the general science journal

Le principe de relativité comme manifestation observable d'un absolu sous-jacent

Paradoxe simple, presque ironique : le principe de relativité pourrait n'être que la manifestation d'un absolu subtilement dissimulé dans l'acte même d'observation. Le référentiel absolu, que la physique avait écarté, semble s'être effacé au profit de lois invariantes entre observateurs en mouvement. Pourtant, ce qui disparaît des équations ne disparaît pas nécessairement du réel.

La démarche présentée ici suggère que cette invariance pourrait ne pas être fondamentale, mais émerger du processus de reconstruction des observables. Elle constituerait alors la pièce manquante permettant de redonner au milieu énergétique, identifié ici à l'éther au sens opérationnel, une cohérence physique, sans entrer en contradiction avec le principe de relativité.

Aimé Savouret

aimesavouret@protonmail.com

Langue originale : Français

Créé le 12 mars 2026

Modifié le 14 avril 2026

Table des matières

1 Intégration dans le contexte de la dynamique du milieu énergétique

Le présent document constitue un prolongement direct de la théorie du milieu énergétique exposée précédemment. Il vise à en explorer une conséquence particulière : l'émergence du principe de relativité comme propriété effective des observations, et non comme postulat fondamental.

Dans le cadre proposé, le milieu énergétique, assimilable à un éther au sens physique, définit un référentiel absolu associé à son état de mouvement global. Ce référentiel absolu peut être défini comme celui dans lequel un observateur est localement comobile au flux énergétique du milieu, c'est-à-dire en absence de vitesse relative par rapport à ce flux.

Toutefois, les interactions physiques accessibles expérimentalement reposent sur des échanges locaux au sein de ce milieu, qui ne permettent pas d'accéder directement à cet état global ni de déterminer sans ambiguïté la comobilité au flux.

Il en résulte que les lois usuelles, telles que reconstruites à partir de ces interactions, apparaissent invariantes pour des observateurs en mouvement relatif uniforme. Le principe de relativité s'interprète alors comme une manifestation émergente de la structure du milieu, plutôt que comme une symétrie première imposée aux lois physiques.

L'analyse proposée vise à préciser ce point de vue en montrant qu'un référentiel absolu peut coexister avec une invariance apparente des lois, et que cette situation conduit notamment à la constance effective de la célérité de la lumière dans les cadres expérimentaux habituels.

2 L'incompatibilité apparente entre le principe de relativité et l'existence d'un référentiel absolu

2.1 Dynamique de fond du milieu énergétique

2.1.1 Limite de l'approximation du corps isolé

Jusqu'à présent, les mécanismes fondamentaux de la dynamique du milieu énergétique ont été introduits dans le cadre simplifié d'un corps isolé. Dans cette approximation, la Terre est considérée comme l'unique source de potentiel gravitationnel, et le flux du milieu est entièrement déterminé par cette contribution.

On obtient alors une vitesse caractéristique correspondant à la chute libre depuis l'infini vers la surface terrestre, soit :

$$11.2\,\mathrm{km\,s^{-1}} \tag{1}$$

Cette construction permet d'établir un lien direct entre le potentiel gravitationnel local et la dynamique du flux. Cependant, elle ne correspond pas à la réalité physique.

En pratique, aucun système n'est isolé. La Terre est plongée dans le champ gravitationnel du Soleil, lui-même inscrit dans celui de la galaxie, laquelle possède également sa propre dynamique au sein de l'Univers.

Le milieu énergétique possède donc une dynamique préexistante, indépendante de la seule contribution terrestre.

2.1.2 Superposition des potentiels et dynamique énergétique du flux

À partir de l'échelle des corps célestes, comme celle de la Terre, la dynamique du milieu est alors régie par le potentiel gravitationnel total.

En présence de plusieurs sources, les contributions individuelles se superposent et s'additionnent linéairement :

$$\Phi(\vec{r}) = \sum_i \Phi_i(\vec{r}) \tag{2}$$

La vitesse du flux découle d'une relation énergétique le long des lignes de flux :

$$\frac{v^2(\vec{r})}{2} + \Phi(\vec{r}) = \mathrm{cste} \tag{3}$$

En fixant une condition de référence à grande distance, on obtient :

$$v^2(\vec{r}) = v_\infty^2 - 2\Phi(\vec{r}) \tag{4}$$

soit, en tenant compte de la superposition :

$$\boxed{v^2(\vec{r}) = v_\infty^2 - 2\sum_i \Phi_i(\vec{r})} \tag{5}$$

Ainsi, la composition du champ de vitesse ne résulte pas d'une addition directe des vitesses, mais d'une composition au niveau énergétique. Cette distinction est essentielle pour comprendre la structure réelle du flux.

2.1.3 Hiérarchie des contributions astrophysiques

Dans l'environnement réel, plusieurs structures gravitationnelles contribuent simultanément à la dynamique du milieu énergétique.

Les vitesses caractéristiques usuelles sont généralement définies dans le cadre d'un corps isolé, et doivent être interprétées comme des échelles locales associées à chaque potentiel.

Contribution terrestre :

$$v_{\mathrm{esc}\oplus}(R_\oplus) \simeq 11.2\,\mathrm{km\,s^{-1}} \tag{6}$$

À l'échelle du système solaire :

$$v_{\mathrm{orb}\oplus} \simeq 29.8\,\mathrm{km\,s^{-1}} \tag{7}$$

$$v_{\mathrm{esc}\odot}(1\,\mathrm{UA}) \simeq 42\,\mathrm{km\,s^{-1}} \tag{8}$$

À l'échelle galactique :

$$v_{\mathrm{orb,gal}} \simeq 220\,\mathrm{km\,s^{-1}} \tag{9}$$

$$v_{\mathrm{esc,gal}} \simeq 550 \text{ à } 600\,\mathrm{km\,s^{-1}} \tag{10}$$

On obtient ainsi une hiérarchie d'échelles :

$$600,\ 220,\ 42,\ 30,\ 11\,\mathrm{km\,s^{-1}} \tag{11}$$

Le champ de vitesse réel du milieu est donc une structure hiérarchique. Un flux galactique quasi uniforme constitue un fond global. Le Soleil impose une modulation intermédiaire. La Terre introduit une perturbation locale.

2.2 Incohérence entre le flux de fond et les observations du système GPS

2.2.1 Modulation orbitale attendue associée à un flux de fond

La présence d'un flux global significatif du milieu énergétique soulève, à première vue, une difficulté d'interprétation au regard des observations expérimentales locales.

En effet, si une vitesse absolue de fond intervenait directement dans le ralentissement des horloges, alors le rythme d'une horloge embarquée ne dépendrait pas seulement de sa dynamique orbitale locale autour de la Terre, mais aussi de son orientation instantanée par rapport à ce flux de fond.

Considérons par exemple un flux galactique de l'ordre de :

$$V_{\text{fond}} \sim 220\,\mathrm{km\,s^{-1}} \tag{12}$$

et la vitesse orbitale typique d'un satellite GPS :

$$u_{\text{GPS}} \simeq 3.9\,\mathrm{km\,s^{-1}} \tag{13}$$

Au cours de l'orbite, la direction de la vitesse du satellite change continuellement. Dans une description naïve où la vitesse absolue pertinente serait la somme vectorielle entre la vitesse orbitale et le flux de fond, la norme de la vitesse du satellite par rapport au milieu varierait périodiquement entre deux situations extrêmes :

$$v_+ \simeq V_{\text{fond}} + u_{\text{GPS}} \tag{14}$$

et

$$v_- \simeq V_{\text{fond}} - u_{\text{GPS}} \tag{15}$$

Le rythme de l'horloge embarquée varierait donc lui aussi périodiquement entre ces deux valeurs. En reprenant la forme usuelle du facteur cinématique :

$$d\tau = dt\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \tag{16}$$

La différence relative de cadence entre deux positions diamétralement opposées sur l'orbite s'exprime, en ne retenant que le terme linéaire en le rapport $u_{\text{GPS}}/V_{\text{fond}}$, comme :

$$\Delta\left(\frac{d\tau}{dt}\right) \simeq \frac{v_-^2 - v_+^2}{2c^2} \tag{17}$$

or

$$v_+^2 - v_-^2 = (V_{\text{fond}} + u_{\text{GPS}})^2 - (V_{\text{fond}} - u_{\text{GPS}})^2 = 4V_{\text{fond}}u_{\text{GPS}} \tag{18}$$

d'où

$$\left|\Delta\left(\frac{d\tau}{dt}\right)\right| \simeq \frac{2V_{\text{fond}}u_{\text{GPS}}}{c^2} \tag{19}$$

Numériquement, avec

$$V_{\text{fond}} = 2.2 \times 10^5\,\text{m}\,\text{s}^{-1} \tag{20}$$

et

$$u_{\text{GPS}} = 3.9 \times 10^3\,\text{m}\,\text{s}^{-1} \tag{21}$$

on obtient :

$$\frac{2V_{\text{fond}}u_{\text{GPS}}}{c^2} \simeq 1.9 \times 10^{-8} \tag{22}$$

Cette modulation relative est extrêmement grande à l'échelle des horloges du GPS.

