



HAL
open science

Révision du statut de la “ vitesse de la lumière ” et examen de quelques problèmes cosmologiques

Bernard Guy

► **To cite this version:**

Bernard Guy. Révision du statut de la “ vitesse de la lumière ” et examen de quelques problèmes cosmologiques. 2022. hal-03860051

HAL Id: hal-03860051

<https://hal.science/hal-03860051v1>

Preprint submitted on 18 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Révision du statut de la « vitesse de la lumière » et examen de quelques problèmes cosmologiques

Bernard GUY

Mines Saint-Etienne, Institut Mines Télécom

guy@emse.fr

Novembre 2022

Résumé

Le problème cosmologique de la matière noire n'est pas un problème de *matière* (un problème de particules, de gravité, d'énergie...). C'est d'abord un problème de *vitesse* v d'objets célestes surévaluées. Un facteur α d'environ 2.4 est observé par rapport à ce qui est attendu ; traduit en masses, en élevant au carré, $(2.4)^2 \approx 6$, c'est le ratio entre la matière noire postulée et la matière baryonique. De notre côté, nous pensons approprié de remettre sur le métier notre compréhension des étalons d'espace et de temps, et le rôle donné à la vitesse de la lumière c . Cette dernière n'a pas de sens toute seule ; elle s'évalue en comparaison avec d'autres *mouvements*. Symétriquement, les vitesses des mobiles offerts à notre investigation sont *in fine* évaluées par des rapports v/c (en particulier, pour les objets célestes lointains, par effet Doppler). Nous tombons sur un cercle de régressions sans fin, où l'on compare des rapports v/c entre eux, cercle arrêté en donnant 'provisoirement' à c une valeur étalon (dans un statut de fiction à la Vaihinger). Il importe de ne pas détourner notre regard sur ces circularités. Respectant les rapports v/c , qui seuls sont 'réels', nous souhaitons diminuer les numérateurs, pour les accorder aux vitesses attendues dans un cadre théorique éprouvé. Nous sommes alors encouragés à postuler, à l'échelle cosmologique de millions à milliards d'années-lumière, une vitesse de la lumière inférieure d'un facteur $\alpha \approx 2.4$ à sa valeur à l'échelle locale (système solaire). Les interactions de nature gravitationnelle et électromagnétique écartent la lumière de son trajet rectiligne et entraînent une vitesse 'macroscopique' moindre, comme dans les milieux réfringents. Ce n'est pas sans hésitation que nous formulons et poussons dans ses conséquences cette proposition : elle doit être soumise à la critique et à l'épreuve. Elle vient apporter un regard neuf sur l'ensemble des problèmes cosmologiques. Elle conduit à un rallongement de l'histoire de l'univers : il pourrait avoir quelques 33 milliards d'années (soit l'âge annoncé aujourd'hui, de 13,8 milliards d'années, multiplié par 2,4), sans compromettre l'enchaînement des étapes définies par les physiciens ; ni les fondements de la théorie de la relativité. *Les puissances du paramètre α , soient $\alpha^1 = \alpha$, α^2 et α^4 permettent de retrouver la hiérarchie et les bonnes proportions pour la trilogie matière baryonique / matière noire / énergie sombre*, les deux derniers termes étant le nom des corrections nécessaires pour compenser l' 'erreur' d'appréciation concernant la vitesse de la lumière à l'échelle cosmologique (l'un dans le cadre de la mécanique newtonienne, l'autre dans celui de la relativité générale).

Mots-clés : matière noire ; énergie sombre ; inflation cosmique ; tension de Hubble ; théorie de la relativité restreinte et générale ; rationalité relationnelle ; espace ; temps ; mouvement ; lumière ; vitesse variable de la lumière ; mirages gravitationnels ; réfringence ; indice optique

Introduction

Nombreux sont les sujets de débat dans la cosmologie contemporaine. Ils ont pour noms *matière noire* et *énergie sombre* (de quoi sont-elles faites ?), *inflation cosmique* (comment est-ce possible ?), *tension de Hubble* (comment la résoudre ?), etc. (voir parmi tant d'autres : Taillet *et al.*, 2013 ; Moore, 2014 ; Ananthaswamy, 2022). Leur point commun (manifeste pour les deux premiers) est qu'ils se posent en termes de vitesses de déplacements d'objets célestes qui ne s'accordent pas avec ce qu'on attend : elles sont trop grandes. Parler de vitesses sous-entend définitions et mesures de l'espace et du temps : cela nous mène du côté de la lumière, dont la « vitesse » reste aussi occasion de débat (*e.g.* Will, 1992 ; Selleri, 1996 ; Schaefer, 1999 ; Hermann *et al.*, 2005 ; Greaves *et al.*, 2009 ; Giovannini *et al.* 2015).

De notre côté, le regard sur ces questions est nourri par une réflexion au long cours sur la trilogie temps / espace / mouvement (voir par exemple : Guy, 2011, 2019a, 2022 a et b). Sans reprendre l'évocation de ces recherches, nous affirmons deux convictions fortes, reliées l'une à l'autre : 1) nous devons utiliser en physique une approche relationnelle, ce qui implique en particulier que la *lumière et sa vitesse ne sont pas envisagées toutes seules, mais dans la comparaison à d'autres mouvements* ; 2) la théorie de la relativité, telle qu'exprimée dans les deux postulats et dans la transformation de Lorentz, fournit un cadre indispensable aux expressions mathématiques des lois physiques ; elle exprime à sa façon la primauté du mouvement dont dérivent l'espace et le temps.

Notre conception du mouvement est large, enracinée qu'elle est dans les sens du sujet humain, avant même les mots du discours (Guy, 2022a et b). Il n'y a pas de concepts purs, même en physique fondamentale, qui ne dérivent de la connaissance du corps, comme la phénoménologie et l'anthropologie nous le redisent. Nous savons faire un partage entre des phénomènes dont les propriétés de mouvements nous paraissent contrastées. Selon la pensée relationnelle, ou complexe (Morin, 2014 ; Guy, 2022c), les mouvements sont compris à la fois dans leur distinction et dans leur relation : ainsi ce qui concerne la lumière d'un côté, et ce qui concerne la matière, de l'autre. Les mesures des scientifiques portent sur des ratios d'amplitudes de mouvements (perçues au départ plus ou moins grandes par les sens) ; on parle à leur propos de vitesses, en particulier lorsqu'on fait le choix de s'appuyer sur certains mouvements comme étalons, arrêtant les régressions sans fin entraînées par les comparaisons des mouvements les uns avec les autres. Se plaçant dans un cadre fictionnel utile pour penser (Guy, 2022a), on parle de la vitesse d'un mouvement pris isolément, bien qu'une vitesse soit toujours une façon

quantitative d'exprimer la comparaison de deux mouvements¹. Nous voulons montrer que cette conception large du mouvement, qui sera éclairée par la suite du texte, fournit un cadre conceptuel renouvelé, fécond jusque dans le domaine de la physique. Nous utiliserons les symboles c et v (avec divers indices suivant le contexte et les phénomènes auxquels ils sont attachés) pour parler des mouvements ou « vitesses » relevant respectivement de la lumière (phénomènes électromagnétiques), et de ce qui n'en est pas (en particulier du côté de la gravitation). Sachant que nous n'avons accès par la mesure qu'à des ratios du type v/c ou c_1/c_2 ou v_1/v_2 , etc.²

Nous souhaitons utiliser ces angles d'attaque pour les problèmes évoqués plus haut. *Alors qu'il semblerait naturel de les poser en termes de matière, d'énergie ou de gravité, nous relevons qu'ils se posent au départ simplement en termes de vitesses.* Notre hypothèse de travail est que, dans leur ensemble, ils tiennent, de façon directe ou indirecte, à notre (mauvaise ?) façon de comprendre les relations entre les vitesses des objets matériels et celle de la lumière : *la discussion ne doit pas porter de façon dissociée sur les vitesses des astres d'un côté, et celle de la lumière de l'autre, car ces vitesses ne sont pas connues de façon indépendante les unes des autres.* La réflexion sur le sens et le fonctionnement des variables spatiales et temporelles ne doit pas non plus en être séparée.

Notre plan sera le suivant. Dans une première partie nous parlerons de l'histoire de la mesure de la « vitesse » de la lumière, et verrons cette dernière comme toujours rapportée à d'autres mouvements. Nous exprimerons ensuite (2° partie) la nécessité de prendre au sérieux et de généraliser le constat précédent : la lumière n'est pas envisageable toute seule ; nous ne connaissons que des rapports de type v/c et on peut envisager la variation de la « vitesse » c dans un sens à préciser. Nous discuterons alors les problèmes de la matière noire (3° partie), avec une section (4° partie) sur sa manifestation dans l'étude du fonds diffus cosmologique (CMB ou *cosmic microwave background*). Un nouvel angle s'offrira pour regarder l'évolution de l'univers (5° partie), et divers chantiers en découleront : énergie sombre (6° partie), tension de Hubble (7° partie), inflation cosmique (8° partie). Il sera alors temps (9° partie) de s'arrêter sur les fondements de la théorie de la relativité et la compatibilité de la transformation de Lorentz avec les hypothèses présentées. Nous évoquerons dans la foulée quelques-uns des travaux proposant des vitesses variables de la lumière (VVL). Nous terminerons en esquissant

¹ Pour nous, l'expression « amplitude de mouvement » précède le mot de « vitesse ». Et il faudrait la plupart du temps mettre ce dernier entre guillemets, tant il est employé en dehors du strict cadre que nous venons d'énoncer ; nous ne le ferons pas.

² Le ratio est à la fois un tout numérique indivisible et une dualité (lorsque nous décidons de prendre comme étalon un des deux phénomènes en relation).

des propositions pour expliquer la valeur moindre de la vitesse de la lumière à l'échelle cosmologique d'un facteur α (cela aura été présenté auparavant ; 10° partie) avant quelques éléments de conclusion (11° partie).

Contemplant l'amplitude des sujets abordés, il est inutile de souligner que nous manquons de compétence sur tous : il y a d'immenses quantités de données³ sur lesquelles réfléchissent des centaines d'équipes, des milliers de chercheurs ; il y a des théories innombrables et de multiples controverses. Dans notre entreprise isolée, et bien naïve (à laquelle il faut mettre un terme sans avoir tout examiné de près⁴), nous proposons un regard distancié, à hybrider avec d'autres, le squelette d'une approche à critiquer et affiner, en particulier du point de vue quantitatif, si cela semblait intéressant. Nous avons tenté de pousser le plus loin possible les conséquences d'idées simples, privilégiant l'effort de cohérence interne, sans nous demander tout de suite s'il faut vraiment y croire. Il conviendra d'examiner sans tarder toutes les objections qui ne manqueront pas de se poser et qui, peut-être, jetteront à terre le château de cartes.

Le type de publication choisi correspond à ce que nous sommes en mesure de faire pour l'instant, en attente de la critique des pairs. Cela comporte de nombreuses limites, en particulier celle de nous entraîner vers une sorte d'exhaustivité, nuisible à l'appréhension du texte. Alors que plusieurs articles, chacun mieux focalisé sur tel aspect de la problématique, seraient préférables (et plus faciles à lire ?). Ou un texte plus synthétique ? La longueur de la composition s'explique par l'incompétence initiale : nous avons éprouvé le besoin de raconter notre découverte de la cosmologie ; ceux qui connaissent bien ce domaine se contenteront d'un survol de maintes parties. Pour tous, nous avons fractionné l'étude en deux types de passages : ceux mis en retrait peuvent être omis dans un premier temps, sans nuire à la découverte du fil principal. Tel qu'il est constitué, l'ensemble des pièces s'ajuste-t-il ? En réponse, nous affirmons l'unité de notre démarche, fondée, d'une part, sur une réflexion sur le statut de la vitesse de la lumière, et, d'autre part, sur l'hypothèse que sa valeur à l'échelle cosmologique est moindre que dans le « vide » ; il en est *d'un facteur α dont les puissances assurent la 'cohérence' entre la matière ordinaire, la matière noire et l'énergie sombre*. Certes, pour parler de réfringence, nous n'avons pas besoin de nous arrêter sur les circularités épistémologiques cachées dans le mouvement de la lumière (les parties 1, 2 et 9 constituent un morceau en soi, envisageable de façon séparée des parties sur la cosmologie, que l'on peut rejoindre en allant

³ Les données s'accroissent considérablement ces temps-ci, avec la mise en service de nouveaux télescopes, en particulier le *James Web Telescope* en 2022. En ce qui concerne les publications, nous en avons cité quelques-unes, sans aucune prétention à l'exhaustivité, ni même à la représentativité.

⁴ Que de fois nous avons voulu poursuivre les investigations, au risque de l'enlèvement ; arrêtons-nous : voici quelques pistes imparfaites, avec sans doute une inégale pertinence du propos suivant les sujets abordés...

directement en 3) ; mais cela vient donner un contexte et une motivation plus larges à nos propositions.

1. Mesures de la vitesse de la lumière

Dans ce qui suit, ni la question de l'existence du temps, ni celle de l'espace, supposés indépendants des phénomènes étudiés, ne sont *a priori* posées (mais nous verrons qu'ils ne sont pas de première nécessité !).

1.1. La mesure de Römer

Les travaux sur la vitesse de la lumière en 1676 par l'astronome danois O. Römer, en poste à l'observatoire de Paris, méritent un premier arrêt, même si aucune valeur n'est donnée. Avant lui, il y avait eu des tentatives, notamment par Galilée et Descartes, sans conclusion : « cela va trop vite ! ». Sommairement, le principe est le suivant (Uzan et Lehoucq, 2005). On examine les mouvements du satellite Io de Jupiter (Fig. 1). Une avance, ou un retard, de valeur τ , par rapport au temps d'occultation T , est observé pour la réapparition du satellite qui contourne la planète, suivant que la terre se rapproche ou s'éloigne de Jupiter. L'interprétation donnée par Römer est que la lumière a une vitesse de propagation finie (c'est-à-dire non infinie) ; elle met plus ou moins de temps pour nous parvenir, car pendant le temps de l'occultation, la terre a rallongé ou diminué sa distance à Jupiter d'une amplitude L . Römer s'en est tenu à cette constatation. Sur cette base on pourrait calculer la vitesse de cette lumière comme la distance L parcourue pendant le temps τ . Mais évoquer ce L comme une longueur est une façon de parler, car, en réalité, elle n'est pas envisagée isolément à partir de rien, dans le vide ; elle renvoie à un morceau de mouvement, celui de la terre à la vitesse v , sur son orbite d'origine gravitationnelle, autour du soleil⁵, pendant le temps T de l'occultation du satellite.

On a donc

$$c = \frac{L}{\tau} = \frac{vT}{\tau}$$

Ou :

$$\frac{c}{v} = \frac{T}{\tau}$$

⁵ Ou plus exactement la vitesse relative entre la terre et Jupiter.

