

Réalisme résonant : la cadence universelle de c

Charlotte Lemoine^{1*}

¹Centre de documentation et d'information sur le bruit, 14 rue Jules Bourdais, Paris, 75107, France.

Corresponding author(s). E-mail(s): Charlottelemoine276@gmail.com;

Résumé

Cet article propose le *Réalisme résonant*, un cadre ontologique unifiant la physique quantique et la physique classique à partir de deux intuitions fondamentales. Premièrement, nous réinterprétons la constante invariante c non pas comme une simple limite cinématique de vitesse, mais comme une *cadence universelle* — le rythme fondamental selon lequel des structures potentielles dans un domaine intérieur (l'espace Ω) se projettent en événements observables de l'espace-temps. Deuxièmement, nous soutenons que le comportement quantique n'émerge pas de l'échelle microscopique, mais d'un *confinement topologique* : atomes, noyaux, cavités optiques et circuits supraconducteurs sont tous des enceintes cohérentes permettant des résonances intérieures, qui diffèrent par leur profondeur et leur qualité plutôt que par leur taille métrique.

Le cadre postule que la réalité physique possède une structure duale : un espace Ω de modes résonants potentiels, fibré au-dessus de l'espace-temps, avec une projection gouvernée par un seuil de résonance θ . Seuls les modes dont la cadence interne s'aligne sur c et satisfait $\mathcal{R}(\omega; c) \geq \theta$ se manifestent comme configurations stables. Cette ontologie éclaire plusieurs paradoxes — la mesure comme franchissement de seuil, le chat de Schrödinger comme résonance macroscopique avortée, les corrélations EPR comme modes partagés dans Ω , et la flèche du temps comme diffusion de cohérence — sans modifier les équations établies.

La mécanique quantique standard est retrouvée comme théorie effective de la résonance quasi parfaite. Empiriquement, le cadre prédit des signatures dépendantes de la cohérence dans le bruit quantique, testables par des expériences de précision sur des systèmes à fort facteur de qualité. Nous présentons le *Réalisme résonant* comme un programme de recherche parcimonieux invitant à une collaboration interdisciplinaire.

Keywords: Résonance, Cohérence, Transition quantique–classique, Ontologie de la mécanique quantique, Constantes fondamentales, Réalisme structurel

1 Introduction

Depuis plus d'un siècle, les physiciens cherchent un cadre unifié conciliant la mécanique quantique et la relativité générale. Les deux théories connaissent un succès remarquable dans leurs domaines respectifs, mais elles reposent sur des conceptions profondément différentes de la réalité : la physique quantique décrit une évolution probabiliste des états sur un fond d'espace-temps fixe, tandis que la relativité générale conçoit la gravitation comme la manifestation géométrique d'un espace-temps lui-même dynamique. Cette divergence engendre de fortes tensions mathématiques et conceptuelles dès lors qu'on tente de décrire des phénomènes où les deux régimes devraient interagir — à l'échelle de Planck, à l'intérieur des trous noirs ou près de l'origine de l'Univers. Malgré des efforts soutenus, la gravitation résiste encore à la quantification, et la recherche d'un compte rendu cohérent de la géométrie, de la cohérence et de l'indétermination reste ouverte.

Au cours des dernières décennies, plusieurs grands cadres théoriques ont tenté de combler ce fossé. Parmi les plus influents figurent la théorie des cordes [1], la gravitation quantique à boucles [2, 3], ainsi que les approches holographiques ou émergentes [4]. Chacun propose une voie distincte vers l'unification : objets étendus vibrant dans des dimensions supérieures, quanta discrets de géométrie, ou émergence de l'espace-temps à partir d'une information quantique sous-jacente. Les visions relationnelles de la théorie quantique, comme la mécanique quantique relationnelle [5], et les approches indépendantes d'un fond en gravitation quantique ont souligné que les états physiques pourraient être fondamentalement relationnels plutôt qu'absolus. D'autres propositions, comme l'effondrement gravitationnellement induit de Penrose [6] ou les modèles relationnels de Smolin [7], explorent des alternatives ontologiques dans lesquelles cohérence, structure relationnelle ou réduction objective jouent un rôle central. Ensemble, ces programmes définissent le paysage actuel des tentatives d'unification du quantique et du gravitationnel.

Le Réalisme résonant se distingue de ces propositions existantes de trois manières fondamentales. *Premièrement*, il ne part ni de la théorie quantique ni de la gravitation, mais de leur invariant commun : la constante c , réinterprétée comme cadence universelle plutôt que comme borne cinématique. *Deuxièmement*, il remplace les distinctions fondées sur l'échelle (microscopique/macrosopique) par un critère topologique : ce sont le confinement et la cohérence, et non la taille métrique, qui déterminent le comportement quantique. *Troisièmement*, il opère une réduction ontologique plutôt qu'une prolifération : pas de dimensions supplémentaires, pas d'univers ramifiés, pas de variables cachées dans l'espace-temps — seulement un domaine pré-géométrique Ω dont les projections résonantes constituent la réalité observable. Là où d'autres cadres ajoutent de la structure pour préserver le formalisme, le Réalisme résonant met au jour une structure commune sous-jacente aux formalismes existants.

Le but de ce travail n'est pas de présenter une théorie mathématique achevée, mais de proposer un cadre ontologique parcimonieux dans lequel cohérence, mesure et géométrie de l'espace-temps émergent d'un principe unique de résonance lié à c . L'article est organisé comme suit. La section 2 passe en revue les différents rôles de c dans les théories physiques et motive sa réinterprétation comme cadence universelle plutôt que comme simple paramètre cinématique. La section 4 introduit les structures

de base du Réalisme résonant et montre comment la mécanique quantique standard est retrouvée comme cas limite. La section 5 discute les implications empiriques et conceptuelles, y compris de possibles signatures dans des systèmes à forte cohérence, et la section 6 situe la proposition dans le paysage plus large des interprétations et de l'unification.

