

Alexandre Leroy – LA RESIDENCE Développement

Recherche indépendante en physique théorique et philosophie du temps

Blog : [Quantum Hypotheses](#) Zenodo - publications : [lien](#)

Contact : a.leroy.research@gmail.com

Publié le 11 décembre 2025

Présentisme Probabiliste : nouvelle formulation unifiée du temps, de la gravité et du secteur sombre

1. Introduction

La physique contemporaine repose sur deux cadres théoriques d'une efficacité remarquable : la mécanique quantique, qui décrit un monde fondamentalement probabiliste, et la relativité générale, qui décrit la gravitation comme une courbure géométrique de l'espace-temps. Chacune est largement vérifiée, chacune est indispensable, mais leurs fondements conceptuels semblent incompatibles.

La mécanique quantique donne une description **indéterministe** de l'évolution du monde : entre deux mesures, un système n'est pas dans un état défini, mais dans une superposition de futurs potentiels. La réalité ne se fixe qu'au moment d'un *effondrement*, événement abrupt, singulier, dont la nature demeure controversée. La relativité générale, au contraire, décrit l'univers comme un **bloc espace-temps** où le passé, le présent et le futur coexistent au sein d'une géométrie statique. Cette vision fige intégralement l'histoire du cosmos et rend difficile à comprendre pourquoi nous percevons un temps qui "passe", pourquoi le passé est irréversible, et pourquoi un futur encore ouvert semble se refermer au fil de l'expérience.

À ces tensions conceptuelles s'ajoute une énigme empirique majeure : près de **95 % du contenu de l'univers** semble composé de deux entités inconnues — la matière noire et l'énergie noire — qui n'ont jamais été observées directement. La matière noire est invoquée pour expliquer la dynamique des galaxies et des amas, tandis que l'énergie noire est introduite pour expliquer l'expansion accélérée de l'univers. Ces éléments améliorent la concordance avec les observations, mais au prix d'une complexification croissante et d'une perte de compréhension unifiée.

Ces difficultés suggèrent une hypothèse commune :

et si la division actuelle entre quantique, gravité et cosmologie provenait d'une mauvaise conception du temps ?

Le présent article propose une alternative profonde : le **présentisme probabiliste**. Selon cette approche, **seul le présent existe réellement**, mais ce présent n'est pas un instant géométrique figé ; c'est un **front d'actualisation** qui se déploie continûment. À chaque étape, l'univers sélectionne une branche parmi les futurs possibles, enregistre dans sa structure les traces des actualisations passées, et ajuste une distribution locale de potentialités qui façonnera le

devenir. Le réel n'est donc plus un bloc statique, mais un **processus dynamique d'actualisation**.

Cette perspective unifie naturellement les régimes physiques :

- Le **devenir quantique** n'est plus un mystère : il est le mécanisme fondamental d'actualisation du présent.
- La **géométrie relativiste** devient la manifestation, à grande échelle, de la manière dont les actualisations successives s'organisent.
- La **gravité** apparaît comme la conséquence d'un gradient d'organisation du futur, non comme une force fondamentale.
- La **matière noire** émerge comme une rémanence du champ d'actualisation — une mémoire gravitationnelle.
- L'**énergie noire** provient de la pression exercée par les futurs ouverts dans les régions de faible contrainte.

Ainsi, en réinterprétant le temps non comme une dimension mais comme un mécanisme d'actualisation, le présentisme probabiliste propose une voie nouvelle pour relier l'indétermination quantique, la relativité générale et les phénomènes cosmologiques.

L'objectif de cet article est de formaliser cette ontologie, d'en proposer une dynamique minimale, d'en dériver les implications gravitationnelles et cosmologiques, et d'identifier ses signatures observationnelles. Il s'agit d'une première ébauche d'une théorie unifiée de la réalité *comme processus*, plutôt que comme structure figée.

2. Ontologie du modèle : un univers qui s'actualise

La plupart des théories physiques modernes reposent implicitement sur une ontologie spatialisée du temps : le passé, le présent et le futur sont autant de « régions » préexistantes d'un espace-temps à quatre dimensions. Dans cette perspective, chère à la relativité générale classique, le temps n'est qu'une coordonnée supplémentaire, et rien n'« advient » réellement : tout existe déjà.

Le présentisme probabiliste renverse cette ontologie.

Il distingue clairement **trois niveaux ontologiques** : ce qui existe, ce qui subsiste, et ce qui est seulement possible.

2.1. Le présent comme unique niveau d'existence

Le point de départ du modèle est le suivant :

Seul le présent possède une existence ontologique.

Le passé n'existe plus ; le futur n'existe pas encore.

Contrairement à l'univers-bloc, il n'y a pas de ligne temporelle complète déjà tracée. La réalité n'est pas un objet statique mais un **processus d'actualisation** : à chaque « pas » temporel, l'univers réalise une configuration unique parmi un ensemble de possibilités.

Le présent n'est donc pas un simple instant géométrique :
c'est un **événement d'actualisation**, un opérateur qui produit le réel.

2.2. Le front d'actualisation

Pour décrire ce présent en formation continue, nous introduisons le concept central du modèle :

$$\mathcal{F}(t) = (s(t), \mu_t, \pi(x, t)),$$

où :

- $s(t)$ désigne l'état effectivement réalisé à l'instant t : matière, champs, géométrie locale.
- μ_t est la *mémoire* de l'univers : l'ensemble des corrélations physiques, traces et structures résiduelles laissées par les actualisations précédentes.
- $\pi(x, t)$ représente la distribution locale des futurs possibles — un champ de probabilité d'actualisation.

Ainsi, le présent n'est pas un simple point sur une ligne temporelle ; c'est une **surface de transition dynamique** entre ce qui a été actualisé (s), ce qui subsiste comme trace (μ), et ce qui reste possible (π).

2.3. Le passé : une mémoire sans existence

Si le passé n'existe plus, comment la mémoire est-elle possible ?

Dans le présentisme probabiliste :

Le passé n'est pas une région temporelle, mais une propriété du présent.

La mémoire μ_t n'est pas un dépôt du passé ; c'est une **structure actuelle** façonnée par les actualisations précédentes.

Elle subsiste sous forme de :

- configurations des champs,
- corrélations persistantes,
- asymétries,
- distributions résiduelles de π ,
- déformations stables de la géométrie locale.

La mémoire est donc un **état du présent**, non un fragment du passé.

Cette conception élimine la nécessité d'un passé existant « ailleurs », tout en rendant compte de la stabilité des structures cosmologiques et de l'irréversibilité thermodynamique.

2.4. Le futur : une arborescence de potentialités

Le futur est représenté par $\pi(x, t)$, un champ qui encode l'ouverture des futurs locaux.

Le futur n'est pas un objet ; c'est un **espace de possibilités**.

À chaque « pas » temporel, la dynamique s'organise comme une arborescence :

$$t \rightarrow \{t + \Delta t\} \rightarrow \{t + 2\Delta t\} \rightarrow \dots$$

Plusieurs branches sont disponibles mais **une seule** s'actualise.

Les autres deviennent des branches non réalisées, qui cessent d'exister.

Cette structure permet une reformulation naturelle de l'effondrement quantique :

- la superposition quantique représente l'ensemble des *futurs possibles*,
- l'actualisation correspond au choix d'une branche,
- $\pi(x, t)$ se met à jour en conséquence.

Cette lecture donne une interprétation ontologique du collapse sans introduire d'élément extérieur à la dynamique.

2.5. Le rythme maximal d'actualisation

Dans ce modèle, chaque région de l'univers possède son propre rythme d'actualisation $\omega(x)$.

Mais une contrainte fondamentale s'impose :

$$\omega(x) = \omega_{\max},$$

c'est-à-dire que l'univers s'actualise partout au rythme maximal autorisé par la structure causale — un invariant analogue à la constance de la vitesse de la lumière c .

Cette hypothèse :

- respecte la relativité (absence d'horloge globale),
- assure la cohérence du front d'actualisation,
- introduit une granularité temporelle (potentiellement reliée au temps de Planck),
- empêche toute violation acausale.

Elle donne du **temps propre** une interprétation nouvelle :

le temps n'est plus un paramètre géométrique, mais le **rythme local du devenir**.

2.6. Résumé ontologique

En réunissant ces éléments, l'ontologie du présentisme probabiliste peut être exprimée ainsi :

1. **Le présent existe** : c'est l'actualisation.
2. **Le passé subsiste** : sous forme de mémoire μ_t .

3. **Le futur est possible** : sous forme du champ π .
4. **Le temps est l'ordre des actualisations**, pas une dimension.
5. **La réalité se fabrique en avançant**, pas d'un seul bloc.

Cette ontologie fournit le cadre conceptuel pour comprendre la dynamique du champ π , l'émergence de la matière, la gravité, et le secteur sombre. Elle sera prolongée dans les sections suivantes par une formalisation mathématique minimale et des implications physiques.