Ainsi détermine-t-on c , dans son rapport sans dimension à v , par le ratio de deux temps. Ceux-ci sont mesurés depuis la terre dans des conditions supposées identiques (c'est autant une constatation qu'une « décision ») par des détours sur lesquels nous dirons un mot dans la section 1.5. *La vitesse v est supposée connue de façon solide et indépendante*, et ce sera le cas lors des autres mesures de c , où d'autres v interviendront, dont nous parlerons dans les sections suivantes.

On voit mieux l'intrication de la vitesse de la lumière et de celle de la terre dans le ratio précédent, à travers l'interprétation de l'expérience de Römer par effet Doppler (nous répétons ce que nous venons de dire de façon un peu différente ; revoir Fig. 1). La rotation de Io autour de sa planète définit une période, que nous écrirons $2T$, supposée connue en elle-même (explication de principe sans chercher de précision quantitative). Comme nous l'avons dit, le laps de temps T , lorsqu'on le mesure depuis la terre (à partir de la durée entre l'immersion derrière Jupiter et l'émergence suivante), montre une variation selon que la terre se rapproche ou s'éloigne de la planète. Lorsque la distance entre Jupiter et la terre diminue, la demi-période T est raccourcie d'un facteur ΔT_1 ; c'est le temps mis par la lumière pour parcourir le morceau du trajet correspondant de la terre en direction de Jupiter. Lorsque la terre s'éloigne de Jupiter, la demi-période est rallongée d'un facteur ΔT_2 : c'est le temps mis par la lumière pour parcourir le trajet correspondant de la terre s'éloignant de Jupiter. En première approximation nous écrirons que $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \tau$ (valeur de l'ordre de 16 minutes pour une période $2T$ de 42,5 h). Nous supposons que le temps d'occultation est égal à la demi-période, soit T . En appliquant la formule de l'effet Doppler (Taillet et al., 2013), on a

$$\frac{\tau}{T} = \frac{v}{c}$$

Ce qui redonne la relation donnée ci-dessus. En bref, un oscillateur (Io autour de Jupiter) voit sa fréquence augmentée ou diminuée si on (la terre) se rapproche ou s'éloigne de lui. On peut utiliser le facteur de décalage vers le rouge z (ou *redshift*), où f est la fréquence du signal, λ sa longueur d'onde, v la vitesse relative entre la source du signal (Jupiter) et le récepteur (la terre), c la vitesse de la lumière. L'expression relativiste en est

$$z = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta T}{T} = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} - 1$$

Avec $\beta = v/c$. Si v est petit devant c , ce qui est le cas, on a $z \approx \beta = v/c$.

1.2. La mesure de Bradley

Dans ce cas, on s'intéresse au phénomène d'aberration des étoiles (Fig. 2), en regardant spécialement les étoiles proches du zénith (dans la direction perpendiculaire au plan de l'écliptique) et leur orientation par rapport à celles qui sont davantage proche de ce plan (revoir Uzan et Lehoucq, *op. cit.*). On observe que les étoiles ne semblent pas être dans la même orientation tout au long de l'année, avec un écart maximal entre les moments où la terre se meut dans une certaine direction sur son orbite autour du soleil, et ceux, six mois plus tard, où elle se meut dans le sens opposé. L'interprétation de cet effet, donné par Bradley, astronome britannique (1728), est qu'il y a composition de la vitesse de la lumière avec celle du mouvement de la terre dans son orbite autour du soleil. En épargnant les calculs, on aboutit à la mesure d'un rapport v/c , sous la forme d'une *variation* d'angle $\delta\theta$ entre deux positions opposées de la terre⁶. La variation d'angle est donnée par une fonction de v/c

$$\delta\theta = g\left(\frac{v}{c}\right)$$

Pour des vitesses v petites, $\delta\theta$ est égal à v/c :

$$\delta\theta = \frac{v}{c}$$

Pour des vitesses très élevées, on fait intervenir le facteur γ relativiste. On se retrouve dans une situation comparable à celle décrite en 1.1., la vitesse c apparaissant dans un ratio de deux mouvements (l'un, relié à la terre, présumé connu, renvoie à la gravitation ; l'autre, lumineux, à l'électromagnétisme). Cette-fois ci, un angle est un rapport de deux longueurs évaluées sur terre (voir section 1.5 plus bas).

1.3. Les mesures de Fizeau et Foucault (XIX^e siècle)

Il s'agit de la comparaison de la vitesse de la lumière avec le mouvement d'une roue dentée (Fig. 3). Les mesures de Fizeau et de Foucault (respectivement en 1849 et en 1862) sont identiques dans leur principe (Uzan et Lehoucq, *op. cit.*). On mesure le rapport des longueurs de deux trajets, l'un, pour la roue, à la vitesse v , l'autre, pour la lumière, à la vitesse c . On ajuste la vitesse v de telle sorte que l'aller et retour de la lumière à un miroir distant, se fasse dans le laps de temps du franchissement d'un intervalle entre deux dents de la roue dentée. Un incrément de la roue le long de la circonférence à la vitesse v linéaire, occupe le temps Δt , avec $\Delta x = l = v\Delta t$. Pendant que la roue parcourt l à la vitesse v , la lumière parcourt L à la vitesse c . On a :

$$\frac{l}{L} = \frac{v}{c}$$

Où l , L et v sont supposés connus. On se retrouve dans une situation quasiment identique aux précédentes. La vitesse v n'est pas ici celle de la terre mais celle d'une roue dentée. Compte-tenu de la façon de mesurer et de définir les étalons d'espace et de temps (voir section 1.5.) cette vitesse est proportionnelle, via divers détours, à celle de la terre autour du soleil (ou à telle autre vitesse d'origine gravitationnelle).

1.4. Fixation de la valeur de $c = c_0$ (1983)

Nous nous sommes attardés sur les expériences historiques, elles ont une valeur emblématique et fondatrice. Par la suite, ces premières mesures, en particulier celles du type Fizeau Foucault, ont été perfectionnées (e.g. Michelson *et al.*, 1935). Avec Maxwell et les physiciens de l'électromagnétisme, d'autres types de mesures ont été effectuées, exploitant la dualité électricité / magnétisme attribuée à l'onde lumineuse. Uzan et Lehoucq (*op. cit.*) parlent de mesures simultanées de la longueur d'onde et de la fréquence d'une onde radio (le produit de ces deux quantités donne la vitesse de la lumière), de méthodes fondées sur la modulation de faisceaux polarisés, l'utilisation de cavités résonnantes (e.g. Essen & Gordon-Smith, 1947), etc.

⁶ Il y a discussions dans la littérature : dans quel repère se situe-t-on ? et si l'étoile bouge ? quel mouvement de la terre envisager ? On note que l'on mesure une *variation* d'angle, et c'est une façon de répondre.

On peut aussi citer des mesures indirectes via la permittivité électrique et la perméabilité magnétique du vide (on a : $c^2 = 1/\epsilon_0\mu_0$). Ces diverses mesures aboutissent toutes à des vitesses exprimées en mètres par seconde, renvoyant à des étalons indépendants d'espace et de temps supposés connus par ailleurs. Comme nous le redirons, elles sont dans la continuité et la filiation des mesures de type Fizeau – Foucault, auxquelles elles comparent d'ailleurs souvent leurs résultats : leur plein sens ne peut s'abstraire de mouvements cachés autres que celui de la lumière. Au début du XX^e, siècle Einstein et sa théorie de la relativité restreinte ont postulé la constance de c dans le vide. Confortés par une amélioration des mesures et par le statut donné à la lumière en relativité, la conférence des poids et mesures de 1983 a décidé de fixer, par décret, sans incertitude, la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide à $c = c_0 = 299\,792\,458$ mètres par seconde (en raccourci, 3.10^8 m/s).

1.5. Les mesures du temps et de l'espace (XVII^e-XXI^e siècle)

Comment a-t-on mesuré temps et espace, présumés connus indépendamment, dans les trois exemples historiques ? On a vu en effet que la proportion entre deux mouvements y a été estimée par le ratio de deux durées ou de deux longueurs. Du XVII^e au XX^e siècle, les définitions du temps et de l'espace ont évolué.

Pour le temps, on s'est d'abord rapporté de façon directe ou indirecte au mouvement relatif de la terre et du soleil (et des étoiles). Ainsi Römer utilise des horloges (avec divers systèmes de pendules) dont la calibration est liée aux forces d'origine gravitationnelle, dans les mouvements (diurne, annuel) de la terre par rapport au soleil. Blamont (2001), montre au XVIII^e siècle les inter-comparaisons / corrélations entre les horloges mécaniques en cours de perfectionnement et les différents mouvements terre / soleil. Par la suite, après avoir été une fraction du jour solaire moyen, puis de l'année tropique (encore de la même veine), l'unité de temps est devenue égale, en 1967, à un certain nombre de périodes de la radiation de la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental du Césium 133. On oublie alors les astres, mais on introduit de façon subreptice la vitesse de la lumière. Celle-ci était déjà cachée dans les premières mesures du temps : l'observation à distance, via la lumière, de tout mouvement-horloge, va combiner les vitesses en jeu dans un effet Doppler (imperceptible dans les exemples cités).

Pour l'espace, la multiplicité des toises et pieds a bien vite fait comprendre aux savants, dès le XVII^e siècle, qu'il fallait trouver une façon plus solide et générale de définir l'étalon de distance. Ainsi Huygens propose-t-il la longueur du pendule battant la seconde, ce qui lie déjà l'étalon de longueur au temps. Et depuis toujours, les liens entre la géographie (mesures de la terre) et l'astronomie et les mouvements célestes (y compris ceux de Io !) fonctionnent. Les mesures du temps et de l'espace au début du XVIII^e siècle sont dans la continuité de celles du XVII^e siècle (Blamont, *op. cit.*). Il y a ensuite l'intermède du mètre étalon en platine, puis on revient au mouvement de la lumière dans la définition de 1983 (le mètre est un morceau de mouvement de la lumière pendant un certain temps). Pour Bradley, de même que pour Foucault et Fizeau, le ratio de deux longueurs s'interprète aujourd'hui aussi bien comme de deux temps.

2. Peut-on envisager la lumière « toute seule » ?

2.1. Que sont devenus les autres mouvements que celui de la lumière ?

La fixation de la vitesse de la lumière par le décret de 1983 a entraîné une définition du mètre en fonction de la seconde. Dans ce contexte, du fait des circularités dans la spécification des étalons, on se demande si de nouvelles mesures ont encore un sens. Il y en a eu en tout cas, et

il y en a toujours (*e.g.* Riis *et al.*, 1988 ; Müller *et al.*, 2003 ; Rodrigues & Bengaly, 2021). Ces estimations supposent un espace et un temps déjà gradués, ce qui, à cause des nouvelles définitions du mètre et de la seconde, fait intervenir comme un « autre » c qui y est caché. Ainsi, dans ces cas-là, faute de prétendre déterminer la vitesse de la lumière, peut-on au moins éprouver la cohérence interne de la démarche, tant expérimentale que théorique.

Mais nous remarquerons surtout le fait que, depuis 1983, *tout se passe comme si on ne raisonnait qu'avec c seule*⁷. On est passé des rapports v/c des premières études à une seule grandeur, c , alors qu'on avait accordé initialement un sens indépendant aux vitesses v en jeu pour déterminer c . Nous commettons en cela une double erreur, anthropologique / phénoménologique d'une part, épistémologique d'autre part.

Erreur anthropologique et phénoménologique. Depuis les débuts de l'humanité, la compréhension de ce qu'on abstrait par le mot de temps est liée aux mouvements, en particulier ceux des astres (Guy, 2022a et b). La valeur figée $c_0 = 3.10^8$ m/s nous rapporte aux anciens étalons : un v est toujours caché dans l'expression m/s (mètre par seconde) qui suit le chiffre 3.10^8 ; il a valeur anthropologique, celle du pas du marcheur tranquille (on dit « aller au pas » !), ou appartenant à une classe de vitesses proches de celles de l'homme ou rencontrées par lui (du fait des circularités ce m/s n'a pas de sens non plus tout seul...).

Erreur logique et épistémologique. Regardons ce qui s'est passé. On disposait d'un rapport v/c ; pour évaluer c , on a commencé par supposer v assuré, à notre disposition, de façon indépendante de c (v ou toute autre vitesse que l'on peut corrélérer). Par la suite on a fixé c . Mais il y a toujours deux termes dans la fraction initiale, un numérateur et un dénominateur : on ne fait pas disparaître l'un en figeant l'autre par commodité (comme base de comparaison pour diverses observations). C'est toujours un rapport qu'on a, rien de plus et il y a toujours l'autre mouvement caché, oublié par la valeur donnée à la lumière. Si l'on veut bien fouiller un peu, on retrouve toujours une comparaison entre un mouvement électromagnétique (lumière) et un mouvement gravitationnel (pendule, terre par rapport au soleil...)⁸.

Nous avons surtout fait l'erreur de détourner notre regard de toutes les circularités en jeu !
Nous aurions pu dire dès le début du texte : « nul besoin d'en passer par l'examen de toutes ces mesures de la vitesse de la lumière. Cela n'a pas de sens de prétendre connaître c tout seul, on ne sait un mouvement qu'en comparaison avec un autre mouvement. Ce n'est pas possible qu'il

⁷ Changement de statut de la vitesse de la lumière : nous avons parlé dans nos travaux plus anciens du mouvement étalon de la lumière (pour lequel le mot vitesse n'est pas adapté). Nous nous trompons alors sur le fait de pouvoir l'envisager seul, sans le jeu de la comparaison avec un autre mouvement.

⁸ On continue d'ailleurs de confronter ces deux types de mouvements en ajustant les secondes électromagnétiques à l'année gravitationnelle.

en soit autrement ». Poincaré (1902, 1905), nous rappelle que seuls des rapports entre grandeurs associées aux phénomènes nous sont accessibles⁹. Mètre et seconde (espace et temps), ne sont pas définis de façon préalable et indépendante (mais comment aurions-nous pu le faire sans les appuyer sur les phénomènes ?). *La valeur $c_0 = 3.10^8$ m/s n'est pas une propriété de la lumière. Elle exprime une comparaison avec un (ou des) autre(s) mouvement(s).*

2.2. Choix épistémologiques du présent travail

Nous nous permettrons de donner une valeur générale à ce qui précède : bien que ni l'existence de l'espace, ni celle du temps, n'aient été contestées lors des mesures de la vitesse de la lumière, nous relevons que cette dernière n'est pas évaluée de façon ultime sous la forme d'un rapport entre un intervalle d'espace Δl et un intervalle de temps Δt dans

$$c = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

où l'espace (permettant d'évaluer l) et le temps t seraient donnés, avec leurs graduations, de façon préalable et indépendante. Au contraire, on évalue un rapport entre ce que nous nommons (suivant les précautions de langage précédentes) deux vitesses v et c dans

$$r = \frac{v}{c}$$

d'où nous tirons

$$c = \frac{v}{r}$$

En bref, *la vitesse c ne se retrouve pas en face seulement d'étalons d'espace et de temps déjà là, mais, toujours, un autre mouvement est impliqué* ; c est déterminée par le rapport sans dimension à ce dernier. Dans v/c , (ou c/v), v , supposée connue, ne renvoie pas forcément à un unique phénomène de propagation, un unique mouvement, comme nous l'avons dit, mais à toute une classe de phénomènes que l'on sait relier quantitativement les uns aux autres¹⁰. Parlons d'une relation d'équivalence : un ensemble de vitesses accordées les unes aux autres par des lois théoriques et/ou expérimentales.