L'objectif de cet article n'est donc pas de remplacer ces lignes de recherche bien établies, mais d'offrir un arrière-plan ontologique unificateur dans lequel la décohérence, la structure relationnelle, les corrélations non locales et les descriptions géométriques peuvent être vues comme différents aspects d'une seule image fondée sur la résonance.

2 Les rôles de c à travers les théories physiques

2.1 De Maxwell à Einstein : l'émergence de c

La constante c apparaît d'abord explicitement dans les équations de Maxwell comme le rapport entre les unités électromagnétiques et électrostatiques. Dans son *Treatise on Electricity and Magnetism* (1873), Maxwell a montré que la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide est

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}, \quad (1)$$

où ε_0 et μ_0 sont la permittivité et la perméabilité du vide. Dans ce cadre, c était initialement comprise comme la vitesse de phase des ondes électromagnétiques dans le vide.

Lorsque Maxwell remarqua que cette vitesse théorique coïncidait avec la vitesse de la lumière mesurée expérimentalement, il proposa que la lumière elle-même est une onde électromagnétique et que c représente la vitesse de la lumière dans le vide.

Avec la relativité restreinte, Einstein donne à c un statut plus profond : ce n'est plus la vitesse d'un signal particulier dans un milieu, mais un *invariant fondamental* de la structure de l'espace-temps. c devient le facteur de conversion entre intervalles temporels et spatiaux, fixe la structure causale et entre dans la métrique de Minkowski comme constante géométrique. La relativité restreinte n'affirme pas seulement que rien ne peut aller plus vite que c ; elle construit la cinématique même de l'espace-temps autour de cet invariant.

2.2 Le rôle de c en mécanique quantique

Dans la formulation standard de la mécanique quantique non relativiste, c semble disparaître. L'équation de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V\psi \quad (2)$$

ne contient aucune référence explicite à c , et cela a souvent été interprété comme le signe que la mécanique quantique est formulée sur un fond non relativiste, effectivement newtonien.

Cependant, dès qu'on cherche la compatibilité avec la relativité, c revient au premier plan : dans les équations de Klein-Gordon et de Dirac, c relie directement les

dérivées temporelles et spatiales. Même à un niveau purement dimensionnel, on peut réécrire l'équation de Schrödinger en exprimant le temps en unités de longueur :

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial(ct)} = -\frac{\hbar^2}{2mc^2} \nabla^2 \psi + \frac{V}{c^2} \psi. \quad (3)$$

Cette réécriture ne change pas la physique, mais elle rend explicite le fait que c agit comme un *taux universel* reliant l'évolution temporelle à la variation spatiale. Toute unification éventuelle de la théorie quantique avec l'espace-temps relativiste doit respecter ce rôle de c comme pente invariante reliant temps et espace.

En ce sens, même lorsqu'elle n'est pas écrite explicitement, la cohérence entre dynamique quantique et structure relativiste présuppose la présence de c .

2.3 Cohérence, lumière et rôle génératif de c

Le développement de la physique des lasers a placé la cohérence au centre de la pratique expérimentale. Dans un laser, des atomes ou des milieux actifs à l'intérieur d'une cavité optique produisent de la lumière par émission stimulée, en amplifiant un mode spécifique de la cavité. Ce processus dépend cruciallement de la préservation des relations de phase : la lumière émise est *cohérente*, au sens où la phase du champ électromagnétique reste corrélée sur de longues durées.

Dans de tels systèmes, c apparaît de plusieurs façons entremêlées. Il fixe la relation entre fréquence et longueur d'onde des modes de cavité, détermine le temps nécessaire à la lumière pour effectuer un aller-retour dans la cavité, et entre dans les définitions du facteur de qualité et du temps de cohérence. Sans introduire aucun principe nouveau, on voit déjà que c n'est pas seulement une borne abstraite sur les vitesses : il fixe concrètement le *rythme* auquel les structures de phase se propagent, interfèrent et se verrouillent à l'intérieur de la cavité.

De ce point de vue phénoménologique, la lumière cohérente suggère que c peut être vue comme une *cadence universelle de propagation de phase* : c'est le paramètre qui fixe à quelle vitesse les structures de phase peuvent se reproduire et se maintenir dans l'espace-temps.

2.4 Fixation métrique et perte de contenu physique

En 1983, la définition du mètre a été reformulée en fixant la valeur numérique de c comme

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}, \quad (4)$$

faisant ainsi de c une partie de la définition du système SI plutôt qu'une quantité à mesurer. Cette décision a fourni une base métrologique robuste fondée sur des horloges atomiques très stables et a considérablement amélioré la précision.

Dans le même temps, cette décision produit un effet conceptuel secondaire : en transformant c en simple facteur de conversion entre horloges et règles, on risque d'oublier son statut de *constante physique* à *contenu dynamique*. Le fait que c soit maintenant fixée par définition ne diminue pas la profondeur empirique de son universalité, ni n'exclut la possibilité que son rôle dans la structure des lois physiques porte une signification ontologique plus riche que celle d'un simple coefficient géométrique figé.

2.5 Énergie, fréquence et rythme universel

Depuis Planck, la relation

$$E = h\nu \tag{5}$$

relie l'énergie à la fréquence d'oscillation. Pour les photons, avec $\nu = c/\lambda$, on obtient

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \tag{6}$$

ce qui montre que chaque quantum d'énergie électromagnétique correspond à une vibration dont la cadence est fixée par la combinaison de deux constantes universelles, h et c , réparties sur une longueur d'onde λ . Pour les particules massives, les relations de de Broglie et la formule d'énergie au repos $E = mc^2$ réintroduisent également c dans le lien entre fréquence interne, masse et énergie.

Que l'on considère les champs électromagnétiques, les particules relativistes ou les horloges atomiques, la même structure réapparaît : l'énergie est associée à une fréquence, et cette fréquence est liée à la propagation dans l'espace-temps par le même facteur universel c .