Sur une demi orbite, de durée voisine de :

$$T_{\frac{1}{2}} \simeq 4.3 \times 10^4\,\text{s} \tag{23}$$

cela correspondrait à une variation temporelle de l'ordre de :

$$\Delta\tau_{\frac{1}{2}} \sim T_{\frac{1}{2}} \times 1.9 \times 10^{-8} \sim 8 \times 10^{-4}\,\text{s} \tag{24}$$

soit environ :

$$\Delta\tau_{\frac{1}{2}} \sim 0.8\,\text{ms} \tag{25}$$

L'amplitude crête à crête de la modulation sur l'orbite complète serait donc de l'ordre de :

$$\sim 1.6\,\text{ms} \tag{26}$$

et resterait du même ordre de grandeur même en raffinant les hypothèses géométriques.

Si l'on prend non plus une vitesse de fond galactique, mais simplement la vitesse orbitale de la Terre autour du Soleil, soit

$$V_{\text{fond}} \simeq 29.8\,\text{km}\,\text{s}^{-1} \tag{27}$$

la modulation relative attendue devient :

$$\left|\Delta\left(\frac{d\tau}{dt}\right)\right| \simeq \frac{2V_{\text{fond}}u_{\text{GPS}}}{c^2} \simeq 2.6 \times 10^{-9} \tag{28}$$

Sur une demi orbite de satellite GPS, de durée typique :

$$T_{\frac{1}{2}} \simeq 4.3 \times 10^4\,\text{s} \tag{29}$$

cela correspondrait à une variation temporelle de l'ordre de :

$$\Delta\tau_{\frac{1}{2}} \sim T_{\frac{1}{2}} \times 2.6 \times 10^{-9} \sim 1.1 \times 10^{-4}\,\text{s} \tag{30}$$

soit environ :

$$\Delta\tau_{\frac{1}{2}} \sim 0.11\,\text{ms} \tag{31}$$

L'amplitude crête à crête sur l'orbite complète serait donc de l'ordre de :

$$\sim 0.22\,\text{ms} \tag{32}$$

2.2.2 Précision expérimentale et invariance locale

Les estimations précédentes, établies dans les cas d'un flux de fond galactique puis solaire, conduisent toutes deux à une même conclusion.

Dans les deux situations, la modulation orbitale attendue du rythme des horloges est très importante, atteignant des amplitudes de l'ordre de la milliseconde dans le cas galactique, et de la centaine de microsecondes dans le cas solaire.

Un tel effet serait colossal pour le système GPS. Il serait immédiatement visible dans les comparaisons d'horloges et dans la navigation.

Même en retenant une hypothèse conservative fondée sur une simple vitesse de fond solaire, l'effet attendu resterait donc largement au-dessus des seuils de détection expérimentaux.

Les performances du système GPS permettent d'estimer très précisément l'effet des variations de potentiel gravitationnel et de vitesse sur le rythme des horloges embarquées.

En particulier, les variations d'altitude des satellites au cours de leur orbite, qui sont de l'ordre de quelques kilomètres, induisent des corrections relativistes mesurables à l'echelle de quelques nanosecondes par jour.

Ces effets, liés à des variations très faibles du potentiel gravitationnel terrestre et de la vitesse orbitale, sont effectivement observés et doivent être corrigés avec une grande précision pour garantir la cohérence du système de navigation.

Cela signifie que le système GPS est sensible à des variations relatives de cadence de l'ordre de :

$$\sim 10^{-14} \text{ à } 10^{-13} \tag{33}$$

correspondant à des décalages temporels de l'ordre de la nanoseconde par jour.

Dans ce contexte, une modulation orbitale de l'ordre de :

$$\sim 10^{-4}\,\mathrm{s} \text{ à } 10^{-3}\,\mathrm{s} \tag{34}$$

comme celle prédite en présence d'un flux de fond intervenant directement dans la cinématique locale, serait gigantesque.

Un tel effet dépasserait de plusieurs ordres de grandeur les seuils de détection du système et rendrait son fonctionnement totalement incohérent.

Or aucune modulation de cette amplitude n'est observée expérimentalement.

Il faut donc en conclure qu'une composante uniforme de grande échelle du flux du milieu énergétique ne peut pas intervenir directement dans les mesures locales de cadence des horloges. Autrement dit, les phénomènes locaux doivent être invariants vis à vis d'un flux de fond uniforme partagé par l'ensemble du système Terre-Satellite.

Cette propriété est en accord avec le principe de relativité, selon lequel seules les vitesses relatives entre systèmes physiques interviennent dans les lois observables, et aucune vitesse absolue ne peut être mise en évidence par des expériences locales.

Cependant, dans le cadre du modèle considéré, l'existence d'un milieu énergétique structuré implique celle d'un référentiel privilégié, défini par l'état local de ce milieu.

Ce modèle repose également sur l'hypothèse d'un temps absolu, unique et commun à l'ensemble du milieu. Cela n'implique pas une uniformité du rythme des processus physiques : leur vitesse d'évolution peut être localement modulée par l'état du milieu énergétique, en particulier par le potentiel gravitationnel et la structure du flux. Les horloges peuvent ainsi ralentir ou s'accélérer selon leur environnement.

Ce ralentissement constitue alors une propriété physique locale du milieu, et non une conséquence de l'état de mouvement de l'observateur. Il ne traduit pas une relativité du temps lui-même, mais une modification des processus qui servent à le mesurer.

À l'inverse, la relativité restreinte introduit un temps propre dépendant de l'état de mouvement de l'observateur, ce qui conduit à une dépendance explicite des phénomènes mesurés vis à vis de la vitesse relative.

Il apparaît alors une tension conceptuelle. D'une part, la dynamique du milieu énergétique semble définir une structure absolue de l'espace et du temps, associée à un flux global et à une temporalité universelle dont les manifestations locales peuvent varier. D'autre part, les observations expérimentales imposent une invariance locale qui, dans certaines conditions, semble empêcher toute détection directe du flux de fond et confirme que seules des grandeurs relatives interviennent dans les phénomènes mesurables.

Comment concilier l'existence d'un référentiel absolu et d'un temps universel, dont les manifestations locales peuvent être modulées, avec le fait que, dans certaines situations expérimentales, comme dans le cas du système GPS, les phénomènes observés présentent une invariance effective, où seules des grandeurs relatives semblent intervenir ?

C'est précisément cette question qu'il s'agit maintenant d'examiner.

3 Loi de reconstruction cinématique dans un référentiel absolu

On se place dans un cadre théorique postulant l'existence d'un référentiel absolu, identifié à l'éther. Dans ce référentiel, la vitesse de l'observateur $\vec{v}_o$ est supposée connue et constitue une donnée physique intrinsèque. De même, la vitesse de la source $\vec{v}_s$ est définie relativement à cet éther.

Cependant, les grandeurs cinématiques accessibles à l'observateur ne correspondent pas directement à ces vitesses absolues. Elles résultent d'un processus de reconstruction fondé sur des mesures locales, elles-mêmes médiées par la propagation de signaux dans le milieu énergétique.