L'examen des différentes mesures de la vitesse de la lumière montre un empilement de comparaisons de rapports v/c (mettant en jeu diverses forces, au sens physique). Nous sommes

⁹ Dans *La valeur de la science* Poincaré (1905) souligne aussi que nous supposons d'abord c constant (nous ne le constatons pas), et ensuite nous en proposons une valeur.

¹⁰ On aurait pu demander : pourquoi considérer le mouvement, par rapport à la terre, de Jupiter et de Io, plutôt que celui de Saturne et ses satellites, ou encore tel autre mouvement de notre environnement proche ou lointain ? Le lien entre les grandeurs G (constante de la gravitation), m (masses des objets), r (distances caractéristiques) et c , caché dans ces correspondances méritera des développements spécifiques.

entraînés dans une régression sans fin¹¹. Nous la stoppons en arrêtant la valeur de l'un des deux termes, v ou c , comme base d'évaluation de l'autre terme, c ou v . Nous décidons de le faire pour le versant lumineux avec $c = c_0$, étalon pour estimer tous les v_i du même type que tel ou tel v de la mesure en cours. En d'autres termes, nous avons évalué un rapport : nous fixons le dénominateur dans des conditions particulières en relation avec un autre mouvement permettant de parler d'unités, mètre et seconde ; il permettra de quantifier d'autres v plus tard. Ce choix n'est pas strictement imposé, c'est le plus raisonnable dans les conditions où nous nous trouvons par rapport à la vitesse de la lumière, très grande devant celles de nos mouvements les plus familiers. C'est un pari épistémologique. Il nous fait sortir de la stricte « vérité » du rapport v/c pour rentrer dans un espace-temps fictif, indispensable pour penser et dire. Tout se passe comme si l'on pouvait exprimer momentanément c « tout seul » en m/s ; mètre et seconde graduent les axes d'espace et de temps de cette fiction, en prolongement et continuité avec les mesures initiales où jouaient les v_i . Nous ne pouvons éviter le passage par la fiction en conjugaison avec les évaluations des v/c , comme nous l'avons développé dans Guy (2022a et b ; voir aussi Vaihinger, 1923) ; nous en reparlerons dans la section 9 sur la Transformation de Lorentz.

Lorsque, usant du mode relationnel, on se trouve devant un système de circularités entre des grandeurs et/ou des concepts, on doit procéder en deux temps. 1) On commence à faire comme si concepts et grandeurs étaient connus tout seuls (via le détour par un espace-temps fictif évoqué à l'instant). 2) On rectifie, c'est-à-dire on dit : non, on ne les connaît pas tout seuls, mais par leur rapport ; c'est la seule chose solide sur laquelle s'appuyer. Ainsi ce qui concerne deux mouvements : on prétend connaître leurs vitesses, mais leurs mesures renvoient à des rapports, et un duo de vitesses différent pourrait être choisi, respectant le même rapport, oubliant alors l'ancien choix d'étalons et le modifiant.

Deux compréhensions différentes de la « constante » c_0 (nommée habituellement simplement c) sont présentes dans la théorie physique. - On peut y voir la vitesse de propagation de la lumière (c'est en particulier le cas en physique classique et en relativité restreinte). - On peut y voir une constante de structure, intervenant, en accointance avec d'autres constantes, dans les équations. C'est le cas en relativité générale : c apparaît dans les métriques (associant variables d'espace et de temps), dans les équations d'Einstein, etc., où son caractère de vitesse n'est plus

¹¹ Revenant sur les évaluations anciennes, nous pourrions nous demander comment les vitesses v intervenant dans les mesures de Römer et de Bradley sont définies aujourd'hui : peuvent-elles se passer de c ?

lisible. L'habitude de certains physiciens théoriciens de prendre $c = 1$, fait qu'on finit par oublier qu'une vitesse de propagation pourrait se cacher à tel ou tel endroit. Dans le présent texte, notre approche correspondra à la première compréhension, semi-classique, c'est-à-dire que c aura valeur de vitesse (avec les nuances que nous avons rappelées plus haut). Et nous travaillerons dans un contexte où nous nous efforcerons, autant que possible, de ne pas traiter de durées et de longueurs « pures », mais de mettre en balance des mouvements. Comme nous l'avons dit cette approche nous conduit à utiliser la fiction de l'espace et du temps isolés l'un de l'autre (où c serait une constante de structure), mais il faut autant que faire se peut se rapporter à la (seule) réalité physique des rapports de grandeurs. Cela pourra nous encourager, lorsque nous repérerons c dans une équation, à lui donner une valeur différente de sa valeur standard, si nous estimons que, pour le problème étudié, une propagation de lumière pourrait se faire à une vitesse différente de c_0 .

2.3. Notations

A ce point de notre construction, le lecteur devine la suite : nous allons proposer d'autres valeurs pour la vitesse de la lumière à l'échelle cosmologique ; nous définirons une valeur $c_c < c_0$ (avec l'indice c , comme *cosmologique*) : ceci nous permettra de ramener des v « mesurées » à des valeurs plus basses et plus conformes à ce que nous attendons à notre échelle locale (système solaire). Cette démarche, fondée sur le respect des rapports v/c , sera le plus généralement appropriée pour les mesures des vitesses des étoiles, gaz, et objets célestes par effet Doppler¹².

Le rapport r qui nous occupe résulte d'une mesure ; il est sans dimension et, *a priori*, sa valeur ne doit pas être contestée. Nous disons que c'est un ratio de deux « vitesses », écrit v/c ; nous pouvons ajuster chacune des deux « valeurs » de v et de c , pourvu que le rapport reste r . Les notations à attribuer au numérateur et au dénominateur sont fonction des diverses situations et choix rencontrés. Nous le faisons isolément pour chacun d'eux, ce qui est impossible en toute rigueur, comme nous l'avons dit.

Commençons par la vitesse c de la lumière. Nous appellerons c_0 sa valeur dans le vide (au laboratoire ou dans notre environnement cosmique immédiat, celui de l'espace entre la terre et le soleil). C'est celle correspondant à notre échelle et nos choix d'étalons « locaux ». Dans la

¹² Nous ne regarderons pas (à tort ?) les variations de longueur d'onde par « fatigue » de la lumière le long de son voyage, par interactions avec poussières, gaz et ions (diverses théories exploitent cette idée). Nous ne ferons pas la correction relativiste fonction des $\beta = v/c$ (voir fin de 1.1), utile pour les vitesses de récession des objets les plus éloignés.

suite, nous serons amenés à parler d'une autre valeur de c , la valeur cosmologique, à l'échelle du trajet qui la fait voyager depuis des sources lointaines (étoiles, galaxies...) jusqu'à nous, et évaluée par comparaison à c_0 . Nous la nommerons c_c .

Pour ce qui concerne les « vitesses » des différents objets, célestes ou non, nous appellerons $v_{m'}$ leur valeur supposée mesurée, avec l'indice « m » ; dans les situations qui nous intéressent, l'estimation sera tirée du rapport $r = v/c$ en portant c_0 au dénominateur pour c , c'est-à-dire selon

$$r = \frac{v_{m'}}{c_0}$$

D'où l'on tire

$$v_{m'} = c_0 \cdot r$$

Comme évoqué précédemment, ce réflexe n'est pas forcément le bon ; nous avons pensé que v résultait d'une mesure « directe » et oublié le détour par c_0 ; aussi nous avons mis « mesuré » entre guillemets, noté 'm'¹³. Mais il nous faut envisager d'autres valeurs de v , à discuter suivant les cas ; nous parlerons alors de v_{attendu} ou v_a . Cette valeur v_a n'est donc pas évaluée toute seule, mais à travers la lumière de vitesse possiblement c_c qui nous la fait connaître à distance. En voulant rapporter la vitesse à nos étalons locaux habituels, autant pour v dans v_a que pour c dans c_0 , nous devons continuer à honorer le rapport r , écrit alors de deux façons :

$$r = \frac{v_{m'}}{c_0} = \frac{v_a}{c_c}$$

C'est la formule la plus importante de notre article ! Ce qui nous conduit à

$$v_a = \frac{c_c}{c_0} v_{m'}$$

Ou encore

$$v_a = \frac{1}{\alpha} v_{m'}$$

Avec

$$\alpha = \frac{c_0}{c_c}$$

On peut raisonner de façon différente en valeurs relatives, en dérivant r selon

$$\Delta r = \Delta \left(\frac{v}{c} \right) = \frac{c \Delta v - v \Delta c}{c^2} = 0$$

¹³ Il pourra nous arriver par la suite de parler de vitesse mesurée pour tel ou tel objet, parlant comme tout le monde, c'est à dire en oubliant les guillemets, et oubliant que v s'origine dans un rapport v/c avec la médiation d'un c_0 .

D'où l'on tire

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta c}{c}$$

Où les écarts s'écrivent $\Delta v = |v_a - v_{m'}|$ et $\Delta c = |c_0 - c_c|$ (en prenant les valeurs absolues) ; on a encore :

$$\Delta v \approx v_{m'} \frac{\alpha - 1}{\alpha}$$

La correction à apporter à $v_{m'}$ est proportionnelle à $v_{m'}$ et d'autant plus importante que $v_{m'}$ est grand (elle croît avec $v_{m'}$; relations entre ordres de grandeurs).

Notre travail propose une première approche ; dans cet esprit, les mesures de vitesses concernent la composante radiale longitudinale le long du trajet reliant l'observateur à l'objet. Nous ne regarderons pas les autres composantes transversales ; nous ne nous demanderons pas si c est parallèle à v , ni n'examinerons en détail toutes les hypothèses et corrections aboutissant aux valeurs $v_{m'}$ ou v_a . Nous nous intéresserons surtout à des étoiles et des galaxies lointaines, et non d'abord à des étoiles dans notre voie lactée : pour ces dernières la composante transversale de la vitesse pourrait être appréciée par des observations longues, sur plusieurs années, de la variation de la parallaxe (et ne pas être une unique vitesse radiale estimée par effet Doppler).

3. Le problème de la matière noire

Appuyons-nous sur les développements précédents pour examiner quelques problèmes cosmologiques contemporains. Ils affleurent dans les ouvrages universitaires, les livres de vulgarisation, les revues de culture scientifique, les sites internet (e.g. Wikipédia) et nous avons prolongé l'enquête par des articles originaux. Commençons par une des énigmes majeures, dont l'analyse va influencer tout le reste : la matière noire. Elle se « manifeste » dans des contextes différents.

3.1 Mouvements des étoiles dans les galaxies spirales et des galaxies dans les amas

Nous avons consulté des références générales telles Heyvaerts (2006), Alloin & Boischoat (2008), Bertone (2014), Combes (2015), Aubert (2019), Gasparini (2020), Courtois (2020). Les données citées par la suite en proviennent. Du fait de la richesse du sujet, nous nous contentons de réflexions préliminaires et d'ordres de grandeurs : les chiffres ne sont là qu'à titre indicatif

et provisoire. Si l'on veut résumer l'émergence de cette problématique, deux auteurs, Zwicky (1933) et Rubin (Rubin & Ford, 1970), ont eu un rôle de pionniers. Ils ont regardé, pour le premier, les vitesses des galaxies dans les amas de galaxies, et, pour la seconde, les vitesses des étoiles dans les galaxies spirales. Dans les deux cas, les estimations des valeurs se font par décalages Doppler. Différentes corrections sont nécessaires en fonction des angles supposés entre vitesses des astres et rayons à l'observateur : l'orientation idéale d'une galaxie est de 45° . Si on la voit dans sa surface, on ne détecte aucun mouvement d'étoile. Si on la voit par la tranche, les mouvements des étoiles à différentes distances du centre se superposent ; il y a confusion, surtout pour les parties internes plus denses. Il faut aussi tenir compte de la vitesse de récession des galaxies dans leur ensemble du fait de l'expansion de l'univers (à composer avec les mouvements particuliers participant à l'effet Doppler collectif : à l'intérieur d'une galaxie, ou d'un amas, certaines étoiles ou certaines galaxies s'enfuient de l'observateur, alors que d'autres se rapprochent). Enfin il peut y avoir des perturbations du signal de divers types dans le trajet jusqu'à l'observateur.

Moyennant ce travail d'acquisition des données, Zwicky et Rubin ont conclu tous deux que les vitesses observées étaient trop importantes par rapport à ce qui était attendu, c'est-à-dire par rapport à la masse estimée des objets en jeu (ce qui suppose un passage entre masse et vitesse, par utilisation des lois de Newton) compte-tenu de leur luminosité et d'un lien standard entre luminosité et masse¹⁴.

Mais précisément la question est de bien estimer les masses attendues, à faire intervenir pour comprendre les mouvements observés. Au début de ces recherches, la masse supposée manquante était très importante (Zwicky parle d'un facteur 100 par rapport à la masse visible) mais on a compris par la suite la grande quantité de gaz et de poussières présente et restée non vue. On pense aujourd'hui que la matière baryonique lumineuse (étoiles) ne représente qu'un quinzième de la masse baryonique totale ; gaz, et gaz diffus, à égalité, comptent pour les 14/15^{èmes} restant. Cela est établi grâce aux mesures des longueurs d'onde de la lumière non visible, en particulier la raie radio de 21 cm pour l'hydrogène ionisé HI, en quantité majoritaire dans les gaz (en plus des informations dans le proche infrarouge à $3.6 \mu\text{m}$). Les expressions *masse manquante*, ou *matière noire*, sont utilisées dorénavant pour la matière non baryonique (alors que dans les premiers textes, elles englobaient la masse baryonique non lumineuse).

¹⁴ Zwicky a utilisé le théorème du viriel reliant les moyennes des énergies potentielle (gravitation) et cinétique (vitesses). Les relations entre masse et luminosité sont soumises à précaution sur trois points : - elles incorporent les modèles d'univers tel le modèle Λ CDM (voir plus loin) et il y a risque de circularité ; - elles utilisent des données sur les types spectraux des étoiles et sur les étoiles doubles, dont les vitesses peuvent être mal estimées pour les raisons que nous discutons ; - elles utilisent des longueurs d'onde différentes de la lumière, et sont d'inégales valeurs, les meilleurs résultats étant obtenus dans le proche infra-rouge à $3.6 \mu\text{m}$.