Pris ensemble, ces éléments suggèrent que la signification de c pourrait être plus profonde que son interprétation habituelle comme limite de vitesse ou facteur de conversion dimensionnel. À travers la physique classique et quantique, c joue de manière cohérente le rôle d'un *rythme universel* au cœur des processus physiques. L'hypothèse de travail du présent article est que ce rythme pourrait être l'une des clés permettant de penser ensemble descriptions quantiques et descriptions géométriques.

3 La cohérence comme frontière entre quantique et classique

3.1 Au-delà de l'argument d'échelle

Depuis la découverte de la quantification par Planck et le développement de la mécanique quantique au début du XXe siècle, il est devenu habituel de présenter le formalisme quantique comme « la théorie du microscopique » : atomes, électrons, photons, noyaux. Inversement, la mécanique classique et la relativité générale sont présentées comme les théories du monde « macroscopique ». Cette présentation est pédagogiquement commode, mais elle simplifie à l'excès la frontière réelle entre les régimes.

Les physiciens savent aujourd'hui que cette frontière n'est ni nette ni universelle. D'un côté, des effets quantiques sont observés à des échelles de plus en plus grandes : circuits supraconducteurs, oscillateurs mécaniques proches de l'état fondamental, condensats de Bose–Einstein, cavités avec nombres mésoscopiques de photons. De l'autre, des descriptions classiques restent remarquablement efficaces pour certains aspects de systèmes très petits, lorsque les fluctuations quantiques sont négligeables devant la précision expérimentale.

Un second point demeure souvent implicite : lorsque nous « regardons le petit », nous ne voyons jamais littéralement de minuscules billes. Voir le microscopique consiste en pratique à enregistrer des *interférences*, des contrastes, des réponses spectrales, puis à interpréter ces motifs comme les traces d'entités localisées. Regarder « dans le petit

» n'est ainsi pas seulement affaire d'échelle métrique ; c'est déjà entrer dans un régime où la structure de phase des champs — cohérence, interférence, modes normaux — devient l'objet premier de la description.

3.2 De la décohérence à la cohérence

Depuis les expériences pionnières d'Alain Aspect sur la violation des inégalités de Bell [8, 9], une grande partie de la littérature a interprété la frontière quantique–classique en termes de *décohérence*. Dans ce cadre, développé en détail par Wojciech Zurek et d'autres [10, 11], tout système réaliste est inévitablement couplé à un environnement comportant de nombreux degrés de liberté. Ce couplage intrique rapidement système et environnement, et les termes d'interférence de la matrice de densité réduite sont supprimés sur des échelles de temps généralement très courtes.

La décohérence explique ainsi pourquoi les superpositions quantiques macroscopiques sont difficiles à observer dans la vie quotidienne : elles sont effacées par l'environnement bien avant qu'une mesure n'en stabilise les effets. Cependant, de nombreuses expériences ont révélé la persistance de la cohérence dans des conditions jadis tenues pour essentiellement classiques, par exemple dans certains complexes photosynthétiques à température ambiante [12, 13], ainsi que dans des circuits supraconducteurs, des condensats de Bose–Einstein ou des cavités de haute finesse.

Ces développements invitent à une vision complémentaire : si la décohérence est bien un mécanisme dominant de destruction du comportement quantique, il faut aussi prendre au sérieux les *mécanismes de construction et de protection* de la cohérence, en particulier lorsqu'ils reposent sur des structures confinées et résonantes.

3.3 Quand la cohérence génère le comportement quantique

Si la décohérence marque la transition quantique \rightarrow classique, on peut demander dans quelles conditions la transition inverse classique \rightarrow quantique peut se produire. En d'autres termes : existe-t-il des situations dans lesquelles le verrouillage de phase et la synchronisation de degrés de liberté décrits naïvement comme « classiques » *génèrent* activement des effets quantiques observables ?

L'exemple paradigmatique est le laser. Un milieu amplificateur placé dans une cavité optique peuple un mode du champ électromagnétique et impose une phase commune à un grand nombre de photons. Le résultat est un état cohérent dont les propriétés ne peuvent être reproduites par une simple superposition de sources classiques indépendantes. Dans les expériences de QED en cavité, notamment celles de Serge Haroche et de ses collaborateurs, la cavité agit comme un *résonateur interne* : elle permet de préparer, contrôler et mesurer des états quantiques du champ et d'un atome unique au niveau du photon unique [14, 15].

Ce rôle de la cavité n'est pas spécifique à l'optique. À différentes échelles, de nombreux systèmes physiques peuvent être interprétés comme des structures de confinement amplifiant certains modes résonants : l'atome, la molécule, la cellule biologique, la cavité macroscopique ou le circuit supraconducteur. Dans tous les cas, l'enjeu n'est plus seulement de résoudre des détails géométriques plus fins, mais d'accéder à l'intérieur de cavités qui soutiennent des modes cohérents.

Plusieurs phénomènes bien connus illustrent le fait que la cohérence elle-même peut conduire un système dans un régime quantique : la supraconductivité [16, 17], les jonctions Josephson [18], les condensats de Bose–Einstein de photons ou de polaritons [19], ou encore les cristaux temporels [20]. Dans tous ces exemples, c’est la *cohérence* — plus que l’énergie seule ou la taille géométrique — qui joue le rôle décisif dans l’apparition des signatures quantiques.

3.4 La cohérence comme frontière opérationnelle

Pris ensemble, ces éléments suggèrent une inversion conceptuelle : au lieu de définir la frontière quantique–classique uniquement par la *perte* de cohérence, il peut être plus fidèle à la pratique expérimentale de la définir par la *présence* d’une cohérence soutenue.

D’un point de vue opérationnel, un système se trouve dans un régime quantique lorsqu’il existe des observables telles que

- on puisse préparer des états présentant des interférences ou des corrélations non classiques sur des durées comparables à celles de la mesure ;
- ces interférences soient assez robustes, malgré le couplage à l’environnement, pour être distinguées de simples statistiques classiques.