Ainsi, l'observateur n'accède jamais directement à $\vec{v}_s$, mais reconstruit une vitesse apparente $\vec{u}$ à partir d'observables tels que des temps de propagation et des décalages fréquentiels. Ce processus de reconstruction dépend explicitement de son propre état cinématique dans le référentiel absolu.

Autrement dit, la vitesse attribuée à la source est une grandeur dérivée, issue d'un traitement des signaux reçus, et non une donnée primitive. Elle incorpore à la fois l'effet du mouvement réel de la source et celui du mouvement de l'observateur, ainsi que les propriétés de propagation du milieu.

Dans ce cadre, les écarts entre $\vec{u}$ et $\vec{v}_s$ ne traduisent pas une modification réelle de la dynamique de la source, mais un biais systématique introduit par le processus de mesure et de reconstruction.

L'objectif de cette section est d'établir explicitement la relation reliant la vitesse réelle de la source dans l'éther, $\vec{v}_s$, la vitesse absolue de l'observateur, $\vec{v}_o$, et la vitesse apparente $\vec{u}$ reconstruite par l'observateur, en identifiant les mécanismes physiques à l'origine de cette transformation.

3.1 Méthodes physiques de positionnement

La détermination de la position et de la vitesse d'un objet repose, en pratique, sur des mesures indirectes fondées sur des interactions physiques locales. Dans tous les cas, ces mesures impliquent soit l'usage d'étalons matériels (règles, horloges), soit l'analyse de signaux propagés dans le milieu énergétique.

Dans les systèmes modernes de positionnement, comme le GPS, la mesure des distances est explicitement fondée sur la propagation de signaux électromagnétiques. Une distance est alors définie à partir d'un temps de propagation, en supposant une vitesse de propagation c. Plus précisément, la procédure fondamentale est de type aller-retour : un signal est émis, réfléchi, puis reçu, et la distance est reconstruite via :

$$R = \frac{c}{2}\Delta t \tag{35}$$

où Δt est le temps aller-retour mesuré.

Ce point est essentiel : la distance n'est pas une grandeur directement mesurée, mais une grandeur reconstruite à partir du temps et de la vitesse de propagation c. Autrement dit, l'étalon de longueur opérationnel est dérivé d'un étalon temporel et de la constante c.

Même lorsque l'on utilise des étalons matériels, comme des règles ou des structures rigides, ces derniers ne constituent pas des références indépendantes de ce mécanisme. Leur définition physique repose en réalité sur des processus électromagnétiques internes, dont les propriétés sont elles-mêmes contraintes par la propagation des interactions à vitesse finie c.

Équivalence opérationnelle entre étalons matériels et mesure radar. Cette équivalence peut être rendue explicite sur une longueur parallèle au mouvement de l'observateur. Soit une séparation absolue L_{abs}. Si l'observateur se déplace à la vitesse v_o, ses étalons matériels sont contractés d'un facteur $1/\gamma_o$. La longueur exprimée en unités propres vaut alors $L_{\text{mes}} = \gamma_o L_{\text{abs}}$.

La même séparation, mesurée par une procédure radar fondée sur un temps aller-retour et exprimée à l'aide des horloges propres de l'observateur, conduit au même résultat. En effet, le temps total absolu vaut :

$$t_{\text{tot}} = \frac{L_{\text{abs}}}{c - v_o} + \frac{L_{\text{abs}}}{c + v_o} = \frac{2c\, L_{\text{abs}}}{c^2 - v_o^2} \tag{36}$$

et le temps local mesuré par l'observateur est $\tau_{\text{tot}} = t_{\text{tot}}/\gamma_o$. La distance radar reconstruite est donc :

$$L_{\text{radar}} = \frac{c}{2}\tau_{\text{tot}} = \frac{c^2}{\gamma_o\,(c^2 - v_o^2)} L_{\text{abs}} = \frac{1}{\gamma_o \left(1 - \dfrac{v_o^2}{c^2}\right)} L_{\text{abs}} = \gamma_o L_{\text{abs}} \tag{37}$$

ce qui coïncide avec la longueur obtenue à l'aide des étalons matériels. Les deux procédures sont donc opérationnellement équivalentes.

Ainsi, les étalons matériels incorporent implicitement les effets liés à la propagation des interactions dans le milieu énergétique. La contraction des longueurs et le ralentissement des horloges, induits par l'état de mouvement dans ce milieu, modifient ces étalons de telle sorte qu'ils restent cohérents avec les distances définies par des mesures de type radar.

Il en résulte un point fondamental : les deux approches, fondées respectivement sur des étalons matériels et sur des mesures de propagation, ne sont pas indépendantes. Elles reposent en réalité sur une même structure physique sous-jacente, dominée par la vitesse de propagation c.

Les effets introduits par la propagation finie des signaux dans les méthodes radar se retrouvent, sous une forme intégrée, dans les propriétés mêmes des étalons matériels. Réciproquement, les déformations des étalons compensent les biais liés à la propagation dans les procédures de mesure.

Par conséquent, les grandeurs reconstruites (distances, durées, vitesses...) sont identiques quelle que soit la méthode employée. Il est donc légitime, dans la suite, de ne pas distinguer explicitement les procédures fondées sur des étalons matériels de celles fondées sur des mesures radar.

Autrement dit, tout résultat établi dans le cadre d'une reconstruction fondée sur la propagation des signaux reste valable dans un cadre où les distances sont mesurées à l'aide d'étalons matériels, ceux-ci incorporant déjà les effets physiques pertinents.

Dans ce contexte, l'observateur n'accède jamais directement à la position ou à la vitesse réelle d'un objet. Il mesure des observables intermédiaires, tels que des temps de propagation, des phases ou des décalages fréquentiels, à partir desquels il reconstruit un état cinématique.

Les grandeurs ainsi obtenues ne sont donc pas des données primitives, mais le résultat d'un processus de reconstruction dépendant à la fois du milieu de propagation et de l'état cinématique de l'observateur.

3.2 Analogie avec la perception humaine

Ce schéma de reconstruction présente une analogie directe avec la perception humaine.

Lorsqu'un individu observe son environnement, il n'accède pas directement aux objets eux-mêmes, mais à des signaux sensoriels, en particulier des signaux lumineux, qui ont été propagés jusqu'à lui.

Le cerveau reconstruit alors une représentation du monde à partir de ces signaux. La distance est estimée à partir de la convergence binoculaire et de la perspective, le mouvement est inféré à partir de variations temporelles, et les vitesses sont évaluées à partir de flux optiques.

Ainsi, les grandeurs perçues ne sont pas des données brutes, mais le résultat d'un traitement fondé sur une hypothèse implicite concernant la propagation des signaux lumineux.

De manière analogue, dans les systèmes de positionnement, les méthodes de télémétrie radio ou laser, ainsi que les systèmes GNSS comme le GPS, reconstruisent la position et la vitesse à partir des signaux reçus. Le temps de propagation est utilisé pour estimer les distances, tandis que les décalages Doppler permettent d'accéder à des vitesses apparentes.

Dans les deux cas, il s'agit d'un processus de reconstruction fondé sur une hypothèse de propagation. Chez l'humain, cette hypothèse est intégrée de manière biologique et inconsciente. Dans les systèmes de mesure, elle est inscrite explicitement dans les modèles utilisés.

Un point essentiel est que cette reconstruction dépend de l'état de l'observateur. En perception visuelle, le mouvement de l'observateur modifie le flux optique et influence l'estimation des trajectoires. De même, dans les systèmes de positionnement, le mouvement de l'observateur intervient directement dans l'interprétation des signaux.

Ainsi, dans le cadre d'un référentiel absolu, la vitesse $\vec{v}_o$ de l'observateur constitue un paramètre structurant du processus de reconstruction. Elle conditionne la manière dont les signaux sont interprétés et, par conséquent, la vitesse apparente $\vec{u}$ attribuée à la source.

Cette analogie met en évidence un point fondamental : les grandeurs cinématiques accessibles ne sont pas des propriétés intrinsèques directement observées, mais des constructions issues d'un processus de reconstruction.