Aujourd'hui on s'accorde à parler d'un ratio de l'ordre de 1 à 6 entre la matière baryonique et la matière noire, soit 17% de matière baryonique par rapport à la matière totale (baryonique + noire). Lorsque l'on s'intéresse à toutes les formes d'énergie de l'univers, on cite les trois chiffres : 5% (matière connue dite baryonique), 25% (matière noire) et 70% (énergie sombre dont nous parlerons plus loin) ; ces chiffres varient quelque peu suivant les auteurs.

Regardons de près les mouvements des étoiles et des gaz dans les galaxies spirales. Ils fournissent un bel exemple, permettant d'aller au cœur de notre proposition. Sur les figures 4 et 5, nous avons sélectionné quelques courbes issues des travaux de McGaugh (2014) et McGaugh *et al.* (2016). On y voit la variation des vitesses des étoiles, ou des gaz, en fonction de leur distance R au centre de la galaxie. On représente, pour chaque galaxie, d'une part les vitesses observées v_m (avec notre notation ; les courbes en pointillés résultent d'ajustements aux points des données), et d'autre part les vitesses attendues calculées v_a (courbes en traits pleins). Cela suppose que l'on a une connaissance suffisamment bonne de l'existence, la quantité et la répartition des masses du gaz, des étoiles et des poussières, agissant de façon gravitationnelle.

Nous avons choisi des galaxies où on l'on fait bien la distinction entre les deux courbes (vitesses mesurées / attendues) pour R petit, car d'une façon générale, ce n'est pas le cas : près du centre de la galaxie, les variations des vitesses sont grandes (pentes proches de la verticale ; à l'intérieur d'une distribution de masse de densité constante, la dérivée spatiale de la vitesse est en $R^{-1/2}$ et devient infinie à l'origine). Les deux courbes ont tendance à se confondre, et de petites imprécisions sur R se traduisent par de grandes imprécisions sur v . Par ailleurs les informations sur les petits R sont de qualité inférieure : - superpositions des signaux venant des étoiles à différentes distances du centre ; - brouillage des informations suivant l'inclinaison de la galaxie ; - difficultés du calcul de v_a , très sensible à la répartition spatiale des baryons (gaz et étoiles) dans les zones centrales ; - relation masse / luminosité moins bonne au centre (McGaugh *et al.*, *op. cit.*). Au total, les données y sont moins bonnes.

Les trois exemples choisis (Fig. 4 et 5) correspondent à une certaine variabilité des gammes de vitesses (10 à 150 km/s), et des amplitudes spatiales (quelques kpc à plusieurs dizaines de kpc) ; d'autres galaxies des données de McGaugh *et al.* s'éloignent encore de ces champs de valeurs

(distances au centre en dixièmes de kpc, vitesses jusqu'à 300 km/s). On peut faire sur les courbes deux séries de remarques.

1) Dans la partie correspondant à de faibles distances au centre de la galaxie, on observe une montée des vitesses selon des inclinaisons plus ou moins régulières (monotonie des montées des courbes en $R^{1/2}$). Pour une galaxie donnée et pour chaque abscisse R , le rapport α des vitesses lues sur les deux courbes (mesures / estimations, soit v_m/v_a) reste dans une fourchette étroite (rapport en gros constant), quelles que soient les valeurs des pentes et des vitesses. Pour les trois galaxies des figures 4 et 5 ce rapport est égal à 2,4 (galaxie DDO 154), 2,36 (NGC1560) et 1,7 (UGC 128), estimés de façon grossière par les rapports des segments AA''/AA' et BB''/BB' sur les figures (moyennes sur deux valeurs).

2) Après la montée des vitesses à partir du centre, on observe un plateau plus ou moins plat ou légèrement descendant (cela dépend de l'amplitude spatiale observée, sachant qu'on peut détecter aujourd'hui des mouvements de gaz en rotation notablement à l'extérieur de la galaxie visible). Ce plateau se branche sur le sommet des parties ascendantes décrites en 1). On garde également un ratio en gros constant entre v_m et v_a , alors qu'il concerne des valeurs absolues qui peuvent être différentes. Les mesures faites sur les figures donnent les valeurs de 2,35 (DDO 154), 2,3 (NGC1560), 2,4 (UGC 128) estimés encore de façon grossière par les rapports des segments CC''/CC' sur les figures. La comparaison des vitesses se lit plus facilement sur les paliers pour les grandes distances R aux centres des galaxies. Par contraste avec les données sur les étoiles centrales, le gaz périphérique est très fiable, avec un meilleur comportement de la vitesse. La vitesse du palier est parfois appelée v_f (f comme *flat*) : historiquement on a d'abord dit que cette vitesse ne suivait pas les lois de Newton, mais la forme de la courbe s'explique par la diminution, sans extinction, de la densité de matière pour des rayons croissants, le gaz prenant le relai des étoiles à l'extérieur de la galaxie visible.

Le comportement qualitatif de ces courbes est schématisé sur la figure 6. Insistons : c'est le même comportement c'est-à-dire le même v_m/v_a , pour les montées et pour les paliers. Le rapport se lit bien sur le palier, mais il est déjà tel avant. Sans souci de rigueur mathématique et statistique on peut faire des moyennes des vitesses lues sur les paliers en incluant les différentes galaxies discutées par McGaugh et McGaugh et al (op. cit.) soient NGC 7331 (1,7 km/s lue à 38 kpc), DDO 154 (2,4 km/s à 6 kpc), UGC 128 (2,4 à 55), NGC 6946 (1,7 à 18), NGC1560 (2,5 à 10), NGC7814 (2,7 à 25), NGC 6503 (2,6 à 20) et NGC3741 (4,5 à 7).

Sur ces quelques exemples (il faudrait certainement faire de véritables études statistiques sur de plus larges échantillons) on a un rapport α moyen entre 2.4 et 2.5¹⁵. Il correspond au rapport de matière noire/ matière baryonique de 6 à 1. En effet on rapporte les vitesses aux masses par la relation

$$\frac{m_{\text{mat}}}{m_a} = \left(\frac{v_{\text{mat}}}{v_a}\right)^2$$

qui se justifie en se rapportant aux lois de Newton reliant vitesses, masses et distances. Ainsi, la vitesse d'un corps (par exemple une planète) autour d'un astre de masse M et à une distance r est telle que

$$\frac{v^2}{r} = \frac{GM}{r^2}$$

Pour un même r, le rapport des masses est égal à celui des vitesses, élevé au carré¹⁶. Et $\alpha^2 = (2.4)^2 \approx 6$, proportion de masse semblant manquer.

Une corrélation produite par McGaugh *et al.* (2016) relie les potentiels gravitationnels g_a attendus à ceux mesurés g_m pour près de 3000 étoiles dans plus d'une centaine de galaxies (Fig. 7). Elle semble en contradiction avec nos résultats (figures précédentes). En effet s'il y a bien écart pour les faibles potentiels g entre valeur attendue et valeur mesurée (à relier aux écarts nets entre v_a et v_{mat} pour les grandes distances au centre des galaxies, ce sont les paliers), par contre pour les plus grandes valeurs des potentiels g (distances proches du centre), les valeurs g_a et g_m se rejoignent, alors que nous prétendons qu'il y a encore écart, au même niveau. Nous ne suivons pas l'interprétation des auteurs pour les forts potentiels g. En effet, à chaque fois que, de notre côté, nous avons pu voir les deux courbes v_a et v_{mat} de façon nette pour les faibles distances au centre, les rapports n'étaient pas quelconques mais respectaient la corrélation d'ensemble (proportionnalité entre Δv et v , cf. section 2.3). Ce n'est pas un hasard que cela ne marche pas : pour les zones proches du centre, les vitesses sont moins fiables alors que pour les grandes distances au centre, les relations entre vitesses restent certainement les plus sûres pour toute une série de raisons que nous avons indiquées. Nous nous permettons donc de lire la corrélation de McGaugh *et al.* de façon différente (Fig. 7) en indiquant un point figuré par une étoile pour la corrélation qui nous importe, à des valeurs de $\log(g_a)$ de -11,5 et de $\log(g_m)$ de -

¹⁵ Nous ne cherchons pas à affecter à tout prix au rapport α la valeur 2.4 ; c'est la valeur en correspondance avec la problématique de vitesses discutée ici, mais il faut laisser sa place à d'autres mécanismes invoqués par les auteurs qui peuvent contribuer à écarter les v_{mat} des v_a de différentes façons.

¹⁶ Signalons au passage la relation, de nature différente, de Tully-Fisher entre le v_f extérieur et la masse totale m de la galaxie, soit une proportionnalité entre m et v_f^4 .

10,7. L'écart des log est de 0.8, soit un ratio entre les g de $10^{0.8}$ dont la racine carrée $10^{0.4} = 2.5$ donne un ratio de vitesses égal à la valeur α précédente. Pour nous, cela vient élargir l'argumentation donnée dans les paragraphes précédents pour les galaxies que nous avons sélectionnées. *Malgré une certaine dispersion, la moyenne du paramètre α entre 2,4 et 2,5 nous paraît remarquable, autant pour les différentes distances au centre d'une même galaxie, que d'une galaxie à l'autre.*

Les auteurs ne se sont pas posés la question en termes d'un facteur α portant sur des vitesses, allant droit à leur but : discuter la question en termes de masses manquantes et de gravité, sans comparer en détail les deux vitesses $v_{m'}$ et v_a ni s'attarder outre mesure sur les nombreuses étapes intermédiaires dont nous avons parlé (détermination des proportions de gaz, poussière et étoiles, choix des hypothèses et des modèles reliant vitesses et masses, étude des répartitions de matière noire et matière baryonique). Il est symptomatique que McGaugh *et al.* aient exprimé leur corrélation en termes de potentiels gravitationnels et non en termes de vitesses (qui sont pourtant les premières mesurées) !

3.2. Ecriture de la valeur de c_c

En résumé, reprenons pour la matière noire ce que nous avons proposé de façon générale pour les notations dans la section 2.3. Les résultats précédents se rassemblent dans :

$$v_{m'} \approx 2.4v_a$$

Sans avoir eu un accès direct à $v_{m'}$, mais à un rapport v/c , interprété comme

$$r = \frac{v_{m'}}{c_0}$$

Où c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide. Mais on peut aussi écrire :

$$r = \frac{v_{m'}}{c_0} = \frac{v_{m'}/\alpha}{c_0/\alpha} = \frac{v_a}{c_c}$$

Où v_a est la valeur attendue et c_c la vitesse de la lumière dans son trajet depuis la galaxie, nous transmettant l'information sur les vitesses des étoiles en son sein. Ceci nous conduit à la valeur de c_c par rapport à c_0 selon

$$c_c = c_0 / \alpha \approx c_0 / 2.4$$

Nous sommes ainsi amenés à postuler une vitesse que nous appellerons cosmologique, à travers l'univers dans son ensemble ; elle nous apporte la valeur v_m , que nous pensons être v_a avec nos étalons habituels.

3.3. Les mirages gravitationnels

Un mirage gravitationnel (on parle aussi d'effet de lentille gravitationnelle) montre le déplacement de l'image d'un objet distant dans une direction qui n'est pas sa « vraie » direction ; il peut aussi entraîner sa déformation, parfois sa multiplication. Il résulte de l'interaction avec un objet massif (une étoile, une galaxie, un amas de galaxies) interposé entre l'objet distant et l'observateur (Fig. 8). La théorie de cet effet est bien assurée et fait appel à la relativité générale. Son amplitude est considérée par beaucoup comme une preuve de l'existence de matière noire. On trouve une variété d'observations, mesures, théories, suivant la taille et la forme de l'objet interposé, la géométrie de l'ensemble du dispositif (on distingue en particulier les effets de *micro-*, *weak* et *strong lensing*). Nous retiendrons pour notre discussion que l'angle manifestant l'effet du mirage gravitationnel (voir la figure) vérifie la formule suivante (e.g. Gasparini, 2020 ; Claeskens, 2003) :

$$\theta = \frac{4GM}{dc^2}$$

où M est la masse déviante, d la distance à la masse M du rayon lumineux transportant l'image de l'objet observé, G la constante de la gravitation et c la vitesse de la lumière dans le vide (soit notre c_0 ; un raisonnement classique à la Newton donne la même relation avec un facteur 2 au lieu de 4).

D'après les auteurs, les angles de déflexion θ ne sont pas en correspondance avec les masses M observées : ils sont trop grands. Ils mettent en évidence des excès de masse, mis sur le compte d'une matière noire invisible, dans des proportions semblables à celles postulées dans d'autres situations par rapport à la matière baryonique (environ 6 fois plus).

Reprenant la formule donnée à l'instant, nous pouvons proposer une autre interprétation. En effet, si nous diminuons la valeur de c dans la proportion indiquée plus haut (un facteur α de l'ordre de 2,4) nous voyons que, toutes choses par ailleurs, la masse M respectant la même valeur de l'angle θ sera divisée par α^2 , c'est-à-dire par un facteur voisin de 6. Nous faisons cela, si, par rapport à nos étalons locaux, l'affectation de telle valeur à M nous paraît aberrante. *Ainsi le besoin de matière noire disparaît.* Voilà une situation où il n'y a pas de mouvement d'objet

à une vitesse v qu'il faudrait déterminer. La grandeur discutée est ici un angle : *notre approche semble ainsi confortée par la résolution de deux problèmes distincts* (une vitesse d'un côté, un angle de l'autre¹⁷), avec l'adoption d'une même valeur de c , soit c_c .

On n'est pas ici dans la comparaison de ratios v/c ; mais la réflexion générale sur les vitesses nous encourage à modifier c toute seule dans les équations (ce qui revient à changer c par rapport à c_0 , et indirectement par rapport à d'autres v). Nous serons amené à le faire dans des situations où nous avons tendance à oublier que c renvoie à une propagation, et n'est pas seulement une constante de structure. Cela permet de faire jouer les équations dans des conditions où la vitesse de la lumière (qui guide tout le reste, non seulement pour la mesure mais pour les mécanismes physiques) peut être différente et, par exemple inférieure, à c_0 . On pense à des situations où l'on fait intervenir les équations de la relativité générale dans le milieu cosmologique qui n'est pas vide à son échelle, ou dans des milieux très denses dans notre sens habituel. Dans ces nouveaux contextes, ce sont les évolutions qui vont changer de cinétique par rapport à nos jauges courantes (voir plus bas les sections sur l'énergie sombre et l'inflation).