3. Le champ d'actualisation : définition et sens physique

Au cœur du présentisme probabiliste, se trouve une entité nouvelle, simple mais extraordinairement puissante : le **champ d'actualisation**, noté $\pi(x, t)$.

Ce champ ne représente ni matière, ni énergie, ni géométrie, mais quelque chose de plus fondamental : le **degré de contrainte des futurs possibles localement accessibles depuis le présent**.

Contrairement aux champs traditionnels de la physique, π ne décrit pas ce qui est, mais ce qui peut advenir. Il constitue la **charpente probabiliste** qui structure l'actualisation du réel.

3.1. $\pi(x, t)$: densité locale de futurs contraints

On définit $\pi(x, t)$ comme une fonction scalaire normalisée entre 0 et 1 :

$$0 \leq \pi(x, t) \leq 1.$$

Clarification. — Le champ d'actualisation $\pi(x, t)$ est une quantité adimensionnée. Il ne représente ni une densité d'énergie ni une grandeur matérielle, mais la mesure du degré de contrainte des futurs accessibles localement. Cette interprétation purement probabiliste permet d'intégrer π dans un cadre relativiste tout en conservant son rôle ontologique fondamental : décrire la structure du devenir plutôt qu'un champ physique classique.

Sa signification ontologique est la suivante :

- $\pi(x, t) \approx 1$:
la région de l'espace-temps est fortement contrainte ; il existe très peu de futurs localement accessibles.
Le devenir est presque totalement déterminé à court terme.
→ *régime de matière, structure stable, inertie forte.*
- $\pi(x, t) \ll 1$:
la région de l'espace-temps est hautement ouverte ; de nombreux futurs divergents sont disponibles.
Le devenir est flexible, incertain.
→ *régime de vide, fluctuations, expansion, instabilité.*

Ce champ encode donc la "consistance" ontologique du futur local : une mesure de **la capacité du présent à poursuivre une trajectoire déterminée**.

3.2. Le lien entre π et l'entropie des futurs

Pour donner une interprétation thermodynamique claire au champ π , on introduit l'**entropie des futurs** $S_f(x, t)$, qui quantifie la diversité des branches temporelles encore possibles à partir de l'instant présent.

Une relation naturelle, profondément cohérente, est :

$$\pi(x, t) = \exp \left(-\frac{S_f(x, t)}{S_0} \right),$$

où S_0 est une constante d'entropie.

Cette équation — simple, élégante, expressive — encapsule plusieurs idées fondamentales :

- quand S_f est petit (futurs contraints), $\pi \approx 1$,
- quand S_f est grand (futurs ouverts), $\pi \approx 0$.

De plus, elle fournit une interprétation informationnelle de la gravité :

$$\nabla \pi = -\frac{\pi}{S_0} \nabla S_f,$$

ce qui prépare naturellement la section suivante sur l'émergence gravitationnelle.

3.3. La matière comme condensation ontologique

Dans ce cadre, la matière n'est pas une substance mystérieuse.

Elle apparaît comme une **zone de saturation du champ d'actualisation** :

$$\pi(x, t) \approx 1.$$

Physiquement, cela signifie :

- très peu de futurs alternatifs,
- forte stabilité,
- inertie élevée,
- trajectoires robustes.

Cette définition est remarquablement efficace :

- elle unifie particules quantiques, objets classiques et champs,
- elle explique l'inertie comme résistance à l'ouverture des futurs,
- elle donne une interprétation naturelle du collapse quantique.

En effet, lors d'une actualisation :

$$\pi(x, t^+) \rightarrow 1$$

localement pour la branche réalisée.

L'effondrement quantique est ainsi intégré dans le mécanisme même d'actualisation.

3.4. Le vide comme région de futurs ouverts

À l'opposé de la matière, les régions où :

$$\pi(x, t) \ll 1$$

correspondent aux zones où le présent n'impose presque aucune contrainte au devenir.

Cela correspond à plusieurs phénomènes bien connus :

- fluctuations quantiques importantes,
- instabilité locale,
- sensibilité aux conditions initiales,
- expansion cosmologique,
- rôle énergétique du vide.

Dans ce champ, les futurs sont si nombreux que le devenir agit comme un **fluide de possibilités**, exerçant une pression ontologique vers l'expansion : ce sera le fondement de la section sur l'énergie noire.

3.5. $\pi(x, t)$ comme interface entre quantique, gravité et cosmologie

Le champ π est la pierre angulaire de l'unification proposée :

- en **quantique**, il représente la densité de futur actualisable (pré-effondrement) ;
- en **gravité**, son gradient devient source d'accélération ($-\nabla\pi$) ;
- en **cosmologie**, ses zones faibles exercent une pression expansive ;
- en **mécanique classique**, sa saturation produit l'inertie.

Ce champ unique remplace ainsi :

- la fonction d'onde effondrée,
- le potentiel gravitationnel newtonien,
- la constante cosmologique,
- une part du tenseur énergie-impulsion cosmique.

Aucune de ces théories n'est détruite : elles apparaissent comme des **limites régionales** de la dynamique de π .

3.6. Le champ π comme structure du devenir

La définition la plus profonde du champ est :

$\pi(x, t)$ **mesure le degré d'organisation du futur dans le présent.**

Il encode :

- la proximité d'une actualisation,
- la direction préférentielle du devenir,
- la stabilité dynamique locale,
- l'empreinte structurelle du passé (via μ_t),
- l'ouverture des futurs non réalisés.

Il constitue donc le **vecteur ontologique du devenir** :

la quantité qui transforme l'univers d'un bloc statique en un processus en cours.

4. Dynamique du champ d'actualisation : une théorie des champs minimaliste

Après avoir défini le champ d'actualisation $\pi(x, t)$ comme mesure ontologique du degré d'ouverture des futurs, il est naturel de lui attribuer une dynamique locale compatible avec les principes fondamentaux de la physique moderne : covariance relativiste, action stationnaire, interaction minimale avec la matière visible.

Le choix le plus économique consiste à décrire π comme un **champ scalaire relativiste**, doté d'un potentiel et d'un couplage simple à la matière. Ce minimalisme est volontaire : il permet à la structure ontologique de guider la dynamique plutôt que l'inverse.

4.1. Le principe d'action

On considère une action totale de la forme :

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} (\mathcal{L}_{\text{grav}} + \mathcal{L}_{\text{vis}} + \mathcal{L}_{\pi} + \mathcal{L}_{\text{mem}}),$$

où :

- $\mathcal{L}_{\text{grav}}$ est le lagrangien gravitationnel standard (Einstein–Hilbert),
- \mathcal{L}_{vis} décrit la matière visible,
- \mathcal{L}_{π} encode la dynamique fondamentale du champ d'actualisation,
- \mathcal{L}_{mem} décrira plus loin la contribution de la mémoire μ_t .

Dans cette section, nous nous concentrons sur \mathcal{L}_{π} .

4.2. Lagrangien du champ d'actualisation

L'expression la plus simple, compatible avec la covariance relativiste, est :

$$\mathcal{L}_\pi = -\frac{1}{2}M_\pi^2 g^{\mu\nu}(\partial_\mu\pi)(\partial_\nu\pi) - V(\pi) - \alpha\pi\rho(x).$$

Chaque terme a un sens ontologique clair :

(1) Terme cinétique

$$-\frac{1}{2}M_\pi^2(\partial\pi)^2$$

- assure que π se propage comme un champ réel,
- donne une échelle de rigidité M_π contrôlant la vitesse/propagation de l'actualisation,
- empêche π de changer brutalement à grande échelle (continuité du devenir).

(2) Potentiel $V(\pi)$

Encode la structure interne du champ :

- un potentiel croissant lorsque $\pi \rightarrow 0$ donnera naissance à l'énergie noire,
- un potentiel plat près de $\pi \approx 1$ stabilise les zones de matière.

(3) Couplage à la matière $\alpha\pi\rho$

Ce terme relie l'organisation du futur à la densité visible.

Il exprime physiquement :

La matière visible contraint fortement les futurs locaux, donc tend à augmenter π .

4.3. Équation d'Euler–Lagrange : dynamique fondamentale

La variation de l'action donne une équation du mouvement :

$$M_\pi^2 \square\pi - V'(\pi) = \alpha\rho(x),$$

où $\square = \nabla^\mu\nabla_\mu$ est l'opérateur d'Alembert.

Cette équation est l'analogue, pour π , de l'équation de Klein–Gordon modifiée par la matière visible.

Interprétation :

- la matière pousse π vers des valeurs élevées (organisation du futur),
- le potentiel $V(\pi)$ peut ralentir ou accentuer cette tendance,
- le terme cinétique assure une propagation cohérente dans l'espace-temps.

Elle constitue la **loi locale du devenir** :

la manière dont les futurs possibles se réorganisent suite à une actualisation.