C'est précisément cette dépendance au milieu de propagation et à l'état de l'observateur que la loi de reconstruction cinématique vise à formaliser.

3.3 La loi de reconstruction cinématique

On cherche à établir la vitesse apparente $\vec{u}$ attribuée par un observateur à une source de vitesse réelle $\vec{v}_s$ dans le référentiel absolu de l'éther, lorsque l'observateur possède lui-même une vitesse absolue connue $\vec{v}_o$.

L'idée directrice est la suivante. L'observateur n'accède pas directement à la trajectoire réelle de la source dans l'éther. Il reconstruit cette trajectoire à partir de signaux reçus, au moyen de ses propres horloges et de ses propres étalons spatiaux. La vitesse apparente résulte donc d'un rapport entre une distance reconstruite et un temps reconstruit.

3.3.1 Décomposition de la vitesse réelle de la source

On introduit le vecteur unitaire porté par la vitesse absolue de l'observateur :

$$\hat{e}_o = \frac{\vec{v}_o}{v_o} \tag{38}$$

La vitesse réelle de la source se décompose alors en une composante parallèle à $\vec{v}_o$ et une composante perpendiculaire :

$$\vec{v}_s = \vec{v}_{s\parallel} + \vec{v}_{s\perp} \tag{39}$$

avec

$$\vec{v}_{s\parallel} = (\vec{v}_s \cdot \hat{e}_o)\,\hat{e}_o \qquad \text{et} \qquad \vec{v}_{s\perp} = \vec{v}_s - \vec{v}_{s\parallel} \tag{40}$$

Sur un intervalle infinitésimal de temps absolu dt, le déplacement réel de la source est :

$$d\vec{r}_s = \vec{v}_s\,dt \tag{41}$$

et donc

$$d\vec{r}_s = d\vec{r}_{s\parallel} + d\vec{r}_{s\perp} \tag{42}$$

avec

$$d\vec{r}_{s\parallel} = \vec{v}_{s\parallel}\,dt \qquad \text{et} \qquad d\vec{r}_{s\perp} = \vec{v}_{s\perp}\,dt \tag{43}$$

3.3.2 Glissement relatif longitudinal

Pendant le même intervalle dt, l'observateur se déplace de :

$$d\vec{r}_o = \vec{v}_o\,dt \tag{44}$$

La variation de la séparation réelle projetée selon la direction $\hat{e}_o$ entre la source et l'observateur s'écrit alors :

$$\boxed{d\vec{r}_{\parallel}^{\,\mathrm{rel}} = d\vec{r}_{s\parallel} - d\vec{r}_o = (\vec{v}_{s\parallel} - \vec{v}_o)\, dt} \tag{45}$$

Cette quantité décrit le glissement longitudinal dans le référentiel absolu. Elle intervient comme variable cinématique intermédiaire dans la reconstruction, sans être directement observable.

3.3.3 Biais de reconstruction du temps

L'observateur n'accède pas directement au temps absolu des événements associés à la source. La datation repose sur des processus physiques internes aux systèmes considérés, qui servent d'horloges effectives.

Dans le cadre du modèle du milieu énergétique, la propagation des interactions à vitesse finie c impose une réorganisation dynamique du champ électromagnétique des systèmes en mouvement. Cette redistribution altère les conditions locales d'équilibre et de propagation des interactions électromagnétiques qui assurent, à l'échelle microscopique, la cohésion et le fonctionnement des systèmes matériels.

Par conséquent, les processus physiques internes, qui servent de base à la mesure du temps, voient leur rythme ajusté en fonction de cette structure du champ. Le ralentissement des horloges apparaît ainsi comme une conséquence dynamique de l'état du milieu énergétique, et non comme une propriété intrinsèque du temps lui-même.

Comme établi, il en résulte que les horloges de l'observateur, en mouvement à la vitesse $\vec{v}_o$, ne mesurent pas le temps absolu dt, mais un temps local :

$$\boxed{d\tau_o = \frac{dt}{\gamma_o} \qquad \text{avec} \qquad \gamma_o = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_o^2}{c^2}}}} \tag{46}$$

Autrement dit, pour un même intervalle de temps absolu dt défini dans le référentiel du milieu, l'horloge de l'observateur accumule un intervalle de temps local $d\tau_o$ plus court. Son rythme est donc ralenti relativement à celui d'une horloge comobile avec le milieu.

À cet effet intrinsèque s'ajoute un second mécanisme, lié à la reconstruction des événements distants. L'observateur n'accède à ces événements qu'à travers des signaux propagés à vitesse finie dans le milieu. Cette reconstruction introduit un biais systématique d'origine physique, distinct du ralentissement des horloges.

Cadre et notations. On se place dans le référentiel absolu du milieu, dans lequel les signaux se propagent isotropiquement à la vitesse c. Une source S se déplace à la vitesse $\vec{v}_s$ et un observateur O à la vitesse $\vec{v}_o$.

La source émet deux événements successifs :

$$E_1 = (t_1,\, \vec{r}_1) \qquad \text{et} \qquad E_2 = (t_1 + dt,\, \vec{r}_1 + d\vec{r}_s) \tag{47}$$

avec

$$d\vec{r}_s = \vec{v}_s\, dt \tag{48}$$

Les positions $\vec{r}_s$ et $\vec{r}_o$ désignent ici les coordonnées dans le référentiel absolu. La distance utilisée dans la procédure de datation sera quant à elle une distance radar reconstruite, définie ultérieurement.

Asymétrie de propagation induite par le mouvement. L'observateur O date l'événement E_1 par une procédure d'aller-retour : il émet un signal vers la source, reçu en E_1, qui est immédiatement réémis vers lui.

La vitesse de fermeture désigne la vitesse relative entre le signal et l'observateur projetée sur la direction de propagation $\hat{n}$. Elle s'écrit $c - \vec{v}_o \cdot \hat{n}$ pour l'aller et $c + \vec{v}_o \cdot \hat{n}$ pour le retour.

Afin d'éviter toute ambiguïté, il convient de distinguer :

— la distance absolue simultanée R_{abs} entre la source et l'observateur dans le référentiel absolu

— la distance radar reconstruite R, définie opérationnellement à partir du temps aller-retour mesuré par l'observateur

Dans le référentiel absolu, si R_{abs} désigne la séparation instantanée projetée selon $\hat{n}$, les temps de propagation exacts sont :

$$t_{\text{aller}} = \frac{R_{\text{abs}}}{c - \hat{n} \cdot \vec{v}_o} \tag{49}$$

$$t_{\text{retour}} = \frac{R_{\text{abs}}}{c + \hat{n} \cdot \vec{v}_o} \tag{50}$$

L'asymétrie exacte entre les deux trajets vaut alors :

$$\Delta t = t_{\text{aller}} - t_{\text{retour}} = R_{\text{abs}} \frac{2\, \hat{n} \cdot \vec{v}_o}{c^2 - (\hat{n} \cdot \vec{v}_o)^2} \tag{51}$$

On définit maintenant la distance radar reconstruite par :

$$\boxed{R = \frac{c}{2} \left(t_{\text{aller}} + t_{\text{retour}} \right)} \tag{52}$$

En substituant les expressions exactes de t_{aller} et t_{retour}, on obtient :

$$R = \frac{c}{2} \left(\frac{R_{\text{abs}}}{c - \hat{n} \cdot \vec{v}_o} + \frac{R_{\text{abs}}}{c + \hat{n} \cdot \vec{v}_o} \right) = R_{\text{abs}} \frac{c^2}{c^2 - (\hat{n} \cdot \vec{v}_o)^2} \tag{53}$$

L'asymétrie entre les deux trajets peut alors se réécrire exactement sous la forme :

$$\boxed{\Delta t = \frac{2R\, (\hat{n} \cdot \vec{v}_o)}{c^2}} \tag{54}$$

avec R désigne la distance radar reconstruite par l'observateur, et non la distance absolue simultanée dans le référentiel du milieu.

Si l'observateur applique la convention d'aller-retour symétrique, il date l'événement au milieu de l'intervalle mesuré par son horloge, en supposant implicitement $t_{\text{aller}} = t_{\text{retour}}$.