3.4. Discussion : les multiples lieux de « présence » de matière noire

La littérature portant sur les lieux où l'on postule l'existence de matière noire est très abondante ; nous ne l'avons qu'effleurée. Elle concerne la grande variété des types de galaxies (elliptiques, spirales, diffuses, ultra-diffuses, jeunes ou vieilles, grosses ou petites, massives ou non) et leurs groupements (en amas, superamas, filaments ; en collision...) avec, pour chacun, des comportements propres des étoiles / galaxies en fonction de la position et de la répartition des masses. Pour chacun des cas, la discussion porte non seulement sur l'existence de la matière noire, mais aussi sur sa distribution : halos plus ou moins importants / fragmentés, englobant les galaxies ou nichés en leur sein, variations suivant la distance au centre de la galaxie ou de l'amas, etc. Pour les galaxies elliptiques, non stabilisées par la rotation, mais par la pression, la matière noire serait moins abondante. Peut-on comprendre cela par l'inférence inspirée par notre approche : moins de mouvement → moins d'erreur sur le mouvement → moins de matière noire ?

Dans toutes les situations évoquées ici, on ne « lit » pas directement les vitesses, ni les masses présentes ou manquantes : comme nous l'avons dit, un travail est nécessaire pour acquérir les données (sur un spectre de longueurs d'ondes et d'objets), avec tous les aménagements utiles compte-tenu de la complexité des objets étudiés, les biais observationnels (nuages de gaz ; effets de lentilles gravitationnelles, en particulier pour les galaxies ou amas lointains). Les modèles interviennent : hypothèses théoriques, simulations et observations sont intriquées dans la marche itérative vers les vitesses supposées anormales. Les perturbations par les bras dans les galaxies spirales, altèrent la bonne circularité des mouvements des étoiles. Au total, on comprendra la nécessité d'approches statistiques. L'angle d'attaque que nous proposons permet-il de discuter ces nombreux cas ? Chacun mériterait un examen spécifique que nous laissons de côté pour l'instant. Nous devons souvent faire face à des échafaudages complexes : la matière noire déterminée à l'étape n pour l'objet O_n est prise pour acquise à l'étape suivante $n + 1$ portant sur les objets O_{n+1} englobant les O_n . Il est difficile ensuite de tout démonter si on ne connaît pas les secrets de fabrication des O_n ¹⁸. Il semblerait qu'en moyenne, on retrouve une

¹⁷ On pouvait s'étonner que la déflexion angulaire donne en gros le même pourcentage de matière noire que les courbes de rotation des galaxies ? Les cadres théoriques explicatifs sont différents : la vitesse des étoiles renvoie à la théorie newtonienne, les mirages gravitationnels à la relativité générale, qui englobe certes la première.

¹⁸ Cela peut-il expliquer les problèmes de conservation de matière noire posés par l'amas dit du Boulet ? La collision de deux galaxies fait apparaître de nouveaux mirages gravitationnels qui semblent rajouter de la matière noire par rapport à celle qui était initialement dans chacune des deux galaxies.

stabilité de la proportion de masse noire manquante par rapport à masse baryonique (facteur de 6 à 1) et cela va dans le sens de conforter notre hypothèse.

Le cas de notre Voie lactée mérite un arrêt. La matière noire y est aussi postulée à partir de l'étude des mirages gravitationnels et du mouvement des étoiles, déterminé par effet Doppler ; leur mouvement vertical, perpendiculaire au plan galactique, est observable seulement par cette méthode. Quelques mesures de vitesses proviennent de l'observation de la variation de la position d'étoiles (mesurée par la parallaxe) sur de longues durées (plusieurs années). Il serait intéressant de se demander si cette autre méthode demande l'existence de matière noire. Le ralentissement de la barre de la Voie lactée (Chiba & Schönrich, 2021) fait aussi apparaître la nécessité de matière noire : si les différentes vitesses des étoiles sont divisées par un facteur α , c'est le contraste des vitesses (caractérisant le ralentissement de la barre) qui est divisé par le même facteur. Cet amoindrissement pourrait-il éviter le recours à de la matière noire ?

Alors que certains sont convaincus de l'existence de la matière noire et cherchent les particules qui pourraient lui correspondre (des travaux de physique visent à une modification du modèle standard et la détection de nouvelles particules, dans un cadre dit de supersymétrie, Bertone, 2014), d'autres proposent de modifier les lois de la gravitation (modèle MOND¹⁹, Milgrom, 2002 ; Beckenstein, 2009 ; Sus, 2014 ; Borka *et al.*, 2016). Pour Buchert (2012) la courbure et l'existence de larges vides dans l'univers seraient responsables des effets attribués à la matière noire, tandis que Maeder (2017a et b) propose une hypothèse d'invariance d'échelle.

Nombreux soulignent les caractères problématiques de la matière noire et les situations qui ne manquent pas de poser question : - elle se manifeste par ses effets gravitationnels, mais elle n'interagit pas avec la matière baryonique, ni avec elle-même ; - elle est corrélée à la matière ordinaire dans de très nombreuses galaxies (McGaugh *et al.*, op. cit.) ; - elle semble capricieuse, tantôt surabondante, tantôt quasiment absente (cela infirme-t-il notre hypothèse ? ou relève de la difficulté à séparer v_m et v_a pour les plus grandes vitesses, et/ou l'absence de gaz permettant une bonne discrimination ?) ; - elle peut être corrélée à l'âge des objets ; - des effets surprenants sont observés dans son apparition ou disparition, dans les pertes de symétries observées lors de certaines transformations ; - son comportement au cours du temps et en fonction des éloignements relatifs dans les amas de galaxies est difficile à expliquer compte-tenu de ce que l'on suppose par ailleurs pour elle (Aubert, 2018) ; - la question de sa production et son annihilation se pose au cours de l'histoire de l'univers ; - la question de sa répartition dans l'espace est rendue délicate par le jeu même des forces de gravitation : forces à longue distance, on positionne la matière noire là où elle ne joue pas ; caractère intégrant : une infinité de distributions spatiales est possible pour un même effet gravitationnel (des hypothèses supplémentaires doivent être posées pour choisir la plus raisonnable). Certains auteurs ne font pas mystère de leur embarras et se posent la question de l'existence même de la matière noire. Nous reviendrons dans la section suivante sur la matière noire impliquée dans le comportement du CMB (*cosmic microwave background radiation*).

En conclusion de cette étape sur la matière noire, nous soulignerons la belle homothétie entre les courbes de vitesses d'étoiles, mesurées d'une part, attendues d'autre part, dans maintes galaxies. Le rapport α n'est pas seulement une moyenne de données dispersées, il se maintient tout au long de courbes particulières, observées sur les étoiles et gaz extérieurs, et a la même valeur pour de très nombreuses galaxies. Cet ajustement est un peu fort pour la matière noire, réputée ne pas interagir avec la matière ordinaire ! Il y a quelque chose de constant, qui n'est pas l'effet du hasard, derrière cette variété d'observations. Sur cette base, il nous semble que nous sommes devant un artefact, et non devant le problème d'une masse manquante à chercher. Cette hypothèse est prolongée et confortée par son bon fonctionnement dans le cas des mirages gravitationnels et d'autres situations. Cela rejoint les travaux qui soulignent les corrélations entre matière noire et matière baryonique. Dans ces conditions nous sommes amenés à dire : si

¹⁹ Remarquons que le plateau de vitesses dans les galaxies, pour les faibles potentiels gravitationnels, peut s'expliquer par une loi particulière, dans un cadre classique, de la densité en fonction de la distance au centre.

cet effet de vitesses mal estimées joue effectivement dans telles situations, *il va inévitablement se manifester dans toutes les autres où des mouvements sont en jeu* (expansion de l'univers, énergie sombre, tension de Hubble, etc.). Nous allons les examiner dans les sections suivantes, après une partie encore consacrée à la matière noire.

4. Le fond diffus cosmologique et la matière noire

Les travaux sur le fond diffus cosmologique ou CMB (*cosmic microwave background radiation*) font appel à une physique complexe dans laquelle nous sommes peu rentrés, aussi nous contenterons-nous de formuler quelques remarques. Le CMB est la relique du rayonnement émis par l'horizon dense et chaud, au moment où les photons peuvent s'en libérer et l'univers devenir transparent (voir les ouvrages généraux cités en début de section 3.1, et Rosset, 2003). A son origine le rayonnement a une température de l'ordre de 3000 K, mais l'expansion de l'univers le ramène aujourd'hui à une valeur estimée à 3 K. L'étude du CMB fait intervenir des vitesses, combinées à des températures et des densités. Avec lui, nous sommes projetés aux débuts de l'histoire de l'univers ; ceux-ci se distinguent par une grande densité, par des interactions spécifiques entre matière et rayonnement, à l'intérieur d'un plasma où électrons et protons sont dissociés. C'est la période dite précédant la recombinaison, qui se connecte à l'histoire plus récente de l'univers (dynamique des galaxies). Les caractéristiques de cet état précoce interviennent lorsque l'on s'interroge sur les propriétés d'homogénéité de l'univers tel qu'observé aujourd'hui. Les fluctuations observées dans le CMB permettent de prévoir les différentes structures, en galaxies, amas, superamas, filaments, etc. On parle d'*horizon* pour le mur opaque sur lequel on butte en remontant vers le passé, atteignant un état de l'univers qui ne laissait pas passer la lumière (âge estimé à 380 000 années après le big-bang).

Le rayonnement du CMB est celui d'un corps noir, c'est-à-dire que le spectre de longueurs d'ondes émis est une fonction uniquement de la température. On constate de très faibles fluctuations de température (déterminées par les longueurs d'onde de la lumière dans le contexte du rayonnement du corps noir) de l'ordre relatif de 10^{-5} . Le satellite Planck a permis de les cartographier. Ces fluctuations sont mises en relation avec des fluctuations de densité, via la propagation d'ondes acoustiques dans le plasma dense de l'horizon. On démontre la relation reliant les fluctuations de température et de densité (Aubert, 2019) :

$$\frac{\delta T}{T} = -\frac{1}{6} \frac{\delta \rho}{\rho}$$

Où T est la température et ρ la densité de matière (comprenant *a priori* la matière noire et la matière baryonique). D'après les auteurs, la bonne compréhension quantitative de cette physique (ondes acoustiques, couplage avec l'équilibre thermique, liens entre température et densité) demande l'intervention de matière noire. Avons-nous notre mot à dire ? L'horizon CMB d'où provient le rayonnement à 3K fuit de l'observateur à cause de l'expansion de l'univers. Pour tracer la carte des températures, il faut tenir compte de la vitesse de fuite, déduite de l'effet Doppler (pour un z de l'ordre de 1100). Si nos raisonnements sont bons, nous pouvons imaginer que l'on a exagéré la vitesse de fuite ; or cette vitesse décale tout vers le rouge, c'est-à-dire abaisse les températures des corps noirs. Par contre le δT reste le même (c'est une différence, les deux bornes de l'intervalle sont décalées autant l'une que l'autre par l'expansion). Donc, à rouge égal, en diminuant la vitesse de fuite qui aurait été exagérée, nous augmentons le rouge thermique, c'est-à-dire nous diminuons la température. Nous augmentons le rapport $\delta T / T$; la relation précédente nous montre que *nous augmentons alors la valeur absolue de la fluctuation de densité sans besoin de matière noire additionnelle.*

Mais la question précédente ne reflète que l'un des nombreux aspects relatifs au CMB et que nous n'avons pas explorés suffisamment. En particulier celui des corrélations spatiales et spectres de puissance. Il y a aussi la question de la chronologie de l'intervention de la matière noire par rapport à la matière baryonique. La matière noire est insensible à l'interaction électromagnétique, elle n'interagit pas avec les charges dans le plasma (matière ionisée) : elle n'est pas affectée par les ondes acoustiques. Elle peut former des grumeaux qui vont ensuite attirer la matière baryonique : ce seront les germes de structures galactiques. Les auteurs estiment que lesdites structures n'auraient pas le temps de se former (compte-tenu de l'âge qu'on leur affecte) si la matière noire n'en avait pas initié la naissance. Comme nous le verrons (section suivante), nous aurons tendance à rallonger la chronologie de l'univers : ce vieillissement évite-t-il le recours à de la matière noire de ce point de vue ?

Dans la mesure où les auteurs pensent que, pour ces diverses questions, la proportion de matière noire est encore supérieure d'un facteur 6 à la matière baryonique, nous sommes confortés quant à un écart de vitesses d'un facteur $(6)^{1/2}$ influençant le jeu des températures, paramètre guide des phénomènes se déroulant dans le CMB.

5. Modèles et évolution de l'univers

Il est une classe importante de vitesses sur lesquelles exercer notre discernement : ce sont celles de récession des galaxies. Elles vont nous orienter vers le big-bang et l'expansion de l'univers,

et nous permettre de tracer toute une histoire. Comme ailleurs, modèles et mesures sont intriqués. Faisons une halte sur les équations utilisées, occasion de définir les paramètres utiles.

5.1. Modèle d'expansion

Les équations de la relativité générale sont résolues sous l'hypothèse cosmologique (univers homogène et isotrope). On utilise le plus souvent la métrique co-mobile FLRW (Friedmann, Lemaître, Robertson, Walker), où l'on peut envisager des distances constantes entre des points malgré l'expansion. L'univers est décrit comme un gaz, ou fluide, de galaxies, muni d'une densité et d'une pression, caractérisé par le facteur d'échelle a . Ce dernier, sans dimension, exprime l'extension spatiale de l'univers rapportée à son état actuel ($a = a_0 = 1$) ; a croît au cours du temps t du fait de l'expansion ($a = 0$ au début du big-bang). On définit un temps cosmique t à l'échelle de l'univers : c'est le temps propre d'un observateur d'un univers homogène et isotrope en expansion par la métrique FLRW. Il est le même pour tous les observateurs. Dans ce cadre, la constante de Hubble est définie par

$$H = \frac{1}{a} \frac{da}{dt}$$

Notée H_0 pour sa valeur actuelle, c'est un paramètre central de la modélisation de l'expansion de l'univers. Il est à la jointure entre les observations et les modèles régissant le facteur a . Comme loi « pratique », son autre expression est $H = dv/dr$, ou, en linéarisant, $v = H.r$ qui énonce la loi dite de Hubble. Elle donne la variation de la vitesse v d'éloignement des galaxies en fonction de la variation de leur distance r à l'observateur : on l'exprime en différentes unités, le plus souvent en kilomètres par seconde et par mégaparsec, km/s/Mpc ($1 \text{ Mpc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ années-lumière} \approx 3,08 \cdot 10^{22} \text{ m}$).

L'emploi de la loi de Hubble permet une utile approche d'ordres de grandeurs de paramètres cosmologiques (vitesses, distances, âge de l'univers...) mais il ne s'agit que d'une première approximation (Taillet et al., 2013) : elle convient pour des objets non trop proches de l'observateur (leurs vitesses pourraient ne pas être uniquement de récession), ni trop loin (l'expansion viendrait alors troubler la notion de distance, Lachièze-Rey, 2020). Elle fonctionne comme si l'univers était statique et que l'on pouvait utiliser les chandelles standard de façon directe (détermination des distances) sans correction spéciale.