Inversement, un système peut être dit classique lorsque, pour toutes les observables accessibles, les corrélations mesurées peuvent être décrites de manière adéquate par un modèle probabiliste classique, parce que toute tentative de mise en évidence d’interférences est contrée par une décohérence trop rapide. Formulée ainsi, l’échelle métrique apparaît comme un facteur indirect : les petits systèmes sont plus faciles à isoler et à confiner, donc plus propices à la cohérence ; mais des systèmes macroscopiques peuvent eux aussi entrer dans des régimes quantiques dès lors que des architectures de type cavité protègent certains modes.

4 Résonance universelle à la cadence c : cadre formel

4.1 Un modèle de réalité à double espace

En s’appuyant sur les deux intuitions directrices selon lesquelles (1) la constante c doit être comprise comme une cadence universelle plutôt que comme une simple borne métrique, et (2) la cohérence et le confinement, plutôt que l’échelle spatiale, définissent la frontière entre quantique et classique, le présent travail propose un cadre ontologique général que nous appelons *Réalisme résonant*.

Ce cadre postule une structure duale de la réalité, composée de :

- un *espace* Ω , variété de phases cohérentes — espace de type hilbertien complexe décrivant des états potentiels et leurs relations de cohérence ;
- la variété d’espace-temps M de la relativité, où les événements acquièrent localisation, ordre causal et structure métrique.

Conceptuellement, l’espace Ω est fibré au-dessus de l’espace-temps, formant avec lui un fibré résonant d’espace-temps : à chaque région de l’espace-temps dans M correspond une structure locale de modes potentiels dans Ω . Cependant, toute configuration au sein de Ω ne correspond pas à un événement réalisé. Seuls les états atteignant un

seuil de résonance — là où les relations de phase internes s’alignent avec la cadence universelle fixée par c — sont projetés dans l’espace-temps sous forme d’événements observables.

Dans cette perspective, l’invariant c agit comme un filtre résonant entre réalité potentielle et réalité actuelle, gouvernant à la fois la conversion entre espace et temps, et la projection entre phase et événement. Au seuil de résonance, la cohérence dans Ω atteint une compatibilité dynamique avec la métrique de l’espace-temps, permettant aux états potentiels de se manifester comme occurrences effectives.

4.2 Structure et statut ontologique de Ω

Nous postulons un domaine fondamental de phase Ω , modélisé comme un espace de Hilbert séparable dont les vecteurs $|\omega\rangle$ représentent des modes de phase potentiels de la réalité. Les modes dans Ω évoluent sous l’action d’un opérateur auto-adjoint H_Ω , engendrant une évolution unitaire

$$U(t) = \exp\left(-\frac{i}{\hbar}H_\Omega t\right). \quad (7)$$

Au sein de Ω , nous introduisons un *opérateur de cadence* \hat{C} , dont la valeur moyenne $\langle\omega|\hat{C}|\omega\rangle$ encode le taux intrinsèque de phase de chaque mode. Le spectre de \hat{C} est centré sur l’invariant c , pris comme cadence universelle de référence. Nous adoptons une position de *réalisme structurel ontique modéré* [21] : Ω n’est ni une substance ni un simple outil de calcul, mais une structure relationnelle fondant les phénomènes physiques.

4.3 La fonctionnelle de résonance : contraintes physiques et forme fonctionnelle

La fonctionnelle de résonance $\mathcal{R}(\omega; c)$ quantifie l’alignement d’un mode dans Ω avec la cadence universelle c . Bien qu’une dérivation complète à partir de premiers principes reste un problème ouvert, sa forme est fortement contrainte par plusieurs exigences physiques indépendantes.

Contrainte 1 : dimensionnalité et invariance d’échelle.

La fonctionnelle doit être sans dimension et dépendre uniquement de l’écart à la résonance parfaite. Si $\langle\omega|\hat{C}|\omega\rangle$ a les dimensions d’une vitesse, alors la seule combinaison sans dimension est

$$\xi = \frac{\langle\omega|\hat{C}|\omega\rangle - c}{\sigma_c}, \quad (9)$$

où σ_c fixe une échelle caractéristique de désaccord. Ainsi \mathcal{R} doit prendre la forme $\mathcal{R} = f(\xi)$.

Contrainte 2 : conditions aux limites.

Les exigences physiques imposent :

- $\mathcal{R} = 1$ à la résonance parfaite ($\xi = 0$) ;
- $\mathcal{R} \rightarrow 0$ lorsque $|\xi| \rightarrow \infty$;
- \mathcal{R} est lisse et possède un maximum unique en $\xi = 0$.

Contrainte 3 : argument informationnel.

En l'absence de structure supplémentaire, le principe de maximum d'entropie suggère que les écarts à la résonance suivent la distribution la moins informative compatible avec une variance finie : la gaussienne.

Contrainte 4 : analogie avec les résonateurs physiques.

Dans les résonateurs classiques et quantiques, la réponse à une excitation près d'une résonance prend génériquement une forme lorentzienne. Toutefois, lorsqu'on intègre plusieurs canaux de décohérence ou qu'on considère l'enveloppe de résonances se chevauchant, la réponse effective tend souvent vers un profil gaussien.

Contrainte 5 : cohérence avec la théorie de la décohérence.

La décohérence standard donne une décroissance des éléments hors diagonale de la matrice de densité réduite sous la forme

$$\rho_{ij}(t) \propto e^{-\Gamma_{ij}t}. \quad (10)$$

Si la décohérence est pilotée par de nombreux modes environnementaux indépendants, la suppression effective de la cohérence en fonction du désaccord acquiert naturellement une enveloppe gaussienne.

Forme proposée.

Compte tenu de ces contraintes, nous adoptons l'ansatz

$$\mathcal{R}(\omega; c) = \exp \left[-\frac{(\langle \omega | \hat{C} | \omega \rangle - c)^2}{\sigma_c^2} \right]. \quad (11)$$

4.4 Projection Π_c , seuil de résonance θ et constantes fondamentales

La projection de Ω vers le domaine observable de l'espace-temps M est définie par une condition de résonance :

$$\Pi_c(|\omega\rangle) = |\psi\rangle \in \mathcal{H}_M \quad \text{iff} \quad \mathcal{R}(\omega; c) \geq \theta, \quad (12)$$

où \mathcal{H}_M désigne l'espace de Hilbert habituel des états associés aux champs dans l'espace-temps, et θ est un *seuil de résonance* sans dimension.