Or $t_{\text{aller}} > t_{\text{retour}}$ dès que $\hat{n} \cdot \vec{v}_o > 0$. Le signal met donc plus de temps à atteindre la source qu'à revenir vers l'observateur, ce qui introduit une asymétrie dans les temps de propagation et conduit à une sous-estimation du temps réel de l'événement.

Les temps de propagation vérifient :

$$t_{\text{aller}} = \frac{t_{\text{tot}}}{2} + \frac{\Delta t}{2} \qquad t_{\text{retour}} = \frac{t_{\text{tot}}}{2} - \frac{\Delta t}{2} \tag{55}$$

L'événement étant daté au milieu de l'intervalle aller-retour, l'erreur correspond à l'écart entre t_{aller} et $\frac{t_{\text{tot}}}{2}$. L'erreur de synchronisation vaut alors :

$$\boxed{\delta t_{\text{sync}} = \frac{\Delta t}{2} = \frac{R\,(\hat{n} \cdot \vec{v}_o)}{c^2}} \tag{56}$$

Cette erreur résulte directement du mouvement de l'observateur dans le milieu énergétique, qui constitue le support de propagation des signaux. Elle ne peut être éliminée par aucune procédure locale reposant uniquement sur ces signaux.

Le temps absolu de l'événement est donc supérieur au temps attribué par l'observateur. Le biais, de signe positif, doit être retranché du temps absolu afin de définir le temps reconstruit, lequel incorpore l'erreur de datation induite par la propagation finie du signal et le mouvement de l'observateur.

Ainsi, en tenant compte du facteur γ_o, qui corrige le ralentissement des horloges de l'observateur tel que défini précédemment (46), le temps reconstruit dans le réferentiel de l'observateur s'obtient à partir de ses mesures locales selon la relation :

$$\boxed{t_{\text{rec}} = \gamma_o\,(t - \delta t_{\text{sync}})} \tag{57}$$

L'horloge de l'observateur étant ralentie d'un facteur $1/\gamma_o$, il en résulte que les processus externes apparaissent accélérés lorsqu'ils sont exprimés dans les unités temporelles propres de l'observateur. Cette mise à l'échelle introduit un facteur γ_o dans l'expression du temps reconstruit.

Le facteur γ_o ne traduit donc pas une accélération physique des phénomènes, mais une conversion entre le temps absolu et le temps reconstruit à partir d'une horloge ralentie.

Biais de synchronisation le long du déplacement de la source. Entre les événements E_1 et E_2, la source se déplace de $d\vec{r}_s$. La distance radar reconstruite R et la direction $\hat{n}$ varient donc au cours du mouvement, ce qui induit une variation du biais de synchronisation.

À partir de (57), on déduit l'expression du temps reconstruit sur un intervalle infinitésimal :

$$\boxed{dt_{\text{rec}} = \gamma_o \left(dt - \delta t_{\text{biais}}\right)} \tag{58}$$

avec

$$\delta t_{\text{biais}} = d(\delta t_{\text{sync}}) \tag{59}$$

Le biais de synchronisation s'écrit, en fonction de la position reconstruite de l'événement distant :

$$\delta t_{\text{sync}} = \frac{\vec{v}_o \cdot \vec{R}}{c^2} \tag{60}$$

où $\vec{R} = R\hat{n}$ est le vecteur de position radar reconstruit.

La variation de ce biais s'obtient par différentiation :

$$d(\delta t_{\text{sync}}) = \frac{\vec{v}_o \cdot d\vec{R}}{c^2} \tag{61}$$

Dans le cadre infinitésimal considéré, la variation de la position reconstruite coïncide avec la variation de la position de l'événement source projetée selon la ligne de visée. Pour un observateur fixé, on identifie donc :

$$d\vec{R} = d\vec{r}_s \tag{62}$$

On obtient ainsi :

$$d(\delta t_{\text{sync}}) = \frac{\vec{v}_o \cdot d\vec{r}_s}{c^2} \tag{63}$$

On identifie finalement le biais différentiel de reconstruction du temps comme :

$$\boxed{\delta t_{\text{biais}} = d(\delta t_{\text{sync}}) = \frac{\vec{v}_o \cdot d\vec{r}_s}{c^2}} \tag{64}$$

Cette quantité représente la variation élémentaire du biais de datation induite par le déplacement de la source. Elle ne dépend que du produit scalaire entre la vitesse de l'observateur et le déplacement de la source, ce qui garantit la cohérence géométrique de la procédure de datation.

Expression du temps reconstruit. En partant de l'expression (58) du temps reconstruit sur un intervalle infinitésimal, et en y substituant (64), on a :

$$dt_{\text{rec}} = \gamma_o \left(dt - \frac{\vec{v}_o \cdot d\vec{r}_s}{c^2}\right) \tag{65}$$

En utilisant $d\vec{r}_s = \vec{v}_s \, dt$, on obtient finalement :

$$\boxed{dt_{\text{rec}} = \gamma_o \, dt \left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right)} \tag{66}$$

Le temps attribué aux événements, noté dt_{rec}, correspond à une reconstruction du temps des événements distants à partir des mesures locales de l'observateur. Il résulte ainsi de la combinaison de deux effets distincts :

— le ralentissement intrinsèque des processus matériels, qui conduit à une modification du rythme des horloges de l'observateur
— le biais de reconstruction induit par l'asymétrie de propagation des signaux pour un observateur en mouvement dans ce même milieu

3.3.4 Biais de reconstruction de l'espace

La reconstruction spatiale n'est pas la même selon que l'on considère la direction parallèle ou perpendiculaire à $\vec{v}_o$.

Composante parallèle. La reconstruction de la composante longitudinale s'appuie sur le glissement relatif réel entre la source et l'observateur, défini dans le référentiel absolu du milieu énergétique. Comme établi précédemment à l'équation (45), ce glissement s'écrit :

$$d\vec{r}_{\parallel}^{\text{rel}} = (\vec{v}_{s\parallel} - \vec{v}_o) \, dt \tag{67}$$

Cette quantité décrit l'évolution effective de la séparation longitudinale dans le référentiel du milieu. Elle constitue la grandeur physique de base sur laquelle repose la reconstruction.

Cependant, l'observateur n'accède pas directement à cette distance réelle. La mesure des longueurs est effectuée à l'aide d'étalons matériels, dont les propriétés dépendent de leur état de mouvement absolu dans le milieu énergétique.

La propagation finie des interactions électromagnétiques impose une réorganisation anisotrope des champs de cohésion de la matière. Cette réorganisation modifie les distances d'équilibre internes et conduit à une contraction des longueurs dans la direction du mouvement absolu.

Ainsi, les étalons de l'observateur sont contractés longitudinalement d'un facteur $1/\gamma_o$ dans le référentiel du milieu. Par conséquent, une même distance réelle parallèle au mouvement correspond à un plus grand nombre d'unités de longueur propres de l'observateur.

Il en résulte que le glissement longitudinal réel est reconstruit avec un facteur γ_o lorsqu'il est exprimé dans les étalons propres de l'observateur :

$$\boxed{d\vec{r}_{\parallel}^{\text{rec}} = \gamma_o \, d\vec{r}_{\parallel}^{\text{rel}} = \gamma_o(\vec{v}_{s\parallel} - \vec{v}_o) \, dt} \tag{68}$$

Le facteur γ_o apparaît ainsi comme une conséquence directe de la contraction des longueurs de l'observateur dans la direction de son mouvement absolu, et non comme un artefact géométrique introduit a posteriori.

Composante perpendiculaire. Par construction, la composante perpendiculaire est définie comme étant orthogonale à $\vec{v}_o$. Or, le déplacement de l'observateur s'écrit :

$$d\vec{r}_o = \vec{v}_o\, dt \tag{69}$$

et est donc strictement colinéaire à $\vec{v}_o$. Il ne possède par conséquent aucune composante perpendiculaire à cette direction :

$$d\vec{r}_{o\perp} = \vec{0} \tag{70}$$

Il en résulte que, contrairement au cas longitudinal, il n'existe pas de glissement relatif transverse entre la source et l'observateur lié au mouvement de ce dernier. La composante perpendiculaire du déplacement relatif coïncide donc directement avec celle de la source :

$$d\vec{r}_\perp^{\,\mathrm{rel}} = d\vec{r}_{s\perp} \tag{71}$$

Par ailleurs, dans le cadre du modèle, la contraction des longueurs n'affecte que la direction parallèle au mouvement absolu. Les dimensions perpendiculaires restent inchangées, de sorte que les étalons de l'observateur ne subissent aucune modification dans cette direction.