On distingue différentes densités volumiques d'énergies : - énergie de masse (que l'on peut séparer en matière baryonique et matière noire froide ou CDM, *cold dark matter*), - énergie de rayonnement, - énergie du vide (pour l'éventuelle énergie sombre ; on la désigne aussi par le symbole Λ , soit la constante cosmologique, en rendant compte d'une autre façon), - énergie associée à la courbure. Le modèle d'expansion connu sous les initiales Λ CDM regroupe les choix concernant la constante Λ et la matière noire. On trouve dans la littérature des formulations un peu différentes des équations différentielles régissant l'évolution $a(t)$; par exemple (Gasparini, 2020) :

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \left(\frac{\rho_{m0}}{a^3} + \frac{\rho_{r0}}{a^4}\right) + \frac{\Lambda}{3} - \frac{c^2}{a^2} k$$

Où ρ_m et ρ_r sont des densités de matière m et de rayonnement r , l'indice 0 désigne l'instant présent, G la constante de gravitation et c celle c_0 de la lumière ; Λ est la constante cosmologique reliée à la densité correspondante ρ_Λ par la relation $8\pi G\rho_\Lambda = \Lambda$, et k est la courbure.

A partir des densités, on définit des *paramètres cosmologiques* Ω_m ($\Omega_b + \Omega_{\text{cdm}}$), Ω_r , Ω_v , appelée aussi Ω_Λ , Ω_k . On rapporte pour cela les ρ à la densité critique ρ_c (régissant le fait que l'univers va continuer son expansion ou au contraire amorcer une contraction). Les correspondances entre densités et paramètres cosmologiques sont les suivantes

$$\Omega_m = \rho_{m0}/\rho_c, \quad \Omega_r = \rho_{r0}/\rho_c, \quad \Omega_\Lambda = \rho_\Lambda/\rho_c, \quad \Omega_k = \rho_k/\rho_c,$$

avec $\Omega_k = -k/a_0^2 H_0^2$ et $\Omega_\Lambda = \Lambda/3H_0^2$. A partir de là on écrit une équation pour les paramètres cosmologiques (Moore, 2014):

$$\left(\frac{1}{H_0} \frac{da}{dt}\right)^2 = \Omega_k + \frac{\Omega_m}{a} + \frac{\Omega_r}{a^2} + \Omega_v a^2$$

Suivant les valeurs des différents paramètres, divers scénarii sont prévus pour l'expansion de l'univers au cours du temps et son histoire²⁰. La proportion de 70% annoncée pour l'énergie sombre par rapport à la matière (baryonique et noire) correspond au rapport $\Omega_\Lambda / (\Omega_b + \Omega_{\text{cdm}})$.

5.2. Evolution de l'univers

Quelles propositions sur la chronologie cosmique pouvons-nous faire dans le contexte où nous nous situons ? L'histoire de l'univers telle qu'elle est racontée est construite sous forme de deux morceaux reliés l'un à l'autre.

1) Le premier part d'aujourd'hui et remonte dans le passé : l'éloignement observé des galaxies dans l'expansion nous invite à dérouler le film à l'envers et retrouver une singularité fondatrice. Nous le faisons en utilisant la loi de Hubble, où la valeur de la constante H est instruite par les mesures de vitesses de récession des galaxies en fonction de leurs distances. Les vitesses sont évaluées par les décalages Doppler. Les distances proches peuvent être estimées par les effets de parallaxe ; plus généralement, celles plus lointaines par l'observation d'étoiles dont on connaît les luminosités intrinsèques (« chandelles standard » des Céphéides ou des supernovae de type 1a). La baisse des flux lumineux selon des lois en $1/r^2$ permet d'accéder aux distances (les valeurs de r sont rapportées à nos étalons locaux). C'est ce qui conduit aujourd'hui à des valeurs de H de 70 km/s/Mpc (prenons cette valeur « moyenne », voir section 7), d'où en inversant par $t = H^{-1}$ on déduit un âge de 13,8 milliards d'années (durée entre la singularité initiale et maintenant). Les observations fines sur les vitesses de récession en fonction des distances suggèrent une accélération récente de l'expansion (faisant parler d'énergie sombre que nous évoquerons dans la section 6).

Pouvons-nous modifier ce scénario d'un point de vue quantitatif ? La constante de Hubble fait intervenir des distances et des vitesses. Pour ce qui concerne les distances, nous ne changeons *a priori* rien aux mesures faites, elles renvoient aux étalons de distances sur lesquels nous nous appuyons d'habitude. Par contre, dans la suite des considérations précédentes, nous sommes tentés de diviser les vitesses d'un facteur α (que nous avons évalué voisin de 2,4). On conviendra alors que, si l'on divise par α la vitesse de récession de telle galaxie située à une distance r, et si on divise par le même facteur α la vitesse d'une autre galaxie un peu plus loin

²⁰ On voit sur l'équation que, suivant la valeur de a, différents régimes sont observés : pour a petit, l'énergie de rayonnement domine, puis c'est la matière, la courbure et enfin le vide.

à la distance $r + \Delta r$ (sous l'approximation 'statique' indiquée ci-dessus), la constante de Hubble évaluée initialement à une valeur H sera aussi divisée par le même facteur. On a en effet

$$H = \frac{v(r+\Delta r) - v(r)}{\Delta r}$$

Et donc

$$\frac{1}{\Delta r} \left(\frac{v(r+\Delta r)}{\alpha} - \frac{v(r)}{\alpha} \right) = \frac{H}{\alpha} = H'$$

Appelant H' la valeur modifiée. Dit autrement, c'est l'ensemble du diagramme de Hubble qui pivote vers de plus faibles valeurs (voir Fig. 9). Ce basculement se comprend comme celui reliant les deux courbes des vitesses, mesurées et calculées, pour les étoiles en fonction de la distance au centre de leur galaxie (cf. Fig. 5, 6 et 7 : Δv proportionnel à v). A partir d'une nouvelle valeur de H soit $H' = H/\alpha$, on déduit par inversion un âge de l'univers multiplié par α . Soit $13,8 \times 2,4 = 33$ milliards d'années²¹.

On retrouve ce résultat à partir d'une relation entre la constante de Hubble H et la densité ρ de matière (Friedmann), ne prenant en compte que la matière, et non les autres facteurs, soit qu'ils n'opèrent plus au stade actuel (rayonnement), soit qu'on les pense négligeables (énergie sombre, courbure). On a :

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

D'où

$$\left(\frac{H'}{H}\right)^2 = \frac{\rho'}{\rho}$$

Ainsi, si on divise ρ par 6 (pour ne pas tenir compte d'une éventuelle matière noire qui vaut six fois la matière baryonique en masse), on divise H par 2.4, on multiplie alors l'âge $t = H^{-1}$ de l'univers par 2.4. *Le résultat sur le lien (H, ρ) est cohérent avec le précédent, différent, qui portait sur le lien $(H, vitesses)$.*

2) Le second (le premier dans le bon sens du temps) morceau de l'histoire cosmique n'est pas « directement » observé. Il est reconstitué par les modèles pour les 380 000 premières années avant l'époque de la libération des photons dans un univers devenu transparent. Par rapport aux 13, 8 milliards, il ne se rajoute pas, son poids relatif est négligeable. Si nous modifions les modèles dans le sens indiqué précédemment, il est possible que l'on multiplie aussi la durée de ce morceau de 380 000 ans par un facteur 2.4, ce qui ne changera pas fondamentalement la

²¹ Le mode grammatical indicatif est utilisé dans cette section, le mode conditionnel *serait* évidemment préférable.

situation relative au nouvel âge estimé à l'instant de 33 milliards d'années. La période initiale est subdivisée en différentes parties, plus ou moins longues, y compris celle extrêmement brève de l'inflation (section 8). On rappelle sur la figure 10 les grandes étapes distinguées aujourd'hui. La figure 11 montre l'évolution de l'univers proposée en la comparant avec l'image actuelle et son âge « court », avec une accélération récente de la vitesse d'expansion (nous ne nous prononçons pas pour l'instant sur l'accélération que nous ne conjecturons pas ; voir section 6).

5.3. L'âge des étoiles

Une autre façon de contraindre l'âge de l'univers se fait en regardant l'âge des étoiles les plus vieilles. Leur durée de formation est évaluée par des hypothèses sur la cinétique des réactions nucléaires et des transferts en leur sein ; elle renvoie *a priori* à une physique indépendante de l'évolution « extérieure » de l'univers, elle qui affecte les mouvements relatifs des étoiles, l'éloignement des galaxies, etc. Elle n'est pas non plus directement auscultée par des mesures spectroscopiques de type v/c . Les auteurs estiment que les âges des plus anciennes étoiles sont conformes aux 13,8 milliards d'années de l'univers estimés par l'inversion de la loi de Hubble. L'âge des étoiles est-il cependant discutable ? Nous pouvons en effet calibrer les différentes réactions en leur sein avec une constante de structure c très petite devant c_0 , lui donnant une signification de vitesse étalon à laquelle tout rapporter. *Nous pourrions alors rallonger de façon significative leur tempo d'évolution, tout en respectant la logique des modèles actuels.*

Il y a toutefois quelques « contrôles » extérieurs sur l'âge des étoiles : ils reposent sur les modèles d'évolution des ratios masses / luminosités / couleurs (températures). En tenant compte du facteur α , de possibles corrections sur les changements de couleur pourraient intervenir ; mais c'est *a priori* à regarder à chaque cas, car il n'y a pas de loi simple et unique se ramenant à deux paramètres (couleur, âge). Il reste que les étoiles rouges sont en moyenne plus vieilles que les étoiles bleues (Pailler, 2022). Du fait de l'exagération éventuelle du décalage vers le rouge (facteur α), à rouge égal, en corrigeant, on diminue le rouge de la récession et on augmente celui de l'âge : si l'on suit ce raisonnement, *les étoiles seraient plus vieilles que l'on ne pense*, et cela ferait bon ménage avec un univers plus vieux ? Il y a aussi des contraintes observationnelles sur la fin de vie des étoiles, possiblement marquées, pour les plus grosses, par des éclats lumineux spécifiques ; l'étude des familles d'étoiles dans les amas peut également donner des idées sur la question des âges, mais nous laisserons pour l'instant de côté ces voies de recherche.

5.4. Un univers plus vieux ?

Si donc on admet un univers plus vieux, avec un âge de quelques 33 milliards d'années, c'est l'ensemble des dates des différents événements qu'il faut vieillir et décaler en proportion. Il nous semble que cela ne change pas la succession telle qu'établie par les physiciens. L'estimation des âges et des durées ne repose en effet pas uniquement sur des données de *redshift* qui imposeraient tout. Elle est autant attachée à des modèles (relativité générale, équations d'expansion dans le cadre de l'hypothèse d'homogénéité, métrique FLRW...) comme le rappelle Uzan (2022) avec des circularités (en particulier sur la valeur c_0) dont on n'a pas forcément toujours conscience. Peut-on proposer une meilleure circularité avec une valeur c_c pour l'étude des événements distants ? Cela pourrait-il soulager diverses difficultés rencontrées dans nos lectures, comme le problème d'étoiles ou galaxies plus vieilles que l'univers ? Certaines théories (abandonnées ?) avaient en effet estimé des temps de formation d'étoiles à quelques 25 milliards d'années ? Le temps de formation des trous noirs hypermassifs qui se montrent tôt dans l'histoire de l'univers pose aujourd'hui problème aux astronomes et astrophysiciens. La compréhension serait-elle davantage plausible si l'on donnait plus de temps à l'univers ?

6. Un chantier, 1. Le problème de l'énergie sombre

Les problèmes abordés dans la présente section et la suivante (6 et 7) reposent encore sur l'évaluation de vitesses qu'il convient d'inspecter : le premier à propos du régime accéléré de l'expansion cosmique, le second à propos de la constante de Hubble. Leurs solutions doivent être compatibles avec l'histoire d'ensemble de l'univers. Dans la mesure où nous venons d'en proposer une révision significative, il faut envisager, pour les discours correspondants, de sérieuses modifications. Ainsi, ce qui suit a d'abord valeur apophatique, se bornant à dire que les développements les plus courants ne sont plus d'actualité. Des rappels et des pistes seront formulés toutefois, replaçant les choses dans le contexte général de nos propositions. Regardons comment se présente le problème de l'énergie sombre.

L'énergie sombre (*dark energy*), appelée aussi énergie noire, est mise en évidence par l'excès de la vitesse d'expansion de l'univers par rapport à celle prédite par la modélisation : on parle d'accélération. Cet excès se manifeste pour des périodes récentes, depuis 5 milliards d'années, c'est-à-dire à partir d'un âge de l'univers égal à quelques 8 milliards d'années. Gasparini (2020)

rappelle les résultats du *Supernovae cosmology project* : on représente la distance de luminosité de Supernovae Ia en fonction du *redshift* et l'on compare les observations à des modélisations d'univers décélérés, sans énergie noire. Les supernovae les moins brillantes, donc les plus lointaines, sont moins lumineuses que les prévisions pour un univers normalement décéléré. La distance à laquelle elles se trouvent est plus grande que prévu, ce qui manifeste un univers en expansion accélérée. Pour l'accommoder, les théoriciens introduisent dans les équations d'évolution (voir section précédente) une densité Ω_v (l'indice v signifie « vide » ; on parle aussi de Ω_Λ où Λ est la constante cosmologique). Ce terme manifeste une énergie répulsive (l'énergie sombre) qui correspondrait à une quantité « manquante » d'environ 70% de l'énergie de l'univers, calculée en fonction des poids respectifs des Ω_i dans l'équation d'évolution.

Nous devons remettre l'ouvrage sur le métier. Il conviendrait ainsi de refaire les simulations avec un facteur Ω_v (Ω_Λ) nul, et $\Omega_m = 1$, sachant que toutes les vitesses observées qui contraignent le modèle (y compris c lorsqu'elle est seule), seraient divisées par un facteur α (voisin de 2,4). Il est difficile pour l'instant d'évaluer les remèdes pour l'accélération supposée factice, dans la mesure où les choix des paramètres du modèle faits en amont sont intriqués avec les observations : grâce au bouclage, on retombe sur ses pieds ! C'est donc l'ensemble du calcul qu'il faudra reprendre avec des valeurs différentes de H et en supposant que l'on se passe à la fois d'énergie sombre et de matière noire.