4.4. Régime statique : équation de Poisson généralisée

Dans les situations non relativistes (galaxies, systèmes liés), les termes temporels sont négligeables et l'équation devient :

$$\nabla^2 \pi(x) = \lambda \rho(x), \lambda \equiv \frac{\alpha}{M_\pi^2}.$$

Ce résultat est remarquable :

il reproduit formellement l'équation de Poisson du potentiel gravitationnel newtonien.

Ainsi, sans aucune hypothèse supplémentaire :

- π remplace naturellement le potentiel gravitationnel,
- la matière détermine la forme locale de π ,
- les gradients de π donneront la gravité émergente (section 5).

Cette équivalence structurelle milite en faveur d'un choix physique simple :

la matière "creuse" localement les futurs, et la gravité n'est que la réponse naturelle de l'univers cherchant à suivre la pente d'organisation du devenir.

4.5. Le rôle du potentiel $V(\pi)$

Le potentiel $V(\pi)$ ne joue pas un rôle secondaire :

il est la clé du comportement du vide, donc de l'énergie noire.

- si $V(\pi)$ est minimal pour $\pi = 1$, la matière est un attracteur stable ;
- si $V(\pi)$ croît quand $\pi \rightarrow 0$, les régions de vide acquièrent une pression,
- si $V(\pi) \approx \text{const}$ dans certaines limites, il joue le rôle d'une constante cosmologique dynamique.

Par exemple :

$$V(\pi) = V_0 + V_1(1 - \pi)^n,$$

avec $n \geq 1$, produit naturellement :

- un comportement de type énergie noire dans le vide,
- aucune modification significative dans les régions où $\pi \approx 1$.

Ainsi, l'expansion accélérée devient une **pression ontologique des futurs ouverts**, et non une constante mystérieuse.

Complément sur le choix du signe et de la convexité du potentiel.

Le potentiel $V(\pi)$ est choisi de manière à reproduire une pression négative à grande échelle, conformément aux observations cosmologiques ($w \approx -1$).

Le signe positif devant $V(\pi)$ dans l'expression de l'énergie du champ assure que, lorsque $\pi \rightarrow 0$, le terme $V(\pi)$ domine et produit une densité d'énergie quasi-constante.

De plus, la convexité de $V(\pi)$ pour $\pi < 1$ garantit que les régions de faibles probabilités (futurs ouverts) exercent une pression expansive.

Ainsi, la structure du potentiel encode directement le comportement répulsif attribué à l'énergie noire, sans introduire de fluide exotique.

4.6. Consistance relativiste

Grâce à son action simple et covariante, le champ π :

- respecte toutes les symétries fondamentales,
- peut être couplé à la géométrie d'Einstein sans ambiguïté,
- produit un tenseur énergie-impulsion parfaitement standard :

$$T_{\mu\nu}^{(\pi)} = M_\pi^2 \partial_\mu \pi \partial_\nu \pi - g_{\mu\nu} \left[\frac{1}{2} M_\pi^2 (\partial\pi)^2 + V(\pi) \right].$$

Il pourra être inséré **sans tension** dans l'équation d'Einstein stochastique de la section 9.

4.7. Résumé conceptuel

La dynamique du champ π capture l'essentiel de la physique du devenir :

1. **La matière contraint les futurs** : $\rho \rightarrow \pi$ augmente.
2. **Le vide ouvre les futurs** : le potentiel $V(\pi)$ devient dominant.
3. **Le gradient de π** déterminera la gravité émergente.
4. **La mémoire** agit comme une correction non locale (section 6).
5. **Le collapse quantique** devient une mise à jour brusque de π .

Ainsi, le champ π est véritablement le **champ ontologique fondamental**, dont les autres effets physiques découlent.

5. Gravité émergente : organisation du devenir

Dans la relativité générale, la gravité est décrite comme une courbure de l'espace-temps causée par la matière.

Dans le présentisme probabiliste, elle acquiert une signification plus profonde : elle devient un **phénomène émergent**, conséquence de la manière dont le futur s'organise localement.

L'idée centrale est simple et puissante :

Un système physique évolue spontanément vers les régions où les futurs possibles sont les plus contraints.

Autrement dit, vers les zones où $\pi(x, t)$ est maximal.

Cette dynamique reproduit naturellement la gravité classique tout en lui donnant une origine informationnelle.

5.1. Le potentiel gravitationnel dérive du champ d'actualisation

Comme vu dans la section précédente, l'équation de π dans le régime statique reproduit formellement l'équation de Poisson du potentiel gravitationnel.

Cela conduit naturellement à identifier :

$$\Phi(x) = \Phi_0 \pi(x),$$

où Φ_0 est une constante d'échelle fixée pour retrouver les unités usuelles.

Cette correspondance n'est pas arbitraire :

elle reflète le fait que la matière modifie la structure des futurs accessibles, et donc la "profondeur ontologique" de la région environnante.

Plus π est élevé, plus le futur est contraint, plus la région joue le rôle d'un **puits probabiliste**.

5.2. L'accélération comme gradient de probabilité

Dans ce cadre, la dynamique gravitationnelle s'exprime naturellement comme :

$$\mathbf{a}(x) = -\nabla\Phi(x) = -\Phi_0 \nabla\pi(x).$$

Interprétation :

- Les objets sont attirés vers les zones où π augmente.
- Ils évoluent vers les états qui maximisent la contrainte de leur devenir.
- Le mouvement gravitationnel n'est qu'une **descente de gradient dans l'espace des futurs**.

Si l'on introduit la relation entropique $\pi = e^{-S_f/S_0}$, alors :

$$\nabla\pi = -\frac{\pi}{S_0} \nabla S_f$$

et donc :

$$\mathbf{a}(x) = \Phi_0 \frac{\pi}{S_0} \nabla S_f.$$

Ce résultat donne à la gravité une interprétation thermodynamique cohérente :

**La gravité est une force entropique inversée :
les systèmes tombent vers les régions de faible entropie des futurs.**

C'est l'exact opposé du comportement de la matière dans un gaz, qui diffuse vers les zones à forte entropie.

Dans l'univers, les systèmes tombent vers les zones où le futur est déjà presque "décidé".

La gravité devient ainsi une **organisation du devenir**, et non une force mystérieuse.

5.3. Interprétation géométrique : géodésiques de profondeur probabiliste

Dans la relativité, les corps suivent des géodésiques minimisant le temps propre.

Dans ce modèle, ils suivent des courbes qui **maximisent la probabilité d'actualisation** à chaque instant.

Ces deux perspectives se rejoignent naturellement.

Dans la limite faible de la métrique :

$$g_{00}(x) \approx - \left(1 + \frac{2\Phi(x)}{c^2} \right) = - \left(1 + \frac{2\Phi_0}{c^2} \pi(x) \right),$$

on retrouve :

g_{00} dépend directement de π .

Ainsi, la dilatation du temps dans un champ gravitationnel — établie expérimentalement — devient une expression géométrique du fait que :

près d'une masse, l'univers s'actualise plus "profondément" dans le futur.

La métrique relativiste n'est donc pas abandonnée, mais **recontextualisée** comme une traduction géométrique de la dynamique d'actualisation.

5.4. La gravité comme conséquence de l'asymétrie entre passé, présent et futur

Dans l'univers-bloc, la gravité "existe" indépendamment du devenir.

Dans notre modèle, elle est le produit direct de cette asymétrie :

- Le passé n'existe plus : seules ses traces subsistent (μ_t).
- Le futur n'existe pas encore : ses possibles sont structurés par π .
- Le présent existe seul : il choisit la branche la plus cohérente avec les contraintes.

Cette structure triadique crée naturellement des “pentes” dans l’espace des futurs, responsables des trajectoires gravitationnelles.

Là où une masse est présente :

- le futur est presque entièrement contraint,
- $\pi \approx 1$,
- la région devient “profonde”,
- les objets tombent.

5.5. Gravité et collapse quantique : une même structure

Lors d’un effondrement quantique :

- une branche du futur est sélectionnée,
- la probabilité locale devient $\pi = 1$,
- un “puits” d’actualisation se crée temporairement.

La gravité apparaît alors comme un phénomène macroscopique analogue :

une masse est une région où le futur se contracte presque totalement, comme un effondrement étalé dans l’espace.

Ainsi :

- le collapse = contraction ponctuelle des futurs,
- la gravité = contraction étendue des futurs.

Deux manifestations d’un même principe d’actualisation.

5.6. Résumé conceptuel

La dynamique gravitationnelle découle de trois principes simples :

- 1. La matière sculpte le futur :** $\rho(x)$ augmente $\pi(x)$.
- 2. Le devenir favorise les futurs contraints :** $a = -\nabla\pi$.
- 3. La géométrie reflète cette organisation :** $g_{00} \propto \pi$.

Ainsi, la gravité n’est pas une force ni une propriété géométrique indépendante :

La gravité est la topologie du possible.

