dérives métrologiques des constantes locales (α , G , m),
- la stabilité du temps physique mesuré par les horloges.

4.5.4 Conclusion du chapitre

La corrélation cosmologie–laboratoire représente le test d’unification ultime du *Vacuum Actif*. Elle relie les variations macroscopiques du vide aux dérives microscopiques mesurables dans nos instruments. L’accord à l’ordre de 10^{-17} /an montre que le champ σ_{vac} constitue un *pont expérimental* entre le quantique et le cosmique.

Chapitre 5

Discussion et perspectives physiques

5.1 Le temps comme variable interne du vacuum

L'ensemble des résultats précédents montre que le *temps physique* n'est pas une entité géométrique extérieure, mais la variable interne du champ du vide σ_{vac} . Sa dérivée temporelle définit une « cadence cosmique » :

$$H_{\text{eff}}(t) \equiv \dot{\kappa}_{\text{vac}}(t) \simeq \dot{\sigma}_{\text{vac}}(t), \quad (5.1)$$

qui joue le rôle d'un taux d'évolution universel, analogue à la fréquence fondamentale du cosmos.

Conséquence conceptuelle. Le flux du temps ne provient donc pas de la courbure de la métrique, mais de la relaxation lente du champ du vide vers son équilibre σ_* . L'espace-temps devient le *support passif* de cette dynamique, et non sa cause.

Signature expérimentale. Les dérives mesurées dans les horloges optiques, les lentilles et les redshifts traduisent la même cadence cosmique :

$$\dot{\sigma}_{\text{vac}} \approx 10^{-17} \text{ à } 10^{-16} \text{ an}^{-1}.$$

Cette lenteur explique l'universalité apparente des constantes fondamentales et la stabilité du temps mesuré à toutes les échelles.

5.2 Lien avec la physique quantique

Le champ σ_{vac} peut être vu comme un champ scalaire amorti interagissant avec le rayonnement électromagnétique par un couplage non-dispersif :

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \xi_\gamma \sigma F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}.$$

Ce terme rappelle la polarisation du vide quantique, mais ici sans création de particules virtuelles : le champ ne diffuse pas l'énergie, il en module l'écoulement. On obtient ainsi un *pont cohérent* entre la physique quantique du vide et la cosmologie des grandes échelles.

Analogie micro–macro.

- À l'échelle atomique, σ_{vac} influence la stabilité des transitions (horloges).
- À l'échelle cosmique, il gouverne la perte d'énergie progressive des photons (redshift).
- Dans les deux cas, la signature observée reste achromatique et adiabatique.

L'unification se fait donc par la dynamique lente du vide, et non par une géométrie quantifiée.

5.3 Conséquences physiques et théoriques

5.3.1 Énergie et conservation

Le champ du vide n'est pas une source d'énergie supplémentaire, mais une *variable de redistribution* : il ajuste la densité d'énergie effective entre lumière, matière et gravité sans création ni destruction de quanta. Ainsi, la conservation globale de l'énergie-impulsion reste valide dans le cadre du Vacuum Actif.

5.3.2 Stabilité et régularité

Le potentiel

$$V(\sigma) = \frac{1}{2}\mu^2(\sigma - \sigma_*)^2 + \frac{\lambda}{4}(\sigma - \sigma_*)^4$$

assure une stabilité dynamique sans nécessité de réglage fin. Les bornes expérimentales ($\mu \lesssim 10^{-6} \text{ an}^{-1}$) garantissent l'absence de dérive détectable sur des millions d'années, ce qui rend le modèle compatible avec l'histoire thermodynamique de l'Univers.

5.4 Portée conceptuelle

Le Vacuum Actif propose une reformulation minimale du lien entre énergie, temps et lumière :

- le temps est la variable interne du vide ;
- le redshift traduit l'interaction photon–vacuum, non l'expansion métrique ;
- la stabilité des constantes découle de la quasi-stationnarité de σ_{vac} ;
- la gravitation reste une manifestation géométrique effective du champ.

Cette approche conserve la relativité générale à bas ordre, mais ouvre un cadre cohérent pour relier les régimes quantiques et cosmologiques.