Une voie peut toutefois montrer dès maintenant une contribution potentielle de notre approche. Elle profite des travaux des auteurs sur la constante cosmologique dans l'équation d'Einstein, qui, selon eux, accommode la question. L'équation d'Einstein est de toute façon la source de toutes les modélisations de l'expansion de l'univers. Dans sa version initiale sans constante cosmologique, elle s'écrit :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

On y relie les paramètres géométriques de métrique g et courbure R (à gauche du signe égal) au contenu énergétique (tenseur d'énergie-impulsion T, à droite). En rajoutant un terme au membre de gauche, faisant intervenir la constante cosmologique Λ , on montre qu'une force répulsive se manifeste qui accommode l'expansion accélérée :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Nous pouvons proposer une autre solution, en remarquant que le facteur c intervient explicitement au dénominateur du facteur de droite. Si nous pensons que, à l'échelle cosmique

où les problèmes se posent, nous devons diviser c par un facteur α , nous voyons que nous commettons une erreur d'un facteur $\alpha^4 - 1$ selon :

$$\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} = \alpha^4 \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - (\alpha^4 - 1) \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

En effet, il faudrait, selon notre analyse, prendre seulement le premier terme du second membre de l'équation ci-dessus, qui s'écrit aussi :

$$\alpha^4 \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + (\alpha^4 - 1) \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Ce qui montre que, prenant seulement le terme en α^4 , nous devons corriger le terme habituel en ajoutant le facteur $(\alpha^4 - 1) \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$. Le tenseur d'impulsion-énergie est concerné : écrivons deux exposants pour différencier le terme standard renvoyant à la matière habituelle m , et le terme correctif désigné par Λ , nous pouvons écrire alors

$$T_{\mu\nu}^{(\Lambda)} = (\alpha^4 - 1) T_{\mu\nu}^{(m)}$$

Sans souci de rigueur de parole, nous pouvons dire que le tenseur d'énergie impulsion que nous devons rajouter est plus grand que le tenseur d'énergie impulsion habituel d'un facteur $\alpha^4 - 1$. Cela se manifeste par des énergies de masses, ou encore des densités massiques, dans le même rapport. Si nous prenons α voisin de 2.4, le facteur $\alpha^4 - 1$ est voisin de 35.

Nous nous attendons ainsi que

$$\rho_{\Lambda} = (\alpha^4 - 1) \rho_m$$

soit environ $\rho_{\Lambda} \approx 35\rho_m$. En prenant ρ_m de l'ordre de $3 \cdot 10^{-31} \text{g/cm}^3$ (Gasparini, 2020), on est amené à proposer $\rho_{\Lambda} \approx 35 \times 3 \cdot 10^{-31} \text{g/cm}^3 = 1,05 \cdot 10^{-29} \text{g/cm}^3$. A partir de quoi on déduit, via la relation entre ρ_{Λ} et Λ , soit $\rho_{\Lambda} = c^2 \Lambda / 8\pi G$, une constante cosmologique Λ de l'ordre de 10^{-52}m^{-2} . Cela est conforme à ce qu'on lit dans la littérature, tant pour ρ_{Λ} que pour Λ . Il s'agit ici pour nous d'une densité fictive destinée à corriger une erreur dans la compréhension initiale. Nous ne reprenons pas les développements sur la pression négative, etc., dans la ligne de cette densité ρ_{Λ} et qui continuent d'accommoder l'erreur initiale. Le rapport de 1 à 35, 36 pour le total, est un rapport d'environ 3% de matière baryonique (sans CDM) et 97% d'énergie sombre.

Indépendamment des calculs précédents, quelques remarques basées sur des raisonnements qualitatifs, apportent-elles des expédients supplémentaires, autres qu'à la marge, au problème de l'énergie sombre ? On peut ainsi remarquer que, en divisant les vitesses par un facteur α , on divise les dérivées des fonctions $v(r)$ (fonction de la distance), par le même facteur. Ce sont donc les fonctions qui permettent de parler d'accélération ou de décélération qui sont amoindries : cela peut-il s'ajouter à la liste des thérapeutiques pour se passer d'accélération ? On peut également faire une remarque, qui ressemble à ce que nous avons dit à propos des lois

$v(R)$ des vitesses des étoiles dans les galaxies spirales : les courbes des mesures et celles des prévisions ont tendance à se confondre pour les faibles valeurs de R , alors qu'elles se séparent pour les plus grandes : comparant les prévisions (modèle sans accélération) et les mesures, est-ce pour cela que l'expansion accélérée se manifeste, non pour des distances proches, mais pour des distances plus éloignées (pour $z > 0,3$) ?

De nombreuses recherches sont menées pour comprendre ce qui se cache derrière l'énergie sombre de densité Ω_v . Comme nous l'avons indiqué, certains auteurs l'identifient à la constante cosmologique Λ (avec $\Omega_\Lambda = \Lambda/3H_0^2$). Cette dernière, s'opposant à la force attractive de gravitation, fut introduite par A. Einstein dans ses équations pour garantir un univers stationnaire. D'autres y voient l'expression de l'énergie du vide (au sens de la mécanique quantique) : toutefois, d'après la physique des particules et la théorie quantique des champs, il y a une grande différence d'ordres de grandeurs entre les deux énergies. L'énergie du vide évaluée par la mécanique quantique serait quelque 10^{40} fois plus grande, rendant problématique le lien supposé entre les deux. Pour certains auteurs, c'est là une des plus grandes énigmes de la physique. Il n'y a pas pour nous de problème de la constante cosmologique, dans la mesure où elle ne renvoie pas à une force effective de la nature mais exprime une correction par rapport à une compréhension initiale erronée. Nombreux cherchent plutôt à se passer d'énergie sombre et mettent en avant les difficultés ou paradoxes qui y sont associés (e.g. Huterer & Turner, 1999) : - on ne sait pas à quel champ physique la relier ; - sa densité ne diminue pas avec l'expansion (cette observation ne serait pas problématique pour nous puisqu'il s'agit d'une question de vitesses mal estimées, et non d'une question d'énergie et de densité) ; - son intervention est intermittente dans l'histoire de l'univers (cf. l'expansion accélérée de l'inflation au tout début du big-bang). Sans compter les superpositions de problèmes de la matière noire et de l'énergie noire jouant des rôles antagonistes dans les équations, conduisant à des sortes de surenchères : les auteurs parlent de dégénérescences difficiles à lever. Pour Buchert (2000, 2008, 2012) il faut chercher du côté de la non-homogénéité de l'univers aux grandes échelles. Sans contester fondamentalement l'idée d'expansion accélérée, Fleury et al. (2013) essaient de calculer le diagramme de Hubble dans le cas d'un univers non-homogène.

7. Un chantier : 2. La tension de Hubble

Le deuxième chantier annoncé concerne la tension de Hubble. Il y a plusieurs façons d'évaluer H_0 , dont deux principales. La première repose sur le modèle d'expansion Λ CDM. Ce dernier, fondé sur les équations de la relativité générale, intègre diverses données, en particulier celles provenant de l'observation du fond diffus cosmologique (CMB). Cela renvoie à des époques très précoces de l'univers : c'est la raison pour laquelle la valeur produite par cette méthode est appelée « H_0 *early* » (précoce, ancien).

La seconde estimation de la constante de Hubble est plus directement issue des données dites locales, reposant sur les vitesses d'éloignement de galaxies proches de la nôtre (grâce au décalage vers le rouge) en fonction de leurs distances ; ces dernières sont évaluées de façon indépendante par l'utilisation de chandelles standard. On l'appelle ainsi « H_0 *late* » (récent, tardif).

On trouve dans la littérature une gamme de valeurs pour H_0 *early* et H_0 *late*, avec des intervalles de confiance variables. Ananthaswamy (2022) annonce H_0 *early* = $67,49 \pm 0,53$ km/s/Mpc et H_0 *late* = $73,04 \pm 1,04$ km/s/Mpc. La valeur ancienne est plus petite que la valeur récente d'environ 10%. Or, compte-tenu des précisions des mesures et des données, les écarts types des deux distributions de valeurs ne permettent pas de recouvrement. On parle de la « tension de

Hubble ». De très nombreux auteurs ont émis des idées pour tenter de résoudre cette tension ; de nouvelles méthodes d'estimation de H sont mises en œuvre. Pour certains, tels Terry *et al.* (2002), Paturel & Teerikorpi (2006), Paturel *et al.* (2017) il est nécessaire de tenir compte de divers biais dans les façons de calculer H et d'évaluer le *redshift*. Pour Mizony (2017) c'est plus radicalement le choix des métriques qui est en cause.

De notre côté, nous continuons à dire qu'il faudrait reprendre l'ensemble des calculs avec des valeurs de H divisées par $\alpha \approx 2.4$, et régler tous les problèmes d'ajustements en cascade des différents choix modifiés par la démarche proposée. Pour avoir une évaluation quantitative de cette opération et constater son bienfait effectif, il faudra patienter. En attendant, on peut faire la remarque que, toutes choses égales par ailleurs, si l'on divise les deux constantes H *early* et H *late* par un même facteur, on rapproche les valeurs, mais surtout, si l'on ne modifie pas les intervalles de confiance, on peut amener ces derniers à se rejoindre ou se recouvrir ; *cela supprime ipso facto la tension*. Pour les valeurs citées à l'instant, la division par 2.4 donne

$H_0 \text{ early} = 28,12 \pm 0,53$ et $H_0 \text{ late} = 30,43 \pm 1,04$. Les intervalles de confiance sont maintenant contigus.

Nous pouvons faire une autre remarque, déjà mentionnée à propos de l'énergie sombre ; elle concerne les valeurs H *early* qui tiennent compte du CMB : en amoindrissant l'effet du CMB (trop corrigé) on peut, toutes choses égales par ailleurs, amener une augmentation de H *early* ; cela pourrait là aussi contribuer à amoindrir la tension.

La tension « S8 »

Cette tension est signalée pour mémoire, dans la mesure où il est dit qu'elle pose à nouveau des problèmes de masse manquante (Ananthaswamy, 2022). Nous remarquons simplement que les auteurs voient la résolution possible de cette tension si l'erreur d'estimation des masses atteint 40 à 50 %, ce qui, dans le contexte où nous nous situons, est bien le cas.

8. L'inflation cosmique

L'inflation cosmique ne semble pas avoir de rapport avec notre propos : nulle vitesse d'objet céleste « mesurable ». Toutefois, elle présente deux motifs de perplexité qui n'en sont pas indépendants ; 1) elle manie des échelles de temps et d'espace surprenantes ; 2) elle utilise des expressions paradoxales (« l'espace s'enfle plus vite que la lumière »...) faisant jouer à la vitesse de la lumière un rôle indépendant des phénomènes. A son origine, outre les problèmes de la platitude et des monopôles magnétiques, l'inflation est un mécanisme imaginé pour résoudre celui de l'horizon : le constat de la grande homogénéité de l'univers. C'est en particulier

ce que nous dit le satellite Planck dans sa cartographie du fond diffus cosmologique et le constat de très faibles perturbations par rapport à l'équilibre thermodynamique. Ainsi, des régions éloignées, qui, du fait de leur distance, n'ont pas pu communiquer entre elles, sont de caractéristiques très proches. La solution proposée par Alan Guth (1981), suivi par de nombreux chercheurs avec des variantes, est celle de l'inflation : une dilatation prodigieuse de l'univers (distances multipliées par un facteur atteignant ou dépassant 10^{50}) en un temps extrêmement bref (10^{-32} s) suivant immédiatement le big-bang (10^{-37} s après). On comparera ces chiffres à ceux qui concernent l'expansion postérieure, avec un facteur 10^4 pendant quelques quatorze milliards d'années. Avec le scénario de l'inflation, la partie de l'univers visible aujourd'hui était beaucoup plus petite auparavant et a eu le temps d'atteindre l'équilibre thermique.

Quelles remarques faire ? Si l'on envisage une transmission par la lumière, à une vitesse plus lente, de l'image de l'horizon jusqu'à nous, nous rallongeons son ancienneté. Sa taille plus petite aurait-elle alors permis l'homogénéisation thermique ? Ou encore : quand on part d'une singularité mathématique réduite à un point de taille nulle, on multiplie par l'infini sans grand effet ; ceci pour dédramatiser l'inflation ? Suivant les modèles d'évolution de l'univers, on peut en effet avoir une dérivée infinie à l'origine pour $a(t)$. Mais les physiciens nous disent que cela ne suffit pas : l'atome primitif a beau être petit, si la vitesse d'expansion est infinie, il n'y a pas d'échanges entre les différentes parties de ce germe. La question est celle d'une accélération très rapide, commençant par une pente douce pour permettre l'homogénéisation, et se prolongeant par une pente infinie : au total, une concavité (une dérivée seconde) positive pour $a(t)$.

Sans être en mesure de reprendre les calculs relatifs à l'inflation, ni se poser avec les physiciens la question de sa cause (quel champ ? quel « inflaton » ?), nous proposons seulement quelques remarques latérales. Elles portent sur les premières questions qui viennent à l'esprit quand on raconte le scénario de l'inflation : on est en particulier surpris des ordres de grandeur des durées et des distances. Quel sens leur donner ? Mais l'étonnement ne vient-il pas de ce que nous nous rapportons à nos étalons habituels, fondés sur la lumière de « vitesse » c_0 . Or que peut-on dire de cette grandeur dans le plasma dense des moments suivant le big-bang ? Les photons interagissaient avec les électrons non liés aux protons dans des atomes, et ne pouvaient se propager « librement » (toutes proportions gardées, on pense aux photons à l'intérieur du soleil et leur million d'années de traversée, section 10). Par comparaison avec sa valeur dans le vide, la vitesse de la lumière était infiniment faible. Mais on continue d'utiliser dans les modèles $c = c_0 = 10^8$ m/s. A quel moment c_0 est-elle une constante structurelle liée à d'autres dans le fonctionnement de la physique ; à quel moment est-elle une vitesse qui concerne les propagations intervenant dans un milieu, sachant que la valeur de c n'a pas de sens toute seule, mais seulement par comparaison à d'autres « vitesses » ? Dans la mesure où nos étalons se rapportent à une horloge-lumière (une horloge est pour nous un étalon de mouvement et contient la jauge spatiale, Guy, 2013), il nous semble intéressant de prendre une référence qui a son sens par rapport aux problèmes en cours de traitement. Cela passe par le choix d'une horloge différente de la nôtre aujourd'hui, quitte à faire le lien ensuite. On change le discours sur les temps et espaces en jeu dans l'inflation en prenant une vitesse de la lumière c_b très petite (tendant vers zéro au niveau de la singularité mathématique du big-bang ; indice b comme big-bang ou *beginning*). On calibre les phénomènes sur c_b dans le milieu dense²² : quand on y est, on ne voit rien d'anormal, on ne voit pas que c'est spécialement rapide. C'est seulement par comparaison avec l'horloge battant à c_0 que l'on parle d'empressement. C'est comme si l'on accélérât le film (horloge c_0) que l'on aurait filmé en horloge- c_b . Le chiffre 10^{-32} s n'a pas de sens tout seul. Cela conduit à rétrécir les durées et étendre les espaces par rapport à nos étalons habituels. Appelons l_0 et t_0 les longueurs et durées des phénomènes en correspondance avec l'horloge de vitesse c_0 ; et de même l_b , t_b pour l'horloge à c_b ; on a alors des relations du type :

$$\frac{l_0}{l_b} = \frac{c_0}{c_b} \quad \text{et} \quad \frac{t_b}{t_0} = \frac{c_0}{c_b}$$

Si donc c_b/c_0 tend vers zéro, alors les longueurs l_0 et les temps t_0 dans nos unités paraissent dilatées et rétrécis, de façon vertigineuse par rapport aux longueurs et les temps évalués dans le milieu dense. Cela peut expliquer le caractère surprenant de l'inflation que nous ne sommes pas en mesure de contester et de vouloir éviter, et à garder pour son rôle homogénéisant.