Il n'y a donc ni correction cinématique, ni correction métrique sur la composante transverse. On obtient ainsi directement :

$$\boxed{d\vec{r}_\perp^{\,\mathrm{rec}} = d\vec{r}_{s\perp} = \vec{v}_{s\perp}\, dt} \tag{72}$$

3.3.5 Composantes apparentes de la vitesse

Par définition, la vitesse apparente reconstruite est le rapport entre le déplacement reconstruit et le temps reconstruit.

Pour la composante parallèle, en utilisant (68) et (66), on obtient :

$$\vec{u}_\parallel = \frac{d\vec{r}_\parallel^{\,\mathrm{rec}}}{dt_{\mathrm{rec}}} = \frac{\gamma_o(\vec{v}_{s\parallel} - \vec{v}_o)\, dt}{\gamma_o\, dt\left(1 - \dfrac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right)} \tag{73}$$

d'où

$$\boxed{\vec{u}_\parallel = \frac{\vec{v}_{s\parallel} - \vec{v}_o}{1 - \dfrac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}}} \tag{74}$$

Pour la composante perpendiculaire, en utilisant (72) et (66), on obtient :

$$\vec{u}_\perp = \frac{d\vec{r}_\perp^{\,\mathrm{rec}}}{dt_{\mathrm{rec}}} = \frac{\vec{v}_{s\perp}\, dt}{\gamma_o\, dt\left(1 - \dfrac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right)} \tag{75}$$

soit

$$\boxed{\vec{u}_\perp = \frac{\dfrac{1}{\gamma_o}\vec{v}_{s\perp}}{1 - \dfrac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}}} \tag{76}$$

3.3.6 Expression vectorielle finale

La vitesse apparente totale est la somme des composantes parallèle et perpendiculaire :

$$\vec{u} = \vec{u}_\parallel + \vec{u}_\perp \tag{77}$$

En combinant (74) et (76), on obtient finalement :

$$\boxed{\vec{u} = \frac{\vec{v}_{s\parallel} - \vec{v}_o + \dfrac{1}{\gamma_o}\vec{v}_{s\perp}}{1 - \dfrac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}}} \tag{78}$$

3.3.7 Vérifications immédiates

Si l'observateur est au repos dans l'éther, $\vec{v}_o = \vec{0}$, alors $\gamma_o = 1$ et la formule devient :

$$\vec{u} = \vec{v}_s \tag{79}$$

ce qui est conforme à l'interprétation physique attendue.

Si la source est comobile avec l'observateur, $\vec{v}_s = \vec{v}_o$, alors :

$$\vec{v}_{s\parallel} = \vec{v}_o \qquad \text{et} \qquad \vec{v}_{s\perp} = \vec{0} \tag{80}$$

d'où

$$\vec{u} = \vec{0} \tag{81}$$

L'observateur reconstruit donc bien une source immobile lorsqu'elle partage son état cinématique absolu.

Enfin, si la source ne possède qu'une composante perpendiculaire à $\vec{v}_o$, on a $\vec{v}_{s\parallel} = \vec{0}$ et :

$$\vec{u} = \frac{-\vec{v}_o + \dfrac{1}{\gamma_o}\vec{v}_{s\perp}}{1} \tag{82}$$

ce qui montre explicitement que la composante transverse est reconstruite avec un biais spécifique, gouverné par le facteur $1/\gamma_o$, résultant du couplage entre la reconstruction temporelle et la décomposition des vitesses.

3.3.8 Synthèse sur la reconstruction cinématique

Cette relation n'est pas introduite comme une loi cinématique primitive. Elle résulte de la combinaison de plusieurs mécanismes physiques distincts, tous liés au processus de reconstruction à partir de signaux propagés dans le milieu :

1. le glissement longitudinal réel entre la source et l'observateur dans le référentiel absolu, qui fixe la structure de la composante parallèle
2. la contraction des longueurs dans la direction du mouvement absolu, qui modifie les étalons spatiaux de l'observateur et introduit un facteur de correction dans la reconstruction de la composante parallèle
3. le ralentissement des horloges de l'observateur, résultant de la dynamique interne des systèmes matériels en mouvement dans le milieu énergétique
4. le biais temporel de reconstruction, induit par la propagation finie du signal et par le mouvement de l'observateur pendant cette propagation, ce qui introduit un couplage entre le déplacement de la source et l'état cinématique de l'observateur
5. la dissymétrie géométrique entre les directions parallèle et perpendiculaire à $\vec{v}_o$, qui reflète le fait que la reconstruction spatiale ne s'effectue pas de manière isotrope dans le référentiel de l'observateur

La vitesse apparente $\vec{u}$ n'est donc pas la vitesse réelle de la source dans l'éther, mais une grandeur reconstruite. Elle ne constitue pas une donnée cinématique primitive, mais une vitesse relative effective, émergente du processus de mesure, qui dépend simultanément de $\vec{v}_s$, de $\vec{v}_o$, et des propriétés de propagation du milieu.

Autrement dit, $\vec{u}$ ne décrit pas directement le mouvement de la source dans l'éther, mais le mouvement tel qu'il est physiquement reconstruit par un observateur immergé dans ce milieu.

Elle incorpore à la fois :
- des effets métriques, liés à la modification des étalons spatiaux par contraction des longueurs
- des effets dynamiques, liés au ralentissement des processus physiques qui définissent les horloges
- des effets de propagation, liés à la vitesse finie du signal et à l'asymétrie des temps d'aller-retour

La structure finale de la loi de reconstruction cinématique apparaît ainsi comme la conséquence directe de ces mécanismes physiques, et non comme une propriété géométrique fondamentale de l'espace-temps.

4 L'invariance de lois observables comme propriété émergente d'un référentiel absolu

4.1 La dilatation temporelle comme reconstruction différentielle des cadences

Dans le cadre du milieu énergétique, la dilatation temporelle, telle qu'elle est désignée dans l'interprétation géométrique de la relativité, correspond ici à un ralentissement physique des processus internes. Elle ne résulte pas d'un artefact de mesure, mais d'une modification réelle de la dynamique interne des systèmes matériels induite par leur mouvement dans le milieu.

Plus précisément, une horloge ne mesure pas un temps absolu directement accessible, mais le rythme d'un processus physique interne. La comparaison entre deux horloges revient ainsi à comparer deux dynamiques matérielles, chacune étant influencée par son état cinématique au sein du milieu énergétique.

L'observateur n'accède jamais directement à la cadence d'une horloge distante. Cette cadence est reconstruite à partir des signaux reçus, en tenant compte à la fois du temps de propagation et de l'état cinématique de l'observateur. Il en résulte que la dilatation temporelle observée n'est pas une grandeur absolue, mais une grandeur reconstruite, dépendant du processus de mesure lui-même.

Dans ce contexte, la différence de cadence entre une source et un observateur se manifeste naturellement sous la forme d'un décalage de fréquence. L'effet Doppler apparaît alors comme l'expression directe de cette dissymétrie de cadence, combinant à la fois les effets cinématiques liés au mouvement relatif et les biais introduits par la propagation du signal.

La fréquence étant définie comme l'inverse d'un intervalle de temps caractéristique, le rapport des fréquences peut s'interpréter directement comme un rapport de cadences temporelles.

En notant $d\tau_s$ l'intervalle de temps local séparant deux émissions successives dans le référentiel de la source, et $d\tau_o$ l'intervalle de temps local de l'observateur entre la réception de ces mêmes fronts d'onde, on a :

$$f_s = \frac{1}{d\tau_s} \qquad f_o = \frac{1}{d\tau_o} \tag{83}$$

On en déduit immédiatement :

$$\frac{f_o}{f_s} = \frac{d\tau_s}{d\tau_o} \tag{84}$$

Ainsi, le rapport des fréquences observées mesure directement le rapport des intervalles de temps associés à un même processus physique, vu respectivement dans le référentiel de la source et dans celui de l'observateur.