Dans ce cadre, les constantes fondamentales peuvent être interprétées comme des formes codifiées de seuils de résonance : c spécifie la cadence universelle, \hbar l'action minimale par cycle de phase, k_B le seuil de thermalisation des fluctuations de phase, et certaines constantes sans dimension des rapports de conditions de résonance entre secteurs en interaction. Un raffinement naturel relie θ à une entropie effective d'intrication environnementale :

$$\theta = \exp \left(-\frac{S_{\text{env}}}{k_B} \right), \quad (13)$$

où S_{env} quantifie le couplage à des degrés de liberté non contrôlés.

4.5 Covariance et structure bootstrap de c

Une inquiétude naturelle surgit : nous définissons $\mathcal{R}(\omega; c)$ en utilisant c comme cadence de référence, tout en affirmant que l'invariance de c émerge de la structure

résonante de Ω . La logique ici est une *cohérence bootstrap*, analogue à celle de la relativité restreinte : on postule une cadence fondamentale c_0 dans Ω , seules les structures suffisamment résonantes se projettent dans M , et l'espace-temps projeté hérite de c_0 comme invariant métrique.

5 Signatures empiriques et falsifiabilité

Si l'espace Ω et la projection de cadence gouvernée par c sont physiquement réels, alors cette projection résonante devrait laisser des traces dans le domaine de l'espace-temps. Ces traces ne sont pas des observables directs de Ω , mais des invariants structurels : des régularités du monde phénoménal qui reflètent la cadence sous-jacente de projection.

Parmi elles figurent l'universalité apparente des lois physiques, la constance des paramètres fondamentaux (c , \hbar , k_B) et la récurrence de certaines formes à travers les échelles. Ces invariances restent cependant compatibles avec la physique standard. Pour que le cadre ait un véritable contenu empirique, il faut identifier des signatures qui le distinguent réellement des théories existantes.

5.1 Phase, action et structure du bruit quantique

Dans la théorie quantique standard, la relation

$$E = \hbar\nu \quad (14)$$

est traitée comme exacte, avec \hbar strictement invariant. Le présent cadre ne conteste pas ce point. Il introduit plutôt une distinction entre la constante fondamentale \hbar et un paramètre *effectif* \hbar_{eff} , qui encode comment la résonance et la géométrie modifient, au niveau opérationnel, la relation entre phase, action et fréquences observées.

Dans un langage semi-classique, les amplitudes quantiques prennent la forme

$$\mathcal{A} \sim \exp\left[\frac{i}{\hbar}(S_0 + \Delta S_{\text{res}})\right], \quad (15)$$

où S_0 est l'action standard et ΔS_{res} représente des corrections de phase liées à la résonance. On peut toujours réécrire ceci sous la forme

$$\frac{S_0 + \Delta S_{\text{res}}}{\hbar} = \frac{S_0}{\hbar_{\text{eff}}}, \quad \hbar_{\text{eff}} = \hbar \frac{S_0}{S_0 + \Delta S_{\text{res}}}. \quad (16)$$

Ainsi, \hbar_{eff} n'est pas une nouvelle constante fondamentale, mais une manière de coder l'effet de la résonance et de la géométrie sur la phase.

Concrètement, ces effets se manifesteraient non comme une variation mesurable de la valeur SI de \hbar , mais comme de fines modulations dans ce qui est généralement regroupé sous le terme de « bruit quantique » : diffusion de phase, élargissement de raie et fluctuations excédentaires. Plusieurs plateformes expérimentales sont pertinentes : lasers près de la limite de Schawlow–Townes [22, 23], horloges atomiques et interféromètres [24, 25], qubits supraconducteurs [16, 17, 26], condensats de Bose–Einstein et cavités photoniques [27–29].

Dans les systèmes hautement contrôlés, les modèles standards décrivent remarquablement bien les données et la métrologie de h n'a révélé aucune anomalie significative dans E/ν . Si des corrections de type $\hbar_{\text{eff}} - \hbar$ existent, elles doivent donc être extrêmement faibles. Ces expériences imposent des bornes supérieures fortes au modèle résonant.

5.2 Falsifiabilité : stratégie empirique

Le contenu falsifiable du Réalisme résonant peut se résumer ainsi : il ne s'agit pas de montrer que « \hbar change », mais de tester s'il existe une petite structure résiduelle dans E/ν , corrélée à la cohérence, une fois pris en compte tous les mécanismes connus.

Dans des plateformes quantiques bien contrôlées, on peut envisager la stratégie suivante :

1. faire varier la cohérence de manière contrôlée : température, facteur de qualité Q , squeezing, séquences de décorrélation dynamique, désordre contrôlé, etc. ;
2. mesurer spectres, diffusion de phase et fluctuations ;
3. ajuster les données à l'aide des modèles établis de bruit et de décohérence ;
4. analyser les résidus.

Deux possibilités se présentent alors : soit les résidus ne montrent aucune structure et ne présentent aucune corrélation systématique avec la cohérence ; soit une petite structure reproductible demeure et suit la cohérence. Le Réalisme résonant ne promet donc pas un renversement spectaculaire de la physique existante. Il propose plutôt un raffinement : voir les constantes fondamentales comme des seuils stables de résonance, et traiter le bruit quantique non seulement comme une nuisance, mais comme un lieu possible où s'inscrivent de faibles traces de la projection $\Omega \rightarrow M$.

6 Discussion

Le cadre résonant proposé ici est simple au niveau ontologique : un domaine de phase sous-jacent Ω , une cadence invariante c , et un seuil de résonance θ . Pour en évaluer la portée, il faut examiner ce qu'il apporte aux paradoxes quantiques standards, le situer par rapport aux interprétations existantes et clarifier ses limites.