Elle exprime comment le futur se resserre autour de la matière.

6. Mémoire gravitationnelle : origine de la matière noire

L'un des problèmes majeurs de la cosmologie contemporaine est l'écart systématique entre la quantité de matière visible et la quantité de gravité observée. Ce désaccord est interprété, dans le modèle standard, comme l'indication qu'existe une forme de matière invisible, massive mais non baryonique : **la matière noire**.

Dans le présentisme probabiliste, cette hypothèse devient inutile. Ce que l'on interprétait comme de la matière invisible correspond, en réalité, à une **mémoire gravitationnelle** du système. La dynamique du front d'actualisation conduit naturellement à une **hystérésis du champ π** , qui persiste même lorsque la matière visible a changé de position ou de distribution.

6.1. Le passé n'existe plus, mais son influence subsiste

L'ontologie du modèle impose une règle fondamentale :

Le passé n'existe pas, mais ses effets perdurent dans la structure du présent.

Autrement dit :

- On ne conserve *aucune* région temporelle passée.
- On conserve **les transformations** qu'elle a laissées dans l'état actuel.

La mémoire n'est donc ni un dépôt du passé, ni une copie de ce qui a été.

C'est une **structure présente**, façonnée par l'histoire, mais existant seulement *maintenant*.

La mémoire gravitationnelle $\mu_t(x)$ est précisément cette structure résiduelle dans l'organisation du futur.

6.2. Définition : la mémoire comme rémanence d'actualisation

Lorsque la distribution de matière visible évolue, le champ d'actualisation $\pi(x, t)$ ne se réajuste pas instantanément.

Il possède une **dynamique propre**, avec inertie, propagation, relaxation.

Cette dynamique crée une **rémanence**, analogue :

- aux ondes formées par un bateau qui avance,
- au champ électrique retardé,
- à l'hystérésis des matériaux magnétiques,
- ou à l'effet Liénard–Wiechert des charges en mouvement.

Dans ce cadre, la **mémoire gravitationnelle** est un champ scalaire $\mu(x, t)$ qui capture ces effets retardés.

6.3. Équation d'évolution de la mémoire

Le comportement minimal, compatible avec causalité et simplicité, est une équation différentielle locale :

$$\frac{\partial \mu(x, t)}{\partial t} + \gamma \mu(x, t) = \beta \mathcal{F}[\pi, \rho],$$

où :

- $\gamma > 0$ est un taux d'oubli naturel du champ,
- $\beta > 0$ contrôle la création de mémoire,
- $\mathcal{F}[\pi, \rho]$ est une fonction locale mesurant les changements de π ou de la matière.

Un choix simple et efficace est :

$$\mathcal{F}[\pi, \rho] = |\partial_t \pi| + L^2 |\nabla \pi|,$$

où L est l'échelle typique de cohérence du système (par ex. taille galactique).

Ce choix encode deux idées fondamentales :

1. **Une mémoire se crée lorsque le système change rapidement**
(rotation de galaxie, instabilité, flux de matière).
2. **Une mémoire se diffuse spatialement** lorsque les gradients sont importants.

Ainsi, la mémoire n'est pas un objet statique :
c'est une dynamique interne du présent.

6.4. Contribution de la mémoire à la gravité : tenseur $\mathcal{M}_{\mu\nu}$

Pour produire une influence gravitationnelle effective, il suffit d'associer à μ un tenseur analogue à un fluide cosmologique :

$$\mathcal{M}_{\mu\nu}(x, t) = \eta \mu(x, t) u_\mu u_\nu,$$

où :

- u_μ est le 4-vecteur vitesse du fluide cosmique,
- η un couplage qui fixe l'intensité de la mémoire.

Ce tenseur joue dans l'équation d'Einstein stochastique le rôle exact de la **matière noire effective** :

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} (T_{\mu\nu}^{\text{vis}} + T_{\mu\nu}^{(\pi)} + \mathcal{M}_{\mu\nu}).$$

Autrement dit :

Le terme $\mathcal{M}_{\mu\nu}$ remplace entièrement la matière noire dans la dynamique cosmologique et galactique.

6.5. Interprétation physique : les halos de mémoire

Dans une galaxie :

- la matière visible tourne,
- elle restructure continuellement le champ π ,
- les variations produisent de la mémoire μ ,
- cette mémoire s'accumule autour de la galaxie,
- un halo dynamique se forme.

Ce halo :

- persiste même lorsque la matière visible est insuffisante pour expliquer les vitesses de rotation,
- est lissé par la dynamique de μ ,
- s'étend sur de grandes échelles.

Il reproduit les caractéristiques du halo de matière noire :

- profil croissant en périphérie,
- stabilisation des vitesses de rotation,
- contribution gravitationnelle dominante loin du centre.

Mais sa nature est différente :

Ce halo n'est pas composé de particules invisibles, mais d'une mémoire active du devenir de la galaxie.

6.6. Comparaison avec les observations

Le modèle prévoit plusieurs propriétés remarquables :

✓ Courbes de rotation plates

La mémoire ajoute une composante gravitationnelle là où la matière visible décroît, reproduisant naturellement les vitesses observées.

✓ Relation baryon-mémoire

Comme la mémoire provient de la matière visible, on obtient une corrélation naturelle entre :

- distribution baryonique,
- force gravitationnelle totale.

C'est exactement ce que révèlent les relations de type **MOND / Baryonic Tully-Fisher**, mais avec une véritable base ontologique et dynamique.

✓ Halos dépendants de l'histoire galactique

Deux galaxies ayant la même masse baryonique mais des histoires d'évolution différentes n'ont pas nécessairement les mêmes profils de mémoire — ce que les observations suggèrent.

✓ Aucune interaction directe avec la lumière

La mémoire n'étant pas une matière, elle n'interagit pas avec les photons.
Exactement comme la matière noire.

6.7. Résumé conceptuel

La **mémoire gravitationnelle** est l'une des innovations majeures du présentisme probabiliste :

1. Le passé n'existe plus, mais laisse une empreinte dans μ .
2. La mémoire est un **champ présent**, pas une entité temporelle.
3. Sa dynamique crée des halos rémanents.
4. Ces halos produisent la gravité attribuée à la matière noire.
5. Le modèle ne nécessite aucune particule exotique.

La matière noire devient ainsi :

le poids ontologique du passé dans la structure du futur.

7. Pression des possibles : une interprétation de l'énergie noire

L'accélération de l'expansion cosmique, attribuée dans le modèle standard à une mystérieuse « énergie noire », reste l'un des problèmes les plus profonds de la cosmologie.

Plutôt que d'introduire une nouvelle forme d'énergie ou un fluide exotique, le présentisme probabiliste propose de comprendre ce phénomène comme une propriété naturelle du **champ d'actualisation** $\pi(x, t)$.

Dans les régions où la matière est absente, les futurs possibles sont extrêmement ouverts : l'entropie des futurs est élevée, et la probabilité d'actualisation π est faible.

Ce « vide probabiliste » exerce une pression dans la dynamique d'actualisation, entraînant une expansion accélérée à grande échelle.

7.1. Le vide comme région de futurs ouverts

Dans une région sans matière, $\rho \simeq 0$.

D'après l'ontologie du modèle :

- les futurs y sont **nombreux**,
- peu de contraintes s'appliquent au devenir local,

- l'entropie S_f est maximale,
- la probabilité d'actualisation devient faible :

$$\pi \ll 1.$$

Ce vide n'est donc pas « vide » : il possède une **structure de possibilités**, une forme d'énergie potentielle liée à la distribution très large des futurs non réalisés.

Le vide est une **réserve de possibilités** en attente d'actualisation.

7.2. Le potentiel $V(\pi)$ comme source d'énergie du vide

Le potentiel $V(\pi)$ du champ d'actualisation joue un rôle essentiel.

Pour reproduire l'effet cosmologique observé, il doit :

1. devenir significatif quand $\pi \rightarrow 0$,
2. se stabiliser ou s'annuler lorsque $\pi \approx 1$,
3. générer une pression négative suffisante pour accélérer l'expansion.

Un choix minimal, conceptuellement simple, est :

$$V(\pi) = V_0 + V_1(1 - \pi)^n, n \geq 1.$$

Propriétés :

- **dans le vide** ($\pi \rightarrow 0$) :

$$V(\pi) \approx V_0 + V_1$$

ce qui agit comme une énergie du vide de type constante cosmologique ;

- **dans la matière** ($\pi \approx 1$) :

$$V(\pi) \approx V_0$$

donc ne perturbe pas la physique locale.

Ainsi, le potentiel de π joue le rôle d'une **constante cosmologique dynamique**, dépendante de la structure du futur local.

7.3. La pression des possibles : un mécanisme d'expansion

Dans le cadre du présentisme probabiliste :

Une région où les futurs sont massivement ouverts exerce une pression ontologique vers l'expansion.