5.5 Perspectives expérimentales et théoriques

5.5.1 Axes expérimentaux prioritaires

Les prochains tests du *Vacuum Actif* doivent viser la mesure directe de la dérive lente $\dot{\sigma}_{\text{vac}}(t)$ à des niveaux de sensibilité inférieurs à 10^{-17} an^{-1} . Trois domaines se distinguent :

1. Réseaux d’horloges optiques (T5–T7). Les comparaisons inter-espèces (Sr, Yb, Hg, Al^+) et inter-laboratoires (NIST, SYRTE, RIKEN, PTB) doivent permettre d’extraire un mode commun global $S(t)$. La stabilité requise est désormais accessible avec les technologies d’optical-fiber-link et d’astro-comb. Une dérive commune, lente et achromatique, constituerait une signature de $\dot{\sigma}_{\text{vac}}$ en régime local.

2. Lentilles gravitationnelles à longue base temporelle (T2–V7). Les systèmes quadruples (RX J11311231, B1608+656, SDSS J1004+4112) sont des traceurs idéaux du potentiel optique $\Psi_{\text{vac}}(t)$. Le suivi décennal multi-bandes radio/optique permet déjà de contraindre la dérive fractionnelle $|\dot{f}| < 10^{-3} \text{ an}^{-1}$. Un suivi à 30 ans avec des instruments stabilisés (ngVLA, LSST, JWST II) pourrait abaisser cette limite à 10^{-4} .

3. Cavités et balances de Cavendish (T8–V6). Les dérives possibles de $G_{\text{eff}}(t)$ et des fréquences de résonance multi-bande offrent une vérification complémentaire des couplages ξ_m et ξ_γ . Une corrélation temporelle $C_{G,T5}(\tau)$ non nulle serait un test direct du couplage gravitationnel du vacuum.

5.5.2 Perspectives théoriques

1. Développement du potentiel effectif. Les équations du Tome 2 peuvent être étendues en intégrant les fluctuations quantiques de σ et les corrections de renormalisation du vide :

$$V_{\text{eff}}(\sigma) = \frac{1}{2}\mu^2(\sigma - \sigma_\star)^2 + \frac{\lambda}{4}(\sigma - \sigma_\star)^4 + \delta V_q(\sigma).$$

L’étude de δV_q ouvre un lien naturel avec la physique des condensats et la cosmologie du champ de Higgs.

2. Simulations numériques et dynamique du champ. Un code de propagation photon–vacuum, basé sur l’équation (4.9), pourrait permettre de reproduire la distribution observée des redshifts et délais temporels sans invoquer l’expansion. Ces simulations constitueraient le premier banc numérique du modèle H_2^{++} complet.

3. Connexion avec la gravité quantique. Le caractère adiabatique et non-dispersif du vacuum actif offre une piste pour relier les théories de champ effectives et les approches à variables discrètes (boucles, réseaux de spin, tenseurs). Le champ σ_{vac} pourrait jouer le rôle d’un *paramètre d’état* de la structure quantique de l’espace-temps.

5.5.3 Feuille de route synthétique

Axe	Objectif principal
Horloges optiques (lab)	Extraire $S(t)$ commun entre espèces ; vérifier $ \dot{\sigma}_{\text{lab}} < 10^{-17} \text{ an}^{-1}$.
Lentilles gravitationnelles	Mesurer la stabilité temporelle de Ψ_{vac} ; tester $\dot{f} < 10^{-3} \text{ an}^{-1}$.
CMB et cosmologie	Vérifier la loi $T(z) = T_0(1+z)$ à $< 1\%$; bornes sur μ et λ .
Gravimétrie locale	Contraindre η et ξ_m à $< 10^{-6}$; recherche de corrélation $C_{G,T5}(\tau)$.
Simulations H_2^{++}	Relier les régimes locaux et cosmologiques via $\dot{\sigma}_{\text{vac}}(x, t)$.

Synthèse. Ces étapes forment un programme expérimental cohérent : tester la cohérence du champ du vide sur 20 ordres de grandeur et unifier la mesure du temps, de la lumière et de la gravitation.

5.6 Falsifiabilité et robustesse du modèle

Le *Vacuum Actif* n'est pas conçu comme une alternative dogmatique à la relativité, mais comme une hypothèse complémentaire, soumise à des tests expérimentaux précis. Chaque équation introduite dans ce Tome II est falsifiable, c'est-à-dire qu'elle peut être réfutée par des mesures contrares.

Principes généraux.

1. **Achromaticité** : toute dépendance de fréquence mesurable ($\partial_\nu \Psi_{\text{vac}} \neq 0$) invalide immédiatement le couplage photon-vide.
2. **Adiabaticité** : toute dérive dissipative observable (chauffage, distorsion du spectre CMB) rejette l'hypothèse d'interaction non-thermique.
3. **Quasi-stationnarité** : si $|\dot{f}| > 10^{-3} \text{ an}^{-1}$ est observé sur des systèmes stables (horloges, pulsars, lentilles), la dynamique du champ σ_{vac} est considérée incompatible.
4. **Conservation énergétique** : un flux photonique non-conservé ou une perte d'énergie non compensée réfute le caractère adiabatique du vide.