4.2 L'effet Doppler dans le cadre du milieu énergétique

4.2.1 Identification du temps local de l'observateur

Dans le cadre du modèle, l'observateur ne mesure pas directement le temps absolu, mais reconstruit les événements à partir des signaux reçus. Le temps reconstruit dt_{rec}, défini en (66), est précisément le temps exprimé dans les unités propres de l'observateur, après correction du ralentissement de ses horloges et du biais de synchronisation induit par son mouvement dans le milieu.

Il constitue donc la mesure effective de l'observateur, et s'identifie directement à son temps local :

$$d\tau_o = dt_{\text{rec},o} \tag{85}$$

Les fréquences émise et reçue s'écrivent donc :

$$f_s = \frac{1}{d\tau_s} = \frac{\gamma_s}{dt_s} \qquad \text{et} \qquad f_o = \frac{1}{d\tau_o} = \frac{1}{dt_{\text{rec},o}} \tag{86}$$

4.2.2 Intervalle reconstruit entre deux émissions

Soit $\hat{n}$ le vecteur unitaire porté par la direction de propagation de l'onde, de la source vers l'observateur. L'intervalle entre deux émissions successives dans le temps absolu est dt_s. L'observateur reconstruit cet intervalle via (66) :

$$dt_{\text{rec},s} = \gamma_o \, dt_s \left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right) \tag{87}$$

Ce temps reconstruit incorpore à la fois le ralentissement des horloges de l'observateur et le biais de synchronisation induit par le mouvement de la source dans le milieu.

4.2.3 Intervalle reconstruit entre deux réceptions

Entre les deux émissions successives, la source s'est déplacée. Du point de vue de l'observateur, ce déplacement est décrit par la vitesse reconstruite $\vec{u}$. Sur l'intervalle $dt_{\text{rec},s}$, la source se déplace donc de $\vec{u}\, dt_{\text{rec},s}$ dans le référentiel reconstruit.

La variation de distance selon la direction de propagation $\hat{n}$ est :

$$dR^{\text{rec}} = -\vec{u} \cdot \hat{n} \; dt_{\text{rec},s} \tag{88}$$

Le signe négatif traduit le fait qu'un rapprochement de la source ($\vec{u} \cdot \hat{n} > 0$) raccourcit la distance et réduit le temps de propagation entre les deux réceptions successives.

Le temps supplémentaire de propagation associé à cette variation de distance est dR^{rec}/c. L'intervalle reconstruit entre les deux réceptions est donc :

$$dt_{\text{rec},o} = dt_{\text{rec},s} + \frac{dR^{\text{rec}}}{c} = dt_{\text{rec},s} \left(1 - \frac{\vec{u} \cdot \hat{n}}{c}\right) \tag{89}$$

En substituant l'expression de $dt_{\text{rec},s}$:

$$dt_{\text{rec},o} = \gamma_o \, dt_s \left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right) \left(1 - \frac{\vec{u} \cdot \hat{n}}{c}\right) \tag{90}$$

4.2.4 Expression du rapport des fréquences

Le rapport des fréquences s'écrit :

$$\frac{f_o}{f_s} = \frac{d\tau_s}{d\tau_o} = \frac{d\tau_s}{dt_{\text{rec},o}} = \frac{dt_s/\gamma_s}{\gamma_o \, dt_s \left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right) \left(1 - \frac{\vec{u} \cdot \hat{n}}{c}\right)} \tag{91}$$

soit :

$$\frac{f_o}{f_s} = \frac{1}{\gamma_s \, \gamma_o \left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right) \left(1 - \frac{\vec{u} \cdot \hat{n}}{c}\right)} \tag{92}$$

Il reste à simplifier le facteur $\gamma_s \, \gamma_o \left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right)$. Ce facteur peut être exprimé en fonction de u en partant de la norme de la vitesse reconstruite. D'après la loi de reconstruction cinématique (74) et (76), on a :

$$u^2 = \frac{\left\|\vec{v}_{s\parallel} - \vec{v}_o\right\|^2 + \frac{1}{\gamma_o^2} \left\|\vec{v}_{s\perp}\right\|^2}{\left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right)^2} \tag{93}$$

En développant le numérateur avec $\left\|\vec{v}_{s\parallel} - \vec{v}_o\right\|^2 = v_{s\parallel}^2 + v_o^2 - 2\,\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o$, $\frac{1}{\gamma_o^2} = 1 - \frac{v_o^2}{c^2}$, et en regroupant $v_{s\parallel}^2 + v_{s\perp}^2 = v_s^2$:

$$u^2 = \frac{v_s^2 + v_o^2 - 2\,\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o - \frac{v_o^2\, v_{s\perp}^2}{c^2}}{\left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right)^2} \tag{94}$$

On en déduit :

$$1 - \frac{u^2}{c^2} = \frac{\left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right)^2 - \frac{1}{c^2}\left(v_s^2 + v_o^2 - 2\,\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o - \frac{v_o^2\, v_{s\perp}^2}{c^2}\right)}{\left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right)^2} \tag{95}$$

En développant le numérateur et en utilisant $(\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o)^2 = v_o^2\, v_{s\parallel}^2$, ce qui donne $(\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o)^2 + v_o^2\, v_{s\perp}^2 = v_o^2\, v_s^2$, on obtient :

$$1 - \frac{u^2}{c^2} = \frac{\left(1 - \frac{v_s^2}{c^2}\right)\left(1 - \frac{v_o^2}{c^2}\right)}{\left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right)^2} = \frac{1}{\gamma_s^2\,\gamma_o^2\left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right)^2} \tag{96}$$

En prenant la racine carrée :

$$\boxed{\gamma_s\,\gamma_o\left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}} \tag{97}$$

En substituant dans l'expression du rapport des fréquences :

$$\frac{f_o}{f_s} = \frac{1}{\gamma_s\,\gamma_o\left(1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}\right)\left(1 - \frac{\vec{u} \cdot \hat{n}}{c}\right)} = \frac{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}{1 - \frac{\vec{u} \cdot \hat{n}}{c}} \tag{98}$$

On obtient finalement :

$$\boxed{\frac{f_o}{f_s} = \frac{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}{1 - \frac{\vec{u} \cdot \hat{n}}{c}}} \tag{99}$$

4.3 Analyse et portée physique du résultat

4.3.1 Disparition des vitesses absolues

Le résultat (99) est remarquable à plusieurs titres.

Toutes les dépendances en $\vec{v}_s$, $\vec{v}_o$, et en toute vitesse de fond $\vec{V}_{\text{fond}}$ ont disparu. L'observable ne dépend plus que de la vitesse apparente reconstruite $\vec{u}$, indépendamment de tout référentiel absolu.

Pour comprendre ce mécanisme de disparition, rappelons que les vitesses absolues de la source et de l'observateur peuvent se décomposer en une contribution commune et une contribution locale :

$$\vec{v}_s = \vec{V}_{\text{fond}} + \vec{v}_{s,\text{local}} \qquad \vec{v}_o = \vec{V}_{\text{fond}} + \vec{v}_{o,\text{local}} \tag{100}$$

La vitesse reconstruite $\vec{u}$ est donnée par la loi de reconstruction cinématique :

$$\vec{u} = \frac{\vec{v}_{s\parallel} - \vec{v}_o + \frac{1}{\gamma_o}\vec{v}_{s\perp}}{1 - \frac{\vec{v}_s \cdot \vec{v}_o}{c^2}} \tag{101}$$

où $\vec{v}_{s\parallel}$ et $\vec{v}_{s\perp}$ désignent respectivement les composantes de $\vec{v}_s$ parallèle et perpendiculaire à $\vec{v}_o$.