6.1 Pourquoi un autre espace, et pourquoi maintenant ?

Postuler un espace Ω distinct de l'espace-temps peut sembler être un geste ontologique fort. Historiquement, la mécanique quantique et la relativité ont été développées presque simultanément. La tension conceptuelle entre corrélations quantiques non locales et localité relativiste a été reconnue très tôt. Bell a rendu le choix explicite : il faut abandonner soit la localité, soit une forme forte de réalisme [8]. Les expériences d'Aspect, Clauser, Zeilinger et d'autres ont transformé cela en dilemme empirique [9?]. Le présent cadre choisit de conserver une forme de réalisme — *quelque chose* existe avant la mesure — mais accepte que ce quelque chose ne soit pas localisé dans l'espace-temps. Les degrés de liberté quantiques fondamentaux vivent dans Ω , un domaine non spatio-temporel de cohérence, dont l'espace-temps M ne reçoit que les projections résonantes.

Ce que signifie « exister » dans cette ontologie.

Le Réalisme résonant répond à la question d'Einstein sur la Lune par un oui qualifié : les corps macroscopiques existent lorsqu'ils ne sont pas observés, mais non comme des porteurs rigides de propriétés classiques prédéterminées. Ils existent comme

des motifs stables de haute résonance dans Ω , continûment couplés au reste de la structure résonante de l'univers.

6.2 Paradoxes clarifiés par le Réalisme résonant

Problème de la mesure.

Dans la mécanique quantique standard, le problème de la mesure vient de la coexistence d'une évolution unitaire linéaire et d'un postulat supplémentaire d'effondrement. Dans le Réalisme résonant, l'effondrement est réinterprété comme un *franchissement de seuil de résonance*. Un état évolue dans Ω sous H_Ω ; la projection $\Pi_c : \Omega \rightarrow M$ n'est réalisée que si $\mathcal{R}(\omega; c) \geq \theta$. La sélection du résultat n'est donc pas liée à un acte épistémique d'observation, mais à une condition dynamique.

Le chat de Schrödinger.

Une superposition macroscopique échoue à maintenir $\mathcal{R}(\omega; c) \geq \theta$ sur des durées pertinentes, en raison du fort couplage à l'environnement. Les superpositions macroscopiques ne sont pas interdites en principe; elles sont simplement, dans des conditions réalistes, très en dessous du seuil de projection stable.

Corrélations EPR et non-localité.

Le théorème de Bell montre qu'aucune théorie à variables cachées locales ne peut reproduire les corrélations quantiques [8]. Dans le Réalisme résonant, il n'y a pas de variables cachées locales dans l'espace-temps. La structure pertinente est l'état résonant global dans Ω englobant les sous-systèmes. Les systèmes intriqués partagent un mode unique non séparable dans Ω ; les corrélations naissent parce que les événements de mesure correspondent à des projections de ce même mode dans différentes régions de l'espace-temps.

Flèche du temps.

L'image résonante interprète la flèche du temps comme une *diffusion de la cohérence* dans Ω au cours de l'évolution de l'univers. L'irréversibilité correspond à un flux net allant de configurations très résonantes et de faible entropie vers des configurations plus diffuses et de plus grande entropie [4, 10, 11].

Frontière quantique–classique.

La frontière quantique–classique est définie par la capacité des degrés de liberté à maintenir $\mathcal{R}(\omega; c) \geq \theta$ sur l'échelle de temps considérée. De petits systèmes peuvent être effectivement classiques s'ils se décohèrent vite, tandis que de grands systèmes peuvent manifester un comportement clairement quantique si la cohérence est soutenue [19? ?].

6.3 Statut ontologique de Ω

L'espace Ω n'est pas un champ portant de l'énergie dans l'espace-temps, mais un domaine structuré de potentiels : un réservoir de modes résonants et de relations

de phase. Cette idée rejoint le réalisme structurel ontique [30, 31]. L'observation est un cas particulier de résonance, non sa cause. La réalité existe indépendamment des observateurs, mais les « faits » correspondent à des projections stables de modes résonants dans M .

6.4 Relation aux autres cadres interprétatifs et d'unification

Le Réalisme résonant n'a pas vocation à remplacer les théories existantes, mais à fournir une grammaire ontologique commune permettant de les relier. Par rapport à Copenhague, la réduction d'état n'est plus un postulat dépendant de l'observateur. Par rapport aux mondes multiples, le cadre évite la prolifération des branches : il ne projette dans M que les modes suffisamment résonants. Contrairement à la mécanique bohémienne, il n'introduit pas de trajectoires supplémentaires [32, 33]. Par rapport à la mécanique quantique relationnelle, il ajoute un critère physique concret : le franchissement d'un seuil de cohérence [5, 34]. Les approches de collapse objectif sont remplacées par un franchissement continu d'un seuil de cohérence [6, 35]. Les approches de gravité quantique à boucles ou de théorie des cordes peuvent être lues comme des réalisations dynamiques particulières de structures résonantes au sein de Ω [36, 37].

6.5 Programme empirique : le bruit comme sonde de la résonance

Empiriquement, le cadre fait une affirmation modeste mais testable. Il ne prédit pas une variation directe de \hbar ou de c comme constantes métrologiques, mais suggère que ce qu'on regroupe actuellement sous le nom de « bruit quantique » dans les systèmes à haute cohérence pourrait contenir une petite composante structurée corrélée à la qualité de cohérence [38? , 39]. Le programme expérimental consiste donc à caractériser la structure fine du bruit en fonction de la cohérence, plutôt qu'à rechercher un changement grossier des constantes fondamentales.

Perspectives cosmologiques et biologiques

Tout cadre ontologique prétendant décrire la structure fondamentale de la réalité physique doit pouvoir dialoguer avec des phénomènes au-delà de la mécanique quantique de laboratoire.

Horizons et rayonnement de Hawking.

Dans le Réalisme résonant, un horizon peut être interprété comme une région où le filtre de résonance devient extrêmement sélectif : seuls des motifs spectraux très étroits peuvent se projeter de Ω vers M , apparaissant comme rayonnement thermique [40, 41].