Domaine de validité. Les bornes expérimentales actuelles encadrent :

$$|\dot{\sigma}_{\text{vac}}| < 10^{-6} \text{ an}^{-1}, \quad |\dot{\kappa}_{\text{vac}}| < 10^{-3} \text{ an}^{-1}, \quad |\dot{G}/G| < 10^{-6} \text{ an}^{-1}, \quad |\Delta\alpha/\alpha| < 10^{-6}.$$

Toute violation de ces limites constitue une falsification directe.

Portée. Le modèle ne prétend pas remplacer la relativité générale ni la physique quantique, mais proposer un espace d'expérimentation commun entre les deux. Il s'inscrit dans la continuité conceptuelle du Tome I : tester si le vide possède une dynamique interne mesurable, sans rompre les cadres établis de la physique.

5.7 Conclusion générale du Tome 2

Le *Vacuum Actif* relie pour la première fois le redshift cosmique, la stabilité des horloges et la gravitation locale par un champ unique et falsifiable. Les équations développées ici décrivent un univers où le vide n'est pas un espace figé, mais un milieu dynamique et adiabatique dont l'évolution lente définit la flèche du temps.

Le Tome 2 consolide la base physique du modèle :

- un champ scalaire unique σ_{vac} ;
- des couplages hiérarchisés ($\xi_\gamma \gg \xi_m \gg \xi_\nu$) ;
- une équation d'état adiabatique et achromatique ;
- une cohérence expérimentale multi-échelle validée à 10^{-17} /an.

Les prochaines décennies permettront de tester ce concept par la convergence des réseaux d'horloges, des lentilles cosmiques, et de la gravimétrie de haute précision. Le **temps du vide** devient ainsi le dénominateur commun entre la physique quantique et la cosmologie.

— *Fin du Tome II* —

Perspectives — Vers le Tome III : Matière, structure et émergence

Le *Tome III* prolongera cette étude en abordant la **matière comme réponse du vide actif à sa propre contrainte**. Alors que le Tome II décrit la dynamique du champ σ_{vac} et du temps associé, le prochain volume explorera comment ce même champ pourrait participer à la *structuration de la matière*, à la masse effective et aux couplages internes entre vide, champ de Higgs et interactions faibles.

Nous n'avons ici aucune certitude : l'hypothèse reste falsifiable et soumise aux cadres établis de la physique des particules. Ce futur travail visera à relier les dynamiques lentes du vacuum aux invariants de masse et de spin, pour tester si la matière elle-même peut émerger comme un état excité du vide actif.

Tome III — Prévu : “Matière et structures du Vide Actif”
(E. Rivera-Ramirez, en préparation)

Bibliographie

- [1] A. Einstein, *The Foundation of the General Theory of Relativity*, Annalen der Physik **49**, 769–822 (1916).
- [2] A. G. Riess et al., *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, Astron. J. **116**, 1009 (1998).
- [3] S. Perlmutter et al., *Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae*, Astrophys. J. **517**, 565 (1999).
- [4] Planck Collaboration, *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, A&A **641**, A6 (2020).
- [5] S. Weinberg, *Cosmology*, Oxford University Press (2008).
- [6] A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik, P. O. Schmidt, *Optical atomic clocks*, Rev. Mod. Phys. **87**, 637 (2015).
- [7] W. F. McGrew et al., *Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level*, Nature **564**, 87–90 (2018).
- [8] N. Huntemann et al., *Single-ion atomic clock with 3×10^{-18} systematic uncertainty*, Phys. Rev. Lett. **116**, 063001 (2016).
- [9] T. Treu & P. Marshall, *Strong Lensing by Galaxies*, A&A Rev. **18**, 35–82 (2010).
- [10] S. H. Suyu et al., *H0LiCOW – I. H_0 from lenses B1608+656 and RXJ11311231*, MNRAS **468**, 2590–2604 (2017).
- [11] P. Noterdaeme et al., *The evolution of the cosmic microwave background temperature : measurements at $z > 2$* , A&A **526**, L7 (2011).
- [12] D. J. Fixsen, *The Temperature of the Cosmic Microwave Background*, Astrophys. J. **707**, 916–920 (2009).
- [13] T. J. Quinn et al., *Improved Determination of G using two Methods*, Phys. Rev. Lett. **111**, 101102 (2013).
- [14] S. Schlamminger et al., *Recent Measurements of the Gravitational Constant as a Function of Time*, Phil. Trans. R. Soc. A **373**, 20140293 (2015).
- [15] T. Padmanabhan, *The atoms of spacetime and the cosmological constant problem*, J. Phys. Conf. Ser. **880**, 012008 (2017).
- [16] S. Hossenfelder, *Minimal length scale scenarios for quantum gravity*, Living Rev. Relativity **16**, 2 (2013).
- [17] C. Barceló, S. Liberati, M. Visser, *Analogue Gravity*, Living Rev. Relativity **14**, 3 (2011).
- [18] E. Rivera–Ramirez, *Le Vacuum Actif : fondements observationnels et dynamique du champ du vide*, Manuscrit indépendant, Tome I, HAL–Zenodo (2025).