Si source et observateur partagent la même vitesse de fond $\vec{V}_{\text{fond}}$, celle-ci intervient dans $\vec{v}_s$ et $\vec{v}_o$ simultanément, mais se simplifie dans la vitesse reconstruite $\vec{u}$. En effet, comme montré par les vérifications immédiates de la loi de reconstruction, si $\vec{v}_s = \vec{v}_o$, alors $\vec{u} = \vec{0}$.

Plus généralement, la structure de la loi de reconstruction garantit que toute composante commune aux deux systèmes disparaît de la grandeur reconstruite. La vitesse de fond ne laisse donc aucune signature dans l'observable final (99).

4.3.2 Cas particuliers

Cas transverse. Si la vitesse relative est perpendiculaire à la direction de propagation, alors $\vec{u} \cdot \hat{n} = 0$, et la loi (99) devient :

$$f_o = f_s \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \tag{102}$$

Le décalage observé provient alors uniquement du ralentissement relatif des cadences, et dépend exclusivement de la vitesse relative u, indépendamment de toute vitesse de fond commune.

Cas longitudinal. Si la vitesse relative est colinéaire à la direction de propagation, alors $\vec{u} \cdot \hat{n} = \pm u$, et la loi (99) devient :

$$f_o = f_s \frac{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}{1 \mp \frac{u}{c}} = f_s \sqrt{\frac{1 \pm \frac{u}{c}}{1 \mp \frac{u}{c}}} \tag{103}$$

où le signe supérieur correspond à un rapprochement et le signe inférieur à un éloignement. On retrouve la formule Doppler relativiste standard.

4.3.3 Cohérence avec le principe de relativité

La forme finale (99) est structurellement identique à celle obtenue en relativité restreinte. Cependant, les deux démarches diffèrent fondamentalement.

En relativité restreinte, cette expression est postulée comme une conséquence directe de l'invariance de Lorentz et de la constance de la vitesse de la lumière dans tous les référentiels inertiels.

Dans le cadre présenté ici, elle émerge comme une conséquence du processus de reconstruction des grandeurs cinématiques à partir de signaux propagés dans un milieu. Les mécanismes en jeu sont :

1. le ralentissement des horloges de la source et de l'observateur, résultant de leur mouvement absolu dans le milieu, qui introduit les facteurs γ_s et γ_o
2. le biais de synchronisation induit par la propagation finie des signaux et le mouvement de l'observateur, qui introduit le facteur $1 - \vec{v}_s \cdot \vec{v}_o / c^2$

3. la compensation exacte de ces deux contributions par la structure de la loi de reconstruction, qui fait apparaître $\vec{u}$ comme seule variable pertinente via (97)
4. la prise en compte du déplacement de la source entre deux émissions successives, exprimé dans le référentiel reconstruit de l'observateur, qui introduit le facteur géométrique $1 - \vec{u} \cdot \hat{n}/c$

Ces quatre mécanismes opèrent simultanément et se combinent de façon à éliminer toute trace des vitesses absolues individuelles. Le résultat est une loi Doppler qui ne fait intervenir que la vitesse relative reconstruite, en accord complet avec les observations expérimentales.

4.4 Vers une réconciliation entre temps absolu et dynamique du milieu

Le cadre développé dans ce travail ouvre une perspective conceptuelle nouvelle : celle d'une compatibilité entre l'existence d'un temps absolu, d'un référentiel privilégié, et les lois relativistes observées expérimentalement. Cette compatibilité repose sur une relecture cinématique des phénomènes, où les effets traditionnellement interprétés comme des propriétés fondamentales de l'espace-temps émergent en réalité d'une interaction dynamique avec un milieu énergétique structurant.

Dans cette approche, les transformations relativistes ne sont plus postulées comme des symétries fondamentales, mais apparaissent comme des conséquences effectives de la propagation finie des interactions au sein de ce milieu. Le ralentissement des horloges, la contraction des longueurs et les effets Doppler généralisés trouvent ainsi une interprétation unifiée en termes de reconstruction cinématique des signaux, dépendante de l'état de mouvement relatif vis-à-vis du milieu.

Cette reconstruction met en évidence l'existence d'un biais systématique dans l'accès aux événements, induit par la dynamique du champ et par la géométrie de propagation. Ce biais masque l'existence d'un temps absolu sous-jacent, tout en produisant des lois invariantes du point de vue des observateurs en mouvement relatif. Il en résulte une forme d'invariance émergente, non fondamentale, mais induite par les contraintes de mesure.

Ce cadre confère ainsi une crédibilité renouvelée à l'hypothèse d'un milieu énergétique, en lui donnant un rôle opérationnel précis dans la formation des observables. Il ne s'agit plus d'un substrat passif, mais d'un acteur dynamique dans la structuration des phénomènes physiques.

En outre, cette approche ouvre une voie pour l'exploration de nouveaux effets physiques. En particulier, la reconstruction cinématique suggère l'existence de corrections fines aux lois relativistes standards dans des régimes où les hypothèses usuelles cessent d'être strictement valides. Ces écarts potentiels constituent des signatures expérimentales accessibles, permettant de tester directement la présence et les propriétés du milieu.

À ma connaissance, une telle démarche, articulant explicitement temps absolu, référentiel privilégié et invariance apparente via un mécanisme de reconstruction cinématique, n'a pas été développée dans la littérature sous cette forme. Elle propose ainsi un cadre conceptuel original, susceptible de renouveler l'analyse des fondements de la physique relativiste.

4.5 Indice cosmologique d'un référentiel privilégié

Un élément observationnel majeur vient prolonger cette analyse : l'existence du fond diffus cosmologique.

Ce rayonnement fossile, issu de l'univers primordial, est observable aujourd'hui dans toutes les directions de l'espace. Sa propriété la plus remarquable est son isotropie quasi parfaite, la température mesurée étant pratiquement identique quelle que soit la direction d'observation.

Toutefois, une anisotropie dipolaire de très faible amplitude est observée avec une grande précision. Cette anisotropie s'interprète naturellement comme un effet Doppler dû au mouvement de l'observateur par rapport à un référentiel dans lequel le fond diffus est isotrope.

Cette anisotropie correspond à une variation relative de température de l'ordre de :

$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-3} \tag{104}$$

ce qui, via l'effet Doppler relativiste, indique une vitesse de l'ordre de :

$$v \approx 370 \text{ km/s} \tag{105}$$

pour le système solaire par rapport à ce référentiel cosmologique.

Il existe ainsi un référentiel particulier vérifiant :

$$T(\theta) = \text{constante} \tag{106}$$

dans lequel la composante dipolaire disparaît. Ce référentiel, défini opérationnellement par l'isotropie du fond diffus cosmologique, constitue un référentiel privilégié à l'échelle cosmologique. Il permet de définir une vitesse absolue des systèmes astrophysiques, incluant la Terre, le Soleil et la Galaxie.

Ce constat expérimental introduit un élément de structure globale :

- il fournit une définition physique d'un état de repos à grande échelle
- il donne un sens opérationnel à la notion de vitesse absolue dans un cadre cosmologique
- il demeure compatible avec l'invariance locale des lois physiques

La coexistence de ces deux aspects suggère une lecture unifiée.

À l'échelle locale, les observables ne dépendent que des vitesses relatives reconstruites, ce qui garantit la validité des résultats de la relativité restreinte dans tous les tests expérimentaux accessibles.

À l'échelle globale, l'existence d'un milieu de propagation peut définir un état de repos privilégié, accessible uniquement par des observations intégrant des structures à très grande échelle.

Dans cette perspective, la relativité du mouvement ne correspond plus à une absence de référentiel absolu, mais à une limitation intrinsèque des procédures de mesure locales. La structure mathématique relativiste, y compris la composition non linéaire des vitesses et la loi Doppler (99), apparaît alors comme une conséquence de l'interaction entre :

— la propagation finie des signaux dans le milieu
— le mouvement de l'observateur dans ce milieu
— les mécanismes de reconstruction des grandeurs physiques à partir des signaux reçus

Ainsi, l'existence d'un référentiel absolu et la validité expérimentale de la relativité restreinte ne s'excluent plus, mais s'inscrivent dans une description cohérente où les lois observées émergent des conditions mêmes de leur mesure.