Matière noire et énergie noire.

Le cadre offre une lecture ontologique possible : la matière noire correspondrait à des degrés de liberté de Ω qui courbent l'espace-temps tout en restant faiblement résonants avec les secteurs électromagnétiques ; l'énergie noire correspondrait à un fond quasi homogène juste au-dessus du seuil minimal de résonance.

Effets quantiques biologiques.

Plusieurs travaux ont mis en évidence des effets quantiques inattendus dans des systèmes biologiques ou bio-inspirés. Dans le Réalisme résonant, la vie devient un ensemble de motifs de haute résonance dynamiquement entretenus, des systèmes qui ont appris à exploiter l'horloge universelle $\Omega + c$ [42].

6.6 Compatibilité, orientation empirique et nouveauté

Le Réalisme résonant ne modifie ni le formalisme de la mécanique quantique ni celui de la relativité. Il est construit de sorte que la théorie quantique standard soit retrouvée comme description effective des modes de Ω proches de la résonance parfaite, tout en préservant la causalité relativiste et le principe de non-signalisation. Le cadre est volontairement minimal dans ses ingrédients primitifs : un domaine de cohérence Ω , une cadence universelle c , une fonctionnelle de résonance $\mathcal{R}(\omega; c)$ et un seuil θ gouvernant la projection dans l'espace-temps M .

Même s'il s'agit d'une proposition avant tout ontologique, elle n'est pas purement métaphysique : elle mène à une stratégie empirique concrète fondée sur la recherche de structures dépendantes de la cohérence dans le bruit quantique.

6.7 Questions ouvertes et appel à collaboration

Le Réalisme résonant est, et doit être présenté comme, un travail en cours plutôt qu'une théorie achevée. Il laisse ouvertes de nombreuses questions :

- comment spécifier H_Ω et l'opérateur de cadence \hat{C} de manière à retrouver les théories de champ connues ;
- peut-on dériver la fonctionnelle de résonance $\mathcal{R}(\omega; c)$ à partir de quantités plus primitives ;
- existe-t-il des hiérarchies de seuils θ correspondant à différents régimes qualitatifs ;
- des signatures d'une loi universelle de résonance peuvent-elles être extraites d'expériences de précision sur des états quantiques macroscopiques [?] ;
- plus ambitieux encore : peut-on relier les valeurs numériques des constantes fondamentales à des propriétés structurelles de Ω .

Répondre à ces questions dépasse les capacités d'un seul auteur. Le développement futur du Réalisme résonant nécessite une collaboration entre physiciens théoriciens, physiciens expérimentateurs et chercheurs en biophysique ou en biologie quantique.

7 Conclusion

Ce travail a proposé le *Réalisme résonant* comme cadre ontologique simple reliant la cohérence, l'espace-temps et la constante c , comprise comme cadence universelle plutôt que comme simple limite de vitesse. En déplaçant la frontière quantique-classique de l'échelle métrique vers la cohérence et le confinement, il esquisse une manière unifiée de penser la mesure, la non-localité et la flèche du temps sans modifier le formalisme établi.

Si l'intuition centrale se révèle juste, le Réalisme résonant pourrait offrir ce qui a échappé jusqu'ici à la physique des fondements : un cadre dans lequel la non-localité quantique et la causalité relativiste sont compatibles par construction ; où la mesure n'est ni dépendante de l'observateur ni stochastique, mais gouvernée par un seuil ; où la frontière quantique–classique est structurelle plutôt qu'arbitraire ; et où les constantes fondamentales codent des conditions de résonance plutôt que des valeurs contingentes.

L'engagement du cadre avec la cosmologie et la biologie montre qu'il opère à la bonne échelle ontologique : il parle de ce qu'est la réalité à travers toutes ses manifestations — du vide quantique à la structure cosmique, des expériences de précision aux systèmes vivants.

L'omniprésence de c , le rôle central de la cohérence dans les technologies quantiques modernes et la persistance des paradoxes fondamentaux suggèrent tous que la réalité pourrait posséder une structure intérieure que les théories existantes ne décrivent qu'indirectement. Reste ouverte la question de savoir si cette structure est correctement saisie par l'espace Ω et la dynamique de résonance proposés ici. Cet article n'offre pas une réponse finale, mais un point de départ : une ontologie parcimonieuse appelant un développement rigoureux et une mise à l'épreuve empirique.

Statements and Declarations

Funding

L'autrice n'a reçu aucun financement spécifique pour ce travail.

Competing interests

L'autrice déclare n'avoir aucun conflit d'intérêts.

Data availability

Le partage de données ne s'applique pas à cet article, car aucun jeu de données n'a été généré ni analysé.

Use of AI tools

L'autrice a utilisé un outil d'assistance par IA uniquement pour la révision linguistique ; toutes les idées, la structure et le contenu sont les siens.

Références

- [1] Green, M.B., Schwarz, J.H., Witten, E. : Superstring Theory. Volume 1 : Introduction. Cambridge University Press, Cambridge (1987)
- [2] Ashtekar, A. : New variables for classical and quantum gravity. *Physical Review Letters* **57**, 2244–2247 (1986)
- [3] Rovelli, C., Smolin, L. : Spin networks and quantum gravity. *Physical Review D* **52**, 5743–5759 (1995)