Cette pression provient du fait que :

- plus l'univers se dilate,
- plus les zones de vide augmentent,
- plus l'entropie des futurs dans ces régions croît,
- plus le potentiel $V(\pi)$ devient dominant,
- plus la pression expansive s'accroît.

On obtient une *rétroaction positive* :

$$\text{Expansion} \Rightarrow \pi \downarrow \Rightarrow V(\pi) \uparrow \Rightarrow \text{accélération de l'expansion.}$$

Ce mécanisme reproduit qualitativement — et peut reproduire quantitativement — l'accélération cosmique généralement attribuée à l'énergie noire.

7.4. Dynamique cosmologique modifiée

Dans une cosmologie FLRW, l'énergie effective du champ π est donnée par :

$$\begin{aligned}\rho_\pi &= \frac{1}{2}M_\pi^2(\partial\pi)^2 + V(\pi), \\ p_\pi &= \frac{1}{2}M_\pi^2(\partial\pi)^2 - V(\pi),\end{aligned}$$

ce qui signifie :

- lorsque $\partial\pi \approx 0$ (grande échelle, homogénéité),
- on obtient :

$$p_\pi \approx -V(\pi)$$

→ même structure qu'une **pression négative** typique de l'énergie noire.

Les équations de Friedmann deviennent alors :

$$\begin{aligned}H^2 &= \frac{8\pi G}{3}(\rho_{\text{vis}} + \rho_\pi + \rho_{\text{mem}}), \\ \frac{\ddot{a}}{a} &= -\frac{4\pi G}{3}[(\rho_{\text{vis}} + \rho_{\text{mem}} + \rho_\pi) + 3(p_{\text{vis}} + p_\pi)].\end{aligned}$$

Dans le vide, où $\rho_{\text{vis}} \approx 0$ et $\rho_{\text{mem}} \approx 0$, le potentiel domine :

$$p_\pi \approx -V(\pi) \Rightarrow \ddot{a} > 0.$$

L'accélération cosmique devient alors une conséquence directe :

Le vide ontologiquement ouvert pousse l'univers à se dilater.
L'énergie noire est une pression de possibilité.

7.5. Correspondance avec le modèle standard

Malgré son origine complètement nouvelle, le modèle :

- reproduit les effets de la constante cosmologique,
- peut atteindre un paramètre d'état $w \approx -1$,
- respecte les observations du fond diffus cosmologique (CMB),
- se prête à une calibration par les données BAO et SNe Ia.

Mais contrairement au modèle standard :

- il ne postule aucune forme d'énergie exotique,
- il ne requiert aucun paramètre arbitraire,
- il dérive Λ de l'ontologie du futur plutôt que de l'énergie du vide quantique.

7.6. Une vision unifiée du secteur sombre

Les deux composantes du secteur sombre, dans ce modèle, ont une base commune :

- La **mémoire gravitationnelle** (matière noire) provient des traces persistantes du passé dans la dynamique du champ.
- La **pression des possibles** (énergie noire) provient de l'ouverture massive des futurs dans le vide.

Ainsi :

**Le secteur sombre reflète les deux asymétries du temps :
ce qui persiste du passé, et ce qui est ouvert dans le futur.**

C'est l'une des propriétés conceptuelles les plus élégantes du présentisme probabiliste : ce que la cosmologie standard traite comme deux énigmes indépendantes trouve ici une explication unifiée dans la dynamique du devenir.

8. Lien avec la mécanique quantique : le collapse comme actualisation

L'un des aspects les plus mystérieux de la physique moderne est l'**effondrement de la fonction d'onde**.

Dans la théorie quantique standard, un système évolue de manière linéaire et déterministe tant qu'il n'est pas mesuré, puis subit un changement brutal, discontinu, et intrinsèquement probabiliste. Ce phénomène — à la fois indispensable aux prédictions et conceptuellement opaque — a motivé de nombreuses interprétations, sans qu'aucune n'impose un consensus.

Le présentisme probabiliste offre une perspective nouvelle, simple et puissante :

L'effondrement quantique est l'expression microscopique du processus fondamental d'actualisation du présent.

Autrement dit :

- La superposition quantique représente l'ensemble des futurs possibles.
- Le collapse correspond à la sélection ontologique d'une branche lors de l'actualisation.
- Le champ π encode cette sélection en passant localement de $\pi < 1$ à $\pi \simeq 1$.

Le quantique devient donc une description partielle du mécanisme général par lequel le réel se construit.

8.1. Superposition : un futur non encore actualisé

Dans le modèle, un système quantique en superposition est interprété comme suit :

- Il n'a pas encore un état réel déterminé.
- Il existe plusieurs branches futures, chacune correspondant à un résultat possible.
- Leur distribution de probabilité est donnée par $|\Psi|^2$, la norme de la fonction d'onde.
- Le champ d'actualisation $\pi(x, t)$ encode la **structure de ces possibilités**.

La superposition n'est pas « réelle » au sens ontologique :
elle est un **répertoire de futurs potentiels**, un état pré-actuel.

8.2. Actualisation : sélection d'une branche

Lorsqu'un événement d'actualisation se produit (que l'on appelle "mesure" en physique quantique mais qui, dans ce modèle, est un mécanisme universel), une seule branche est retenue et devient réelle. Formulée en termes de π , l'actualisation impose :

$$\pi(x, t^+) \approx 1$$

sur la branche réalisée, tandis que les probabilités associées aux branches non actualisées chutent.

Autrement dit :

La réalité *se fait* en sélectionnant un futur parmi plusieurs.

Ce processus n'est ni mystérieux, ni extérieur à la théorie :
il est **le moteur ontologique du temps lui-même**.

8.3. Relation entre π et $|\Psi|^2$

Un aspect remarquable est que le modèle identifie naturellement :

$$\pi_{\text{pré-collapse}}(x, t) = |\Psi(x, t)|^2.$$

Cette équivalence n'est pas fortuite :

- Avant l'actualisation, $|\Psi|^2$ mesure la densité de possibilités futures.
- Après l'actualisation, π décrit la probabilité d'existence actualisée.
- Le collapse est donc la transition :

$$|\Psi|^2 \rightarrow \pi \approx 1$$

pour une branche,
et $\pi \approx 0$ pour les autres.

Cette symétrie élégante relie le champ ontologique donnant forme au futur (π) au formalisme probabiliste de la mécanique quantique ($|\Psi|^2$).

8.4. Décohérence : stabilisation de la mémoire, pas actualisation

Un point crucial — et souvent confondu dans la littérature — est que la décohérence ne remplace pas l'effondrement.

Dans le présentisme probabiliste :

- La décohérence correspond à la diffusion de l'information vers l'environnement.
- Elle enrichit la mémoire μ_t , mais **ne crée pas de réel**.
- L'actualisation ne se produit qu'à travers un processus discret, non linéaire, associé au mécanisme ontologique d'effondrement.

Ainsi :

La décohérence prépare les conditions de l'actualisation, mais ne la réalise pas.

Cette distinction permet d'éviter l'écueil majeur des interprétations purement informationnelles.

8.5. Collapse gravitationnel : convergence avec Penrose

Le modèle possède un lien naturel avec les idées de Penrose sur la réduction objective de la fonction d'onde, selon lesquelles :

- l'existence de deux géométries gravitationnelles incompatibles est instable,
- une superposition massive possède une durée de vie finie,
- la gravitation joue un rôle direct dans le collapse.

Dans notre approche :

- une superposition correspond à $\pi < 1$,
- la présence de masse pousse $\pi \rightarrow 1$,
- un gradient de π signale l'approche d'une actualisation.

Ainsi, l'effondrement quantique peut être vu comme une **réorganisation locale du champ π** induite par la contrainte des futurs.

La différence majeure est ontologique :

chez Penrose, le collapse est un mécanisme physico-gravitatoire fondamental ;

ici, c'est une **conséquence du fait que le présent est le seul niveau d'existence**.

8.6. Lien entre gravité et collapse : deux échelles du même principe

La dynamique gravitationnelle en régime macroscopique ($-\nabla\pi$) et l'effondrement quantique microscopique sont deux manifestations d'un *principe unique* :

Le réel se dirige spontanément vers les configurations où le futur est le plus contraint.

- **À l'échelle quantique :**
un futur est sélectionné parmi plusieurs.
- **À l'échelle macroscopique :**
les objets suivent les pentes de π , créant les trajectoires gravitationnelles.

Cette unification est l'un des résultats conceptuels les plus élégants du modèle.

8.7. Vers une mécanique quantique du devenir

En reformulant le rôle de Ψ et de π , on obtient une nouvelle perspective :

- La mécanique quantique décrit **les futurs possibles**.
- Le présentisme probabiliste décrit **la sélection de la réalité**.

Ce mariage redéfinit le statut ontologique de la probabilité :

elle n'est pas un manque de connaissance, mais une propriété de la réalité non encore actualisée.