Annexe A — Références internes du projet Vacuum Actif

Les références suivantes correspondent aux séries de tests et blocs méthodologiques ayant servi à la validation du *Vacuum Actif* dans le présent Tome II. Chaque entrée renvoie à une version documentée du projet (V5–V8) archivée dans HAL/Zenodo sous la signature de l’auteur.

- T1** *Lentilles gravitationnelles — Validation du potentiel_{vac}* Campagne d’analyse RX J11311231, B1608+656, Q0957+561 (2025). Équation Ψ_{vac} compatible avec la déflexion einsteinienne au premier ordre.
- T2** *Dérive temporelle des délais de lentilles (t)* Suivi multi-bande des systèmes quadruples ; absence de chromaticité détectée ($< 10^3 \text{ an}^1$). Réf. bloc T2-V7.
- T3** *Variation de la constante de structure fine (α) et corrélation micro–macro* Analyse Many-Multiplet sur quasars lentillés ; contraintes à 10 ppm. Réf. bloc T3-V7.
- T4** *Horloges optiques multi-espèces (Sr , Yb , Hg , Al^+)* Détection d’un mode commun $S(t)$ au niveau 10^1 an^1 . Réf. bloc T5-V6.
- T5** *Cohérence temporelle et adiabaticité* Comparaison inter-bandes micro-ondes/optique ; validation du principe d’achromaticité.
- T6** *Cavités croisées et dérive commune des résonances* Test d’achromaticité pure entre bandes -ondes et optique ; seuil 10^1 an^1 . Réf. bloc T9-V7.
- T7** *Stabilité temporelle des pulsars milliseconde* Validation du modèle H pour $|\dot{\gamma}| \sim 10^1 \text{ s}^1$; achromaticité confirmée. Réf. bloc T7-V5.
- T8** *Gravitation de laboratoire — balances de Cavendish modernes* Contraintes sur $|\dot{G}/G| < 10^{-6} \text{ an}^{-1}$; borne sur ~ 10 . Réf. bloc T8-V6.
- T9** *Laboratoire EM — cavités croisées micro-ondes/optique* Corrélation multi-bande achromatique, dérive commune $S_{T9}(t)$. Réf. bloc T9-V7.
- T10** *Masses et particules — neutrinos et couplage Higgs–vacuum* Aucune dérive m^2 détectée ; contrainte $|| \sim 10^{22} \text{ m} \cdot \text{J}^1$.

Séries de versions et campagnes

- **V5.x** — **Campagne observationnelle cosmique (2025 octobre)** : Validation des supernovae Ia, lentilles, pulsars, CMB ; définition de Ψ_{vac} .
- **V6.x** — **Dynamique du champ et couplages locaux (2025 octobre)** : Introduction du potentiel $V(\sigma)$ et du terme de relaxation ${}^2(\)^2$.

- **V7.x — Couplages élargis et falsifiabilité** : Hiérarchie (m), pipeline Achromaticity-First, tests T1–T10.
- **V8.x — Corrélacion cosmologie–laboratoire (2025 octobre)** : Mise en relation $\dot{\sigma}_{\text{lab}} \approx \dot{\sigma}_{\text{cosmo}}/(1+z)$, équation d’unification entre échelles.

Note d’auteur. Ces références internes ne constituent pas des publications indépendantes, mais les blocs techniques archivés du projet *Vacuum Actif*. Elles assurent la traçabilité scientifique et la reproductibilité des calculs et tests présentés dans le Tome II.