- [4] Jacobson, T. : Thermodynamics of spacetime : The einstein equation of state. *Physical Review Letters* **75**, 1260–1263 (1995)
- [5] Rovelli, C. : Relational quantum mechanics. *International Journal of Theoretical Physics* **35**, 1637–1678 (1996)
- [6] Penrose, R. : On gravity’s role in quantum state reduction. *General Relativity and Gravitation* **28**, 581–600 (1996)
- [7] Smolin, L. : *Time Reborn : From the Crisis in Physics to the Future of the Universe*. Houghton Mifflin Harcourt, Boston (2013)
- [8] Bell, J.S. : On the einstein podolsky rosen paradox. *Physics Physique Fizika* **1**(3), 195–200 (1964)
- [9] Aspect, A., Clauser, J.F., Zeilinger, A. : *The Nobel Prize in Physics 2022 : Experiments with Entangled Photons, Violating Bell Inequalities and Pioneering Quantum Information Science*. Scientific background report, The Royal Swedish Academy of Sciences. Available from <https://www.nobelprize.org> (2022)
- [10] Zurek, W.H. : Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Reviews of Modern Physics* **75**, 715–775 (2003)
- [11] Schlosshauer, M. : Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics* **76**, 1267–1305 (2005)
- [12] Engel, G.S., Calhoun, T.R., Read, E.L., Ahn, T.-K., Mancal, T., Cheng, Y.-C., Blankenship, R.E., Fleming, G.R. : Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. *Nature* **446**, 782–786 (2007)
- [13] Panitchayangkoon, G., Hayes, D., Fransted, K.A., Caram, J.R., Harel, E., Wen, J., Blankenship, R.E., Engel, G.S. : Long-lived quantum coherence in photosynthetic complexes at physiological temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **107**, 12766–12770 (2010)
- [14] Haroche, S., Raimond, J.-M. : *Exploring the Quantum : Atoms, Cavities and Photons*. Oxford University Press, Oxford (2006)
- [15] Déléglise, S., Dotsenko, I., Sayrin, C., Bernu, J., Brune, M., Raimond, J.-M., Haroche, S. : Reconstruction of non-classical cavity field states with quantum non-demolition photon counting. *Nature* **455**, 510–514 (2008)
- [16] Devoret, M.H., Martinis, J.M. : Implementing qubits with superconducting integrated circuits. *Quantum Information Processing* **3**, 163–203 (2004)
- [17] Krantz, P., Kjaergaard, M., Yan, F., Orlando, T.P., Gustavsson, S., Oliver, W.D. : A quantum engineer’s guide to superconducting qubits. *Applied Physics Reviews* **6**, 021318 (2019)

- [18] Josephson, B.D. : Possible new effects in superconductive tunnelling. *Physics Letters* **1**, 251–253 (1962)
- [19] Pethick, C.J., Smith, H. : *Bose–Einstein Condensation in Dilute Gases*. Cambridge University Press, Cambridge (2002)
- [20] Sacha, K., Zakrzewski, J. : Time crystals : A review. *Reports on Progress in Physics* **81**, 016401 (2018)
- [21] Esfeld, M., Lam, V. : Moderate structural realism about space-time. *Synthese* **160**, 27–46 (2008)
- [22] Schawlow, A.L., Townes, C.H. : Infrared and optical masers. *Physical Review* **112**, 1940–1949 (1958)
- [23] Wiseman, H.M., Milburn, G.J. : *Quantum Measurement and Control*. Cambridge University Press, Cambridge (2010)
- [24] Santarelli, G., Audoin, C., Makdissi, A., Laurent, P., Dick, G.J., Clairon, A. : Frequency stability degradation of an oscillator slaved to a periodically interrogated atomic resonator. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* **45**(4), 887–894 (1998)
- [25] Lisdat, C., Grosche, G., Quintin, N., Diekmann, C., Al-Masoudi, A., Dörflinger, B., Häfner, S., Grebing, C., Weyrich, T., Riedel, F., *et al.* : A clock network for geodesy and fundamental science. *Nature Communications* **7**, 12443 (2016)
- [26] Burnett, J.J., Faoro, L., Lindström, T., *et al.* : Decoherence benchmarking of superconducting qubits. *npj Quantum Information* **5**, 54 (2019)
- [27] Jo, G.-B., Shin, Y., Will, S., Pasquini, T.A., Saba, M., Ketterle, W., Pritchard, D.E., Vengalattore, M., Prentiss, M. : Phase-sensitive recombination of two bose–einstein condensates on an atom chip. *Physical Review Letters* **98**, 180401 (2007)
- [28] Castin, Y., Dum, R. : Bose–einstein condensates in time dependent traps. *Physical Review Letters* **77**, 5315–5319 (1996)
- [29] Sinatra, A., Castin, Y. : Phase dynamics of bose–einstein condensates : Losses versus revivals. *European Physical Journal D* **4**, 247–260 (1998)
- [30] French, S., Ladyman, J. : Remodelling structural realism : Quantum physics and the metaphysics of structure. *Synthese* **136**, 31–56 (2003)
- [31] Ainsworth, P.M. : What is ontic structural realism? *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **41**(1), 50–57 (2010)
- [32] Bohm, D. : A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. i. *Physical Review* **85**(2), 166–179 (1952)

- [33] Dürr, D., Goldstein, S., Zanghi, N. : Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty. *Journal of Statistical Physics* **67**, 843–907 (1992)
- [34] Rovelli, C. : Relational Quantum Mechanics. *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (2018)
- [35] Ghirardi, G.C., Rimini, A., Weber, T. : Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Physical Review D* **34**, 470–491 (1986)
- [36] Rovelli, C., Vidotto, F. : Covariant Loop Quantum Gravity : An Elementary Introduction to Quantum Gravity and Spinfoam Theory. Cambridge University Press, Cambridge (2014)
- [37] Green, M.B., Schwarz, J.H., Witten, E. : Superstring Theory. Volume 2 : Loop Amplitudes, Anomalies and Phenomenology. Cambridge University Press, Cambridge (1987)
- [38] Henry, C.H. : Theory of the linewidth of semiconductor lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics* **18**, 259–264 (1982)
- [39] Aspelmeyer, M., Kippenberg, T.J., Marquardt, F. : Cavity optomechanics. *Reviews of Modern Physics* **86**, 1391–1452 (2014)
- [40] Hawking, S.W. : Black hole explosions? *Nature* **248**, 30–31 (1974)
- [41] Unruh, W.G. : Notes on black-hole evaporation. *Physical Review D* **14**, 870–892 (1976)
- [42] Schrödinger, E. : What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell. Cambridge University Press, Cambridge (1944)