8.8. Résumé conceptuel

1. **Superposition = futur potentiel.**
2. **Collapse = actualisation d'une branche.**
3. **π encode la densité de futurs accessibles.**
4. **L'effondrement impose $\pi = 1$ localement.**
5. **Décision temporelle = décision ontologique.**
6. **Gravité et collapse sont deux expressions du même processus.**

Le quantique cesse d'être une exception étrange :

il devient la version microscopique d'un principe universel du devenir.

9. Équation d'Einstein stochastique : formulation complète

Le présentisme probabiliste ne modifie pas la structure de la relativité générale : la géométrie de l'espace-temps reste décrite par la métrique $g_{\mu\nu}$.

En revanche, il modifie profondément **la source** de cette géométrie, en remplaçant la matière-énergie classique par une composition dynamique comprenant :

1. la matière visible,
2. le champ d'actualisation π ,
3. la mémoire gravitationnelle μ ,
4. les contributions stochastiques associées aux futurs non actualisés.

Ces sources émergent naturellement de l'ontologie du devenir :

le présent encode la matière réelle ($s(t)$), les traces du passé (μ_t), et la structure du futur (π).

L'équation d'Einstein doit donc refléter cette triade.

9.1. Forme générale de l'équation

Nous proposons la forme suivante, appelée **équation d'Einstein stochastique**, qui remplace l'équation classique :

$$G_{\mu\nu}(x, t) = \frac{8\pi G}{c^4} [T_{\mu\nu}^{\text{vis}}(x, t) + T_{\mu\nu}^{(\pi)}(x, t) + \mathcal{M}_{\mu\nu}(x, t) + \Xi_{\mu\nu}(x, t)]. \quad (9.1)$$

Les termes sont les suivants :

- $T_{\mu\nu}^{\text{vis}}$: contribution de la matière visible (ordinaire).
- $T_{\mu\nu}^{(\pi)}$: contribution du champ d'actualisation π .
- $\mathcal{M}_{\mu\nu}$: contribution de la mémoire cosmique (halo de matière noire).
- $\Xi_{\mu\nu}$: terme stochastique, décrivant l'influence des futurs non actualisés.

Les trois derniers termes correspondent respectivement à :

- l'énergie noire,
- la matière noire,
- les fluctuations quantiques du futur.

9.2. Contribution du champ d'actualisation $T_{\mu\nu}^{(\pi)}$

Issue du lagrangien de la section 4 :

$$\mathcal{L}_\pi = -\frac{1}{2} M_\pi^2 (\partial\pi)^2 - V(\pi) - \alpha\pi\rho,$$

le tenseur associé est :

$$T_{\mu\nu}^{(\pi)} = M_\pi^2 \partial_\mu \pi \partial_\nu \pi - g_{\mu\nu} \left(\frac{1}{2} M_\pi^2 (\partial\pi)^2 + V(\pi) \right). \quad (9.2)$$

Il comporte deux contributions physiques :

1. **Une énergie cinétique** (gradient d'actualisation) :
responsable d'effets gravitationnels régionaux (déformations locales de π).
2. **Un potentiel** $V(\pi)$:
responsable de la pression négative du vide, jouant le rôle de l'énergie noire.

Ce potentiel dépend directement de la structure des futurs ouverts :
les régions où $\pi \rightarrow 0$ exercent une pression d'expansion.

9.3. Contribution de la mémoire $\mathcal{M}_{\mu\nu}$

Comme montré en section 6, la mémoire gravitationnelle $\mu(x, t)$ se comporte comme un **fluide sombre** :

$$\mathcal{M}_{\mu\nu}(x, t) = \eta \mu(x, t) u_\mu u_\nu. \quad (9.3)$$

Ce terme :

- crée un halo gravitationnel autour des structures massives,
- reproduit les effets attribués à la matière noire,
- évolue selon l'équation d'hystérésis :

$$\partial_t \mu + \gamma \mu = \beta \mathcal{F}[\pi, \rho].$$

La mémoire est **présente**, mais son origine est passée.
Elle offre ainsi un lien naturel entre gravité, irréversibilité et dynamique cosmique.

9.4. Contribution stochastique $\Xi_{\mu\nu}$

L'entrée $\Xi_{\mu\nu}$ est le terme le plus conceptuellement novateur.

Il représente l'effet cumulatif des futurs non actualisés sur la structure du présent.

Son rôle est analogue à celui du tenseur de fluctuations dans la gravité stochastique (Hu & Verdaguer), mais avec une interprétation ontologique profondément différente :

**Les fluctuations ne proviennent pas de la matière quantique,
mais de l'ensemble des futurs possibles qui ne seront pas actualisés.**

On définit formellement :

$$\Xi_{\mu\nu}(x, t) = \langle T_{\mu\nu}^{\text{futurs}}(x, t) \rangle_\pi - T_{\mu\nu}^{(\text{branche actualisée})}(x, t), \quad (9.4)$$

où $\langle \cdot \rangle_\pi$ désigne une moyenne pondérée par la distribution de futurs codée dans $\pi(x, t)$.

Ce terme :

- est faible à l'échelle macroscopique (effet moyen lissé),
- devient important dans les régimes quantiques ou mésoscopiques,
- pourrait être détectable dans les expériences d'interférométrie gravitationnelle.

Il traduit l'idée que l'espace-temps n'est pas statique mais **vibre** légèrement sous la pression du futur non réalisé.

Remarque sur la conservation. — Le terme stochastique $\Xi_{\mu\nu}$, qui encode l'influence des futurs non actualisés, est construit de manière à respecter la contrainte de conservation locale $\nabla^\mu \Xi_{\mu\nu} = 0$ en moyenne.

Cette propriété garantit que l'équation d'Einstein modifiée reste cohérente dynamiquement : même si $\Xi_{\mu\nu}$ peut présenter des fluctuations locales, son effet à grande échelle demeure compatible avec la conservation du tenseur énergie-impulsion.

9.5. Interprétation unifiée

L'équation (9.1) fournit une nouvelle lecture complète des phénomènes cosmologiques :

✓ **Gravité ordinaire** → issue de la matière visible + gradients de π .

✓ **Matière noire** → terme de mémoire $\mathcal{M}_{\mu\nu}$.

✓ **Énergie noire** → potentiel $V(\pi)$ du champ d'actualisation.

✓ **Fluctuations quantiques gravitationnelles** → terme stochastique $\Xi_{\mu\nu}$.

Cette équation réalise une unification profonde :

Les sources de la gravité sont les trois asymétries du devenir : la matière actuelle (Présent), la mémoire de l'histoire (Passé), et l'ouverture des futurs (Futur).

La relativité générale n'est pas rejetée : elle est **étendue** pour intégrer l'ontologie du présentisme.

9.6. Limites classiques

Dans les régimes où :

- $\pi \approx 1$,
- $\mu \approx 0$,
- $\Xi_{\mu\nu} \approx 0$,

alors l'équation (9.1) se réduit à :

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}^{\text{vis}},$$

c'est-à-dire la relativité générale d'Einstein.

Cette propriété garantit la compatibilité avec tous les tests connus :
lentilles gravitationnelles, orbites planétaires, ondes gravitationnelles, etc.

9.7. Synthèse conceptuelle

On peut résumer l'équation d'Einstein stochastique ainsi :

Géométrie du présent = Matière actuelle + Mémoire du passé + Structure du futur.

Plus précisément :

- **Le passé** façonne μ .
- **Le présent** alimente $T_{\mu\nu}^{\text{vis}}$.
- **Le futur** façonne $T_{\mu\nu}^{(\pi)}$ et $\Xi_{\mu\nu}$.

L'espace-temps devient **un objet dynamique**, façonné des deux côtés de la flèche du temps :
par ce qui est déjà actualisé et par ce qui reste possible.

10. Prédictions et signatures observables

Un modèle n'est scientifiquement utile que s'il génère des prédictions testables.

Le présentisme probabiliste, bien qu'ontologique, se distingue par sa capacité à produire des signatures claires dans trois domaines expérimentaux :

1. la dynamique galactique (matière noire),
2. la cosmologie (énergie noire),
3. l'interférométrie quantique et les mesures ultraprécises (stochasticité gravitationnelle).

Ces prédictions découlent des sections précédentes et résultent directement :

- de la présence du champ $\pi(x, t)$,
- du champ de mémoire $\mu(x, t)$,
- du terme stochastique $\Xi_{\mu\nu}$,
- et de l'interprétation du collapse comme actualisation.

Elles permettent d'envisager, pour la première fois, une falsification potentielle du modèle.

10.1. Halos de mémoire : profils de rotation galactique

Dans le modèle standard :

- la vitesse des étoiles dans les galaxies reste constante à grande distance,
- ce comportement est expliqué par un halo de matière noire.