*E. Rivera–Ramirez,
Campagne V6–V8, octobre 2025.*

Annexe B — Notations et unités physiques

Cette annexe regroupe les principales notations, symboles et unités utilisés dans le Tome II. Les constantes fondamentales sont données dans le système international (SI) et, sauf mention contraire, toutes les dérivées temporelles sont exprimées en an^{-1} .

Constantes et unités fondamentales

Symbole	Définition / Interprétation	Valeur SI
c	Vitesse de la lumière dans le vide	$2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s}$
G	Constante gravitationnelle	$6.674\,30 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
h	Constante de Planck	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
$\hbar = h/2\pi$	Constante de Planck réduite	$1.054\,571\,817 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
k_B	Constante de Boltzmann	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
e	Charge élémentaire	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
M_\odot	Masse solaire	$1.988\,47 \times 10^{30} \text{ kg}$

Grandeurs et variables du modèle Vacuum Actif

Symbole	Signification physique	Unité (SI)
σ_{vac}	Champ scalaire du vide (variable dynamique principale)	— (adimensionné)
σ_*	Valeur d'équilibre du champ du vide	—
κ_{vac}	Taux effectif de redshift (interaction photon–vide)	s^{-1} ou an^{-1}
Ψ_{vac}	Potentiel optique du vide (équivalent lentille)	adimensionné
μ	Fréquence de relaxation du champ σ_{vac}	an^{-1}
λ	Coefficient quartique du potentiel $V(\sigma)$	adimensionné
ξ_γ	Couplage photon–vacuum (canal électromagnétique)	$\text{m} \cdot \text{J}^{-1}$
ξ_m	Couplage matière–vacuum (canal gravitationnel)	$\text{m} \cdot \text{J}^{-1}$
ξ_ν	Couplage courant–vacuum (canal faible/neutrinique)	$\text{m} \cdot \text{J}^{-1}$
$\Lambda_{\text{eff}}(t)$	Constante cosmologique effective dépendante du temps	m^{-2}
$V(\sigma)$	Potentiel du champ du vide	J/m^3
$T_{\mu\nu}^{(\text{vac})}$	Tenseur énergie–impulsion du vacuum	J/m^3
w_{vac}	Équation d'état du champ du vide ($p_{\text{vac}}/\rho_{\text{vac}}$)	—
$S(t)$	Signal commun mesuré (drift moyen des horloges)	an^{-1}
$\dot{\sigma}_{\text{vac}}$	Dérivée temporelle du champ du vide	an^{-1}
$G_{\text{eff}}(t)$	Constante gravitationnelle effective	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$
z	Redshift observé	—
τ_{vac}	Délai temporel (lentille gravitationnelle)	s
ν	Fréquence photonique ou atomique	Hz

Unités et conversions pratiques

- $1 \text{ an}^{-1} = 3.168 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$
- $1 \text{ Mpc} = 3.0857 \times 10^{22} \text{ m}$
- $1 \text{ km/s/Mpc} = 3.2408 \times 10^{-20} \text{ s}^{-1}$
- Conversion redshift–temps :

$$\frac{dz}{dt} \approx (1+z) \dot{\kappa}_{\text{vac}}(t)$$

- Énergie du photon :

$$E = h\nu = h\nu_0 e^{-\int \dot{\kappa}_{\text{vac}} dt}$$

Conventions et symboles mathématiques

∇_{\perp}	Gradient transverse (dans le plan de la lentille)
\square	D'Alembertien ($\partial_t^2 - \nabla^2$)
$\langle X \rangle$	Moyenne spatiale ou temporelle d'une grandeur X
∂_{ν}	Dérivée partielle par rapport à la fréquence photonique
\dot{X}	Dérivée temporelle de X
δX	Perturbation ou variation infinitésimale de X
\mathcal{F}_{vac}	Facteur de correction vacuum dans les distances optiques
\mathcal{L}	Lagrangien densité de champ

Remarque sur les échelles temporelles

Les dérivées temporelles lentes du champ du vide sont toujours exprimées dans des unités par année sidérale :

$$1 \text{ an} = 3.155\,76 \times 10^7 \text{ s.}$$

Les bornes usuelles de quasi-stationnarité sont :

$$|\dot{\sigma}_{\text{vac}}| < 10^{-6} \text{ an}^{-1}, \quad |\dot{\kappa}_{\text{vac}}| < 10^{-3} \text{ an}^{-1},$$

valeurs correspondant respectivement aux limites des tests de pulsars milliseconde et de lentilles gravitationnelles.

E. Rivera-Ramirez,
Compilation des unités et notations — Tome II, 2025.