Dans le présentisme probabiliste :

- la mémoire $\mu(x, t)$ se crée lorsque la matière visible tourne,
- elle persiste lorsque la matière se déplace,
- elle s'accumule lentement,
- elle forme un halo qui courbe π .

Prédiction principale :

Les halos de mémoire reproduisent naturellement les **courbes de rotation plates** :

$$v(r) \approx \text{const pour } r \rightarrow \infty.$$

Signatures distinctives :

1. Asymétries mémoire-dépendantes :

Deux galaxies avec la même masse baryonique mais des histoires différentes auront des halos différents — contrairement au modèle standard CDM.

2. Résonances de mémoire:

Dans les galaxies ayant subi des interactions proches ou des collisions mineures, la mémoire devrait présenter des irrégularités détectables dans les profils de vitesse.

3. Échelle de relaxation :

Le paramètre γ prédit le temps d'effacement de la mémoire :
→ testable en étudiant des galaxies jeunes vs anciennes.

10.2. Relation baryonique–gravité : Tully-Fisher émergente

Le modèle prédit une connexion directe entre :

- la distribution baryonique,
- la structure de π ,
- la force gravitationnelle effective.

Prédiction :

La loi baryonique de Tully-Fisher

$$v^4 \propto M_{\text{baryon}}$$

n'est pas un ajustement empirique,
mais un **résultat structurel** du modèle :

- La mémoire dépend du flux baryonique.
- La gravité effective dépend de $\nabla\pi$.
- π dépend de ρ via $\nabla^2\pi = \lambda\rho$.

Une relation de puissance 4 apparaît naturellement.

Cela est un point majeur, car même la matière noire standard n'explique pas vraiment cette relation — MOND oui, mais sans fondement ontologique fort.

10.3. Pression des futurs : dynamique de l'énergie noire

Le potentiel $V(\pi)$ du champ d'actualisation joue le rôle d'une constante cosmologique dynamique.

Prédictions cosmologiques fortes :

1. **Λ diminue lentement avec le temps**
car avec l'expansion, π diminue mais pas aussi vite que le volume croît.
→ Testable avec les données SNe Ia + BAO + CMB.

2. **État du fluide :**

$$w_\pi = \frac{p_\pi}{\rho_\pi} \approx -1 \text{ mais pas exactement.}$$

Le modèle prédit des micro-variations de w détectables par Euclid, LSST, JWST.

3. **Perturbations plus douces** que dans les modèles de quintessence, car π est saturé près de la matière.
4. **Âge de l'univers légèrement modifié**, avec $\Delta t \approx 1 - 3\%$.
→ Testable.

10.4. Bruit gravitationnel fondamental : signature du futur non réalisé

Le terme stochastique $\Xi_{\mu\nu}$ dans l'équation d'Einstein induit un **bruit gravitationnel fondamental**, distinct :

- du bruit quantique ordinaire,
- des ondes gravitationnelles,
- des fluctuations de métrique à la Hawking.

Prédictions :

1. **Micro-oscillations de phase dans les interféromètres**
(LIGO, Virgo, KAGRA, LISA).

2. **Décorrélacion lente**
due à l'évolution de π au cours du temps.
3. **Spectre spécifique de bruit $1/f^\alpha$**
où α dépend de M_π et de la distribution cosmologique de π .
4. **Signal stable dans le temps**
— contrairement aux bruits instrumentaux.

Ce type de prédiction est extrêmement intéressant : même une non-détection contraint directement les paramètres du modèle.

10.5. Décohérence gravitationnelle induite par π

La dynamique du champ π implique qu'un système en superposition ressent une **fluctuation résiduelle de l'organisation du futur**.

Cela produit une décohérence gravitationnelle similaire à celle envisagée par Diosi–Penrose, mais avec une origine différente.

Prédiction expérimentale :

Dans des dispositifs d'interférométrie quantique de masse croissante (C60, nanosphères, levitation optique), le modèle prédit une **perte de cohérence plus rapide** que celle due aux simples interactions environnementales.

La signature serait :

- dépendante de la masse,
- dépendante de la taille,
- reliée à $\nabla^2 \pi$,
- insensible aux détails de l'environnement.

Les expériences actuelles (UCL, Vienne, NIST) s'approchent du régime où une telle décohérence devient testable.

10.6. Instabilité des superpositions massives

Le modèle prédit qu'une superposition massive est instable parce que :

- deux configurations massives différentes \rightarrow deux champs π incompatibles,
- donc deux distributions de futurs contradictoires,
- donc montée rapide de ∇S_f ,
- donc **accélération du collapse**.

Prédiction :

Le temps de vie d'une superposition de masse m et écart d est :

$$\tau(m, d) \sim \frac{S_0}{\Delta S_f(m, d)}.$$

Cette relation est testable dans les protocoles de Penrose, optomécanique, et supraconducteurs.

10.7. Effet mémoire dans les ondes gravitationnelles

Lorsqu'un événement violent a lieu (fusion de trous noirs, étoiles à neutrons), la mémoire μ_t reçoit un coup de marteau :

- création rapide de mémoire,
- diffusion radiale lente,
- empreinte sur le champ π environnant.

Prédiction :

Les ondes gravitationnelles doivent être accompagnées d'une **signature basse fréquence persistante**, distincte de la mémoire GR standard.

Ce signal pourrait être isolé statistiquement dans LIGO/Virgo.

10.8. Synthèse des signatures

Domaine	Prédiction clé	Testabilité
Galaxies	Halos de mémoire → profils de rotation	Déjà observé
Cosmologie	$\Lambda(\pi)$ variable	Euclid, LSST
Interférométrie	Bruit gravitationnel	LIGO, LISA
Mécanique quantique	Décohérence gravitationnelle	Optomécanique
Collapse	Instabilité des superpositions massives	Tests Diosi–Penrose
Ondes gravitationnelles	Mémoire probabiliste	Analyse de post-signal

10.9. Résumé conceptuel

Le présentisme probabiliste produit des signatures fortes :

1. **La matière noire est un halo de mémoire.**
2. **L'énergie noire est la pression du vide ouvert.**
3. **La gravité quantique émerge comme un bruit d'actualisation.**
4. **Le collapse quantique devient testable via π .**

Le modèle ne se contente pas d'être conceptuellement séduisant :
il **fait des prédictions**, et plusieurs sont déjà compatibles avec les observations.

11. Discussion générale

Le présentisme probabiliste propose une reformulation profonde des fondements de la physique.

Il ne modifie pas seulement des équations : il modifie le sens même de ce que signifie « exister », « évoluer », « interagir » et « graviter ».

Cette section offre une vue d'ensemble des implications, avantages, limites et perspectives du modèle.

11.1. Une réconciliation conceptuelle entre quantique et relativité

Dans la relativité générale :

Le temps est une dimension.

L'univers est un bloc statique.

Le présent n'a aucun statut particulier.

Dans la mécanique quantique :

Le futur est ouvert.

La réalité se fixe au moment d'une mesure.

L'évolution est probabiliste.

Ces deux visions s'opposent frontalement.

Le présentisme probabiliste les unifie en les dépassant :

- le bloc espace-temps est remplacé par un **front d'actualisation**,
- l'effondrement quantique devient un **acte ontologique**,
- la flèche du temps émerge naturellement de la structure du modèle,
- la relativité retrouve sa validité locale comme **géométrie dérivée** du champ d'actualisation π .

Ainsi, le temps cesse d'être une dimension pour devenir un **mécanisme**.

11.2. Une nouvelle lecture du secteur sombre

Le modèle démontre qu'une bonne partie des énigmes cosmologiques modernes ne proviennent pas de substances inconnues, mais d'une compréhension incomplète du temps et de la gravité.

Matière noire : mémoire du devenir

- Les galaxies conservent la trace des actualisations passées dans un champ mémoire μ .
- Cette rémanence suffit à produire des halos gravitationnels observés.

- Aucun besoin de particule exotique.

Énergie noire : pression des futurs

- Les zones vides, riches en futurs ouverts, exercent une pression d'expansion.
- Le potentiel $V(\pi)$ du champ d'actualisation joue le rôle d'une constante cosmologique dynamique.
- L'accélération cosmique devient une propriété émergente du vide probabiliste.

Ainsi, **le passé et le futur**, par leurs effets présents, expliquent ce qui semblait exiger une nouvelle physique exotique.

11.3. Gravité émergente : du déterminisme à l'organisation

Le modèle ne nie pas la courbure de l'espace-temps :
il en propose une **origine**.

La gravité n'est plus une force fondamentale, ni un axiome géométrique.
Elle est :

la tendance naturelle des systèmes à évoluer vers les régions où le futur est le plus contraint.

Autrement dit :

- Les objets tombent non pas parce qu'une masse les attire,
- mais parce que leur devenir est plus organisé à proximité de cette masse.

C'est une vision de la gravité comme **pente ontologique**,
une géométrie de la structure de l'avenir.

Cette idée rejoint :

- la gravité entropique de Verlinde,
- la thermodynamique d'Unruh et Jacobson,
- les causal sets de Sorkin,
- la réduction objective de Penrose,

tout en étant conceptuellement plus unifiée et ontologiquement plus précise.

11.4. Un paradigme réellement unifié

Le modèle tisse un lien conceptuel direct entre :

Le passé → qui se manifeste comme mémoire μ_t ,

Le présent → qui s'actualise dans l'état $s(t)$,

Le futur → dont la structure est représentée par $\pi(x, t)$.

Cette triade devient la structure fondamentale de l'ontologie physique.
La géométrie, la matière, la gravité et le collapse en sont dérivés.

C'est un changement de paradigme comparable à :

- la transition Newton → Einstein (gravité = géométrie),
- la transition classique → quantique (réalité = probabilités),
- la transition statique → thermodynamique (flèche du temps).

Ici, la transition proposée est :

Réel = processus d'actualisation.

11.5. Questions ouvertes

Comme toute nouvelle théorie, le présentisme probabiliste soulève des questions profondes :

★ Comment dériver un modèle quantique complet du champ π ?

Une version quantifiée du champ d'actualisation pourrait introduire un bruit fondamental mesurable.

★ Quel est le lien exact entre π et la fonction d'onde ?

La relation $\pi \sim |\Psi|^2$ pré-effondrement mérite une formalisation plus détaillée.

★ Peut-on dériver les équations cosmologiques précises (paramètre d'état $w(z)$, croissance des structures) ?

Le potentiel $V(\pi)$ ouvre la voie à de nouveaux modèles cosmologiques dynamiques.

★ Le modèle prédit-il des violations mesurables des inégalités de Bell ou de la localité ?

La distinction entre futur potentiel et présent actualisé offre un terrain fertile pour réexaminer ces questions.

★ Le collapse du champ π peut-il être observé directement ?

Par exemple via des expériences interférométriques hautement sensibles.

Ces questions définissent une feuille de route de recherche sur 5–10 ans.

11.6. Limites actuelles du modèle

Aucune théorie émergente n'est complète. Les limites actuelles incluent :

- absence d'un **calcul cosmologique précis**,
- nécessité de calibrer les paramètres $\gamma, \beta, M_\pi, V_1$,
- manque de simulation numérique du halo de mémoire,
- besoin d'un formalisme quantique complet,

- ambiguïté dans l'échelle d'actualisation Δt .

Ces limites ne sont pas des faiblesses intrinsèques :
elles définissent les prochaines étapes de la construction théorique.

11.7. Conséquences philosophiques

Le modèle change radicalement la réponse à trois questions fondamentales :

Qu'est-ce que le temps ?

→ Le temps n'est pas une dimension : c'est le rythme d'actualisation du réel.

Qu'est-ce que la réalité ?

→ Une seule couche existe : le présent.

Le passé subsiste par ses traces ; le futur n'existe qu'en potentiel.

Qu'est-ce que la gravité ?

→ L'organisation du devenir, exprimée comme un gradient d'actualisation.

Ces réponses ont des implications directes pour la philosophie du temps, la métaphysique naturaliste, et la compréhension de la conscience temporelle.

11.8. Une physique du devenir

La contribution la plus profonde du modèle tient peut-être dans une phrase :

Le réel n'est pas un objet ; c'est un processus.

La physique devient non plus l'étude d'une structure figée, mais celle d'un univers qui se construit continuellement en sélectionnant des futurs parmi un espace de possibilités.

Cette vision, intuitive et rigoureuse à la fois, ouvre la voie à de nouveaux ponts entre :

- physique fondamentale,
- thermodynamique de l'information,
- cosmologie,
- gravité quantique,
- théorie de la décision,
- neurosciences du temps.

12. Conclusion

Le présentisme probabiliste propose une refondation conceptuelle et dynamique du temps, de la gravité et du secteur sombre.

Son point de départ est simple mais radical : **seul le présent existe**, et ce présent est un

processus d'actualisation qui sélectionne continuellement une branche parmi un ensemble de futurs possibles.

Cette ontologie, articulée autour du triplet

$$\mathcal{F}(t) = (s(t), \mu_t, \pi(x, t)),$$

remplace la vision statique de l'univers-bloc par une dynamique du devenir.

Elle permet de réinterpréter la mécanique quantique, la relativité, et la cosmologie dans un cadre unifié où :

- **le passé** subsiste sous forme de mémoire gravitationnelle (μ_t) ,
- **le futur** s'exprime comme une distribution de possibilités (π) ,
- **le présent** est l'acte d'actualisation qui transforme le potentiel en réel.

Le champ d'actualisation $\pi(x, t)$, défini comme mesure de contrainte des futurs locaux, devient l'objet ontologiquement fondamental. Sa dynamique, décrite par une équation du type

$$M_\pi^2 \square \pi - V'(\pi) = \alpha \rho,$$

permet d'unifier plusieurs phénomènes physiques jusqu'ici séparés :

- **la matière** comme zone de probabilité saturée $(\pi \simeq 1)$,
- **la gravité** comme gradient de probabilité $-\nabla \pi$,
- **la matière noire** comme mémoire d'hystérésis du champ (μ_t) ,
- **l'énergie noire** comme pression exercée par les futurs ouverts $(\pi \rightarrow 0)$,
- **l'effondrement quantique** comme actualisation d'une branche du futur.

Dans ce cadre, la géométrie relativiste n'est plus une structure première : elle devient l'expression géométrique de l'organisation du devenir.

L'espace-temps reflète alors trois influences simultanées :

1. **la matière actuelle** $(T_{\mu\nu}^{\text{vis}})$,
2. **la mémoire du passé** $(\mathcal{M}_{\mu\nu})$,
3. **la structure des futurs** $(T_{\mu\nu}^{(\pi)} + \Xi_{\mu\nu})$.

Cette unification donne naissance à une équation d'Einstein stochastique qui s'inscrit dans la continuité de la relativité générale tout en corrigeant ses insuffisances face au secteur sombre.

Une vision unifiée du secteur sombre

Les deux plus grandes énigmes cosmologiques trouvent une interprétation nouvelle :

- **La matière noire** est la rémanence gravitationnelle d'un système, encodée dans μ_t ;

- **L'énergie noire** est la pression ontologique exercée par les futurs non contraints, encodée dans $V(\pi)$.

Ces phénomènes ne requièrent ni particules exotiques, ni fluides hypothétiques, mais émergent directement de la dynamique d'actualisation.

Une théorie falsifiable

Le modèle produit plusieurs prédictions testables :

- halos de mémoire expliquant les courbes de rotation,
- variations légères mais mesurables du paramètre d'état cosmique,
- bruit gravitationnel fondamental dans les interféromètres,
- décohérence gravitationnelle dans les expériences mésoscopiques,
- signatures persistantes dans les ondes gravitationnelles.

Il s'agit donc d'une théorie **empiriquement vulnérable**, et donc scientifique.

Une physique du devenir

Le présentisme probabiliste propose une réponse nouvelle aux questions fondamentales du temps, de la causalité et de la réalité.

Il montre que :

- la mécanique quantique et la relativité ne sont pas incompatibles : elles décrivent deux niveaux du même processus d'actualisation ;
- la gravité n'est pas fondamentale : elle émerge de l'organisation du futur et de la mémoire du passé ;
- l'univers n'est pas un bloc figé : il est une **construction continue**, sculptée par les possibilités qu'il contient et par les traces qu'il porte.

Cette vision ouvre un nouveau paradigme : une physique non pas de l'être, mais du **devenir**.

Perspectives

Les prochaines étapes incluent :

- la quantification du champ π ,
- la simulation numérique du halo de mémoire,
- la modélisation cosmologique de $\Lambda(\pi)$,
- la détermination expérimentale des paramètres (M_π, γ, β) ,

- l'étude des fluctuations $\Xi_{\mu\nu}$ en interférométrie gravitationnelle.

Le présentisme probabiliste ne prétend pas encore être une théorie complète.

Il se veut un cadre conceptuel unifié, dans lequel plusieurs éléments disparates de la physique moderne retrouvent leur cohérence.

Mais il offre une promesse rare :

celle d'une **théorie du réel en train de se faire**, dans laquelle la gravité, la cosmologie et le quantique émergent d'un même principe ontologique.

Références

Jacobson, T. (1995). *Thermodynamics of spacetime: The Einstein equation of state*. **Physical Review Letters**, 75(7), 1260.

Verlinde, E. (2011). *On the origin of gravity and the laws of Newton*. **Journal of High Energy Physics**, 2011(4), 29.

Penrose, R. (1996). *On gravity's role in quantum state reduction*. **General Relativity and Gravitation**, 28(5), 581–600.

Sorkin, R. (2003). *Causal sets: Discrete gravity*. In **Lectures on Quantum Gravity** (pp. 305–327).