Une autre façon de déchiffrer les embarras du discours sur l'inflation est de dire que les auteurs ont oublié que le temps seul n'existe pas, l'espace seul non plus : nous sommes seulement devant des mouvements comparés les uns aux autres. Horloges et règles sont fondés sur la propagation de la lumière comparée à d'autres phénomènes de propagation. Pour cette raison, on peut envisager des « portions » du monde voyant des durées et des longueurs différentes les unes des autres si elles s'appuient sur des horloges différentes, c'est-à-dire sur des vitesses c contrastées. C'est l'occasion de porter un regard critique sur certaines façons de parler en

²² c_b est une moyenne utile pour le raisonnement, mais on peut supposer sa variation entre le début et la fin de l'inflation.

cosmologie. Quoiqu'on s'en défende, tout y est formulé comme si l'espace et le temps formaient un cadre (un *background*) à l'intérieur duquel les phénomènes, y compris la propagation de la lumière, se déploient ; sans se redire que ce cadre s'appuie sur les phénomènes. Ainsi, comme rappelé plus haut, entend-on : « l'espace se dilate plus vite que la lumière » ; ou : « l'espace-temps est déformé par la matière ». Les diagrammes espace / temps sont abondamment utilisés : on y dessine les lignes d'univers, et les cônes de lumière qui bornent la transmission des influences et de la causalité. Sans nier le rôle de ces outils conceptuels et graphiques dans les situations « courantes », leur emploi est contraire à l'esprit de la relativité générale, elle qui nous répète que les mesures du temps et de l'espace ne sont pas indépendantes des phénomènes. Cela relève d'une veine éminemment discutable lorsqu'il s'agit d'aller aux frontières des modèles. Les circularités, régressions sans fin, récursivités, avec ce qu'elles imposent comme choix et conventions, ne sont pas anodines : dans les situations délicates, il faut les faire sortir de leur caractère implicite. Comment corriger les expressions délictueuses ? « L'espace se déforme ou s'étend plus vite que la lumière », c'est un peu jouer sur les mots ; cela revient à comparer des vitesses de la lumière entre elles, via la comparaison entre les mesures locales, décrites par les éléments dx , dy , dz , dt , et les mesures de portée plus large dans ds avec intervention de la métrique g_{ij} (c'est-à-dire un espace-temps sans et avec matière, cf. Guy, 2016²³ ; voir aussi les travaux de Magueijo discutés dans la section 9.3). C'est aussi user de la fiction (au sens de Vaihinger, nous en avons déjà parlé) d'un espace-temps imaginaire englobant, surplombant, indispensable pour parler et penser, en « continuité » avec l'espace-temps « réel » appuyé sur la matière. Nous ne discuterons pas davantage ces questions qui mériteraient un travail spécifique.

9. Quelles variations de la vitesse de la lumière pour la théorie de la relativité ?

9.1. La relativité, l'espace et le temps : des questions

Comment continuer en laissant de côté un obstacle de taille ? Alors que la théorie de la relativité dit observer la constance universelle de la vitesse de la lumière dans le vide, et l'érige en principe fondateur, envisager une variation de cette vitesse n'est-il pas frivole ? N'ouvre-t-on pas la porte à une infinité de choix *ad hoc* ? Nous allons donner une réponse négative à ces questions. Nous nous arrêterons plus loin sur les milieux réfringents (dont l'existence n'invalide pas la transformation de Lorentz), et dirons : *aux échelles cosmologiques, le milieu traversé n'est pas vide*. Mais il est intéressant de reprendre ce qui se joue dans la dérivation de la transformation de Lorentz et d'examiner comment les postulats de la théorie de la relativité s'accordent ou non avec nos réflexions sur la variation éventuelle des vitesses appréhendées dans des ratios. Posons quelques questions, liées les unes aux autres. - Comment dériver la transformation de Lorentz en suivant une rationalité relationnelle, surtout si espace et temps ne préexistent pas et doivent être compris dans la foulée, à partir de mouvements comparés ? - Peut-on, comme on le fait d'habitude, exprimer le second postulat en termes de vitesse, sachant que la lumière sert à définir les étalons d'espace et de temps ? – Peut-on l'écrire simplement en termes de comparaisons de *rappports* v/c ? – Plus fondamentalement, que voulons nous exprimer, quel besoin avons-nous de formaliser par des équations la marche des phénomènes ? Comment le faire, sur quelle base ?

²³ Dans ce scénario, l'espace, « qui s'étend plus vite que la lumière », serait appuyé sur le quadrillage dx , dy , dz (dt) alors que la lumière serait appuyée sur l'élément ds total qui fait intervenir la métrique.

En réponse à ces questions, nous voulons certainement dire que les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels (premier postulat) à condition de définir de tels référentiels ; nous voulons aussi nous appuyer sur un (ou des) phénomène(s) qui va (vont) nous servir de point(s) de comparaison, d'étalon(s). C'est le sens du Second postulat, particularisé d'habitude en prenant la lumière et sa « vitesse » comme bases. Nous pouvons reformuler ce dernier de façon plus large, englobant le premier : « seules les comparaisons de phénomènes (comparaisons de mouvements) entre eux sont notre point de solidité » ? Cela rejoint les remarques de Poincaré (1902, 1905). Lee & Kalotas (1975) et Lévy-Leblond (1976, 2001) ont proposé chacun à leur façon une coalescence des deux postulats. Il faut revoir ces divers points pour les raisons évoquées ici et là depuis le début du texte : l'aspect relationnel englobe lois, vitesses, confrontations de phénomènes, etc. (voir Guy 2010a, 2015, 2019b). *Tout dérive en somme de la nécessité relationnelle de choisir momentanément (provisoirement) une base de comparaison pour parler*, décidant de fixer le numérateur ou le dénominateur d'un rapport v/c , pour discuter quantitativement les différents mouvements offerts à notre investigation. A la question « c est-elle constante ? », nous répondons : « nous ne le savons mais nous sommes obligés de l'affirmer, au moins localement ».

Du point de vue technique peut-on dire que la transformation de Lorentz concerne un rapport v/c ? Non, pas directement. Car, à partir du moment où l'on formule des propositions discursives ou des équations, on dissocie l'espace du temps. On est donc obligé de s'y prendre à plusieurs fois dans des récursivités auxquelles on n'échappe pas lors de la dérivation (cf. ce que nous avons dit dans la section 2.2. à propos du mode relationnel). On commence à faire comme si on avait séparé l'espace du temps, se focalisant sur un des deux termes mis en relation dans un rapport v/c . On lui donne un sens en m/s dans une fiction, proclamant « $c = \text{cte}$ ». On s'aperçoit ensuite qu'espace et temps sont liés, que c n'est pas seule et intervient dans le rapport v/c . On revient en somme sur ses pas pour interpréter ce qu'on a fait : « oui, ce n'étaient que des rapports v/c ». Dans la dérivation standard, le v/c apparaît tôt et on est embarrassé lorsque le rayon lumineux test est perpendiculaire au vecteur v du mouvement relatif des deux repères (Guy, 2019a). Le facteur γ de la transformation de Lorentz s'exprime aussi en termes de v/c : dans Guy (2019b), nous exprimons des rapports de mouvements de façon vectorielle, après avoir ouvert les horloges qui cachaient elles-mêmes des mouvements (Fig. 12). En bref, la transformation de Lorentz saisit le moment où l'on sépare l'espace du temps, liés dans la comparaison de mouvements.

9.2. Apports généraux de la Transformation de Lorentz

Outre, et grâce à, ses aspects algébriques, seulement évoqués à l'instant, la théorie de la relativité, et son expression dans les équations de transformations spatio-temporelles, apporte un certain nombre de résultats qualitatifs essentiels à rappeler : - les variables d'espace et de temps n'ont pas de caractère absolu, mais se modifient de façon associée d'un repère à un autre en mouvement relatif ; - les grandeurs physiques sont exprimées en paires, telle celle {champ électrique, champ magnétique} ou {énergie, quantité de mouvement}, formalisées dans des quadrivecteurs, ou des paires de vecteurs 3D ; - les transformations de ces grandeurs couplées permettent de relier des grandeurs de masse et d'énergie ; - espace et temps, dans la paire (x, t), peuvent être mises sur le même plan que les autres grandeurs physiques (cf. Guy, 2016) ; etc.

9.3. Les théories de la vitesse variable de la lumière

Pour résoudre certaines difficultés rencontrées en cosmologie (en particulier à propos de l'inflation cosmique), nombre d'auteurs ont offert des théories où la vitesse de la lumière peut varier, dans le temps et /ou l'espace, par rapport à sa valeur c_0 admise aujourd'hui. On les appelle VVL (vitesse variable de la lumière) ou VSL (*variable speed of light*). Leurs propositions ont été discutées et validées par la communauté scientifique ; il y a donc des précédents sérieux ! Parmi d'autres, nous avons consulté Petit (1988), Barrow (1998), les textes de Magueijo (2000, 2003a et b) ayant spécialement retenu notre attention. Cet auteur fait la part, à propos de la « constance de la vitesse de la lumière », entre ce qui lui paraît important, et qu'il faut conserver, et ce dont il va s'écarter. Ainsi faut-il garder les résultats selon lesquels la vitesse est indépendante de la longueur d'onde (que nous écrivons quant à nous $c(\lambda_1) / c(\lambda_2) = 1$), ou du mouvement de la source. Par contre, il n'est pas fondamental d'écrire que $c = 3.10^8$ m/s, ce qui pourrait changer avec un autre choix d'unités (comme l'on remplacerait le mètre par le yard). Dans son développement mathématique, Magueijo montre qu'un changement de vitesse de la lumière évite le recours à l'inflation. Appliquant ses idées à l'étude des trous noirs, il montre que la vitesse de la lumière peut suivant les cas être nulle ou, au contraire, tendre vers l'infini.

Nous ne regardons pas ses calculs en détail, notre analyse générale différant de celle de cet auteur. Les théories de vitesse variable de la lumière souffrent de divers défauts, cela rejoint ce que nous avons dit plus haut pour l'inflation. Fondamentalement, elles ne se posent pas la

question de l'existence du temps, ni de l'espace : ceux-ci semblent aller de soi, indépendamment des phénomènes. La notion de vitesse, sa mesure en mètres par seconde, n'éveillent pas non plus de problème. Ainsi se permet-on de faire varier c toute seule, sans toucher aux horloges, alors que les mesures du temps sont concernées par la valeur de ce c , ayant valeur d'horloge (et indirectement par celle d'autres vitesses, dans les omniprésents ratios v/c). En bref, elles manquent d'un recul relationnel qui aurait pu faire tourner leur regard, en plus de l'inflation, vers la matière noire et l'énergie sombre. Par contraste, ce que nous proposons n'est pas tant une théorie de plus de la vitesse variable de la lumière, qu'une théorie des mouvements comparés.

10. Discussion : ralentir la lumière ?

Si, comme nous l'avons annoncé, nous prenons (nous décidons de prendre) au sérieux l'existence d'un ratio α entre les vitesses de la lumière, à l'échelle du vide local, et à l'échelle cosmologique, soit $\alpha = c_0/c_c \approx 2.4$, il nous faut éclaircir les raisons pour ce faire. Ouvrons un chantier sur ce sujet, et commençons par revenir aux milieux réputés denses (non vides) : la vitesse c est moindre dans l'eau, le verre, les solides cristallins, mais aussi l'air... L'indice n , rapport entre les valeurs c_0 (dans le vide) et c (dans le milieu) est supérieur à un (pour le diamant par exemple $n = 2,4$, soit $n > 2$, valeur fréquemment rencontrée dans les minéraux naturels). Peut-on assimiler le milieu cosmologique à un milieu réfringent et y ralentir notablement la vitesse de la lumière ? Cherchons à comparer le trajet dans le vide local, soit par exemple l'espace entre terre et soleil ($n = 1$, $c = c_0$), et le trajet cosmologique se comptant en milliards d'années-lumière ($n = \alpha$, $c = c_c$). Du côté des milieux réfringents, l'interprétation rencontrée fréquemment pour une valeur $c < c_0$ est que la lumière parcourt des portions de trajets à la vitesse c_0 , mais qu'elle interfère avec la matière et effectue le voyage d'ensemble en zig-zag (Fig. 13). Le trajet étant plus long, la vitesse d'ensemble paraît plus petite. Les interactions électromagnétiques (diffusion Rayleigh et autres) avec les particules chargées (électrons surtout) induisent des déviations géométriques. Deux classes de processus s'ajoutent l'un à l'autre. Une classe électromagnétique (le chemin est rallongé par les interactions de ce type, comme évoqué à l'instant), et une classe gravitationnelle (le chemin ne suit pas une ligne droite à cause des déviations dues aux courbures locales de l'espace, celles qui donnent les mirages gravitationnels).

La notion de vide a un caractère probabiliste : quand bien même la densité de matière (minime dans le cas du « vide ») serait la même, plus le trajet parcouru est long, plus les chances pour le

photon de rencontrer des atomes sur son chemin sont grandes. L'indice est une propriété émergente (on pourrait dire thermodynamique). Il varie avec la longueur traversée et il faut dépasser un certain seuil de distance pour que l'effet statistique compte et se stabilise (ceci est autant valable pour l'effet gravitationnel que pour l'effet optique). Ce qu'on peut exprimer en disant que le rapport l_c/l_{c0} tend vers une constante $n = c_0/c_c$ (définissant c_c) lorsque l croît (l_c et l_{c0} sont définis sur la Fig. 13 et rediscutés plus loin). Ensuite de quoi, on peut supposer une propriété d'extensivité (n ne varie plus lorsque les dimensions s'accroissent). Cette propriété joue déjà à l'échelle de notre voie lactée (il y a un facteur 10^9 à 10^{10} entre la distance terre-soleil et les dimensions de la galaxie). Et la cohérence des résultats des parties précédentes nous fait supposer que l'expansion cosmique, depuis l'époque de 380 000 années, ne modifie pas ces propriétés d'émergence et d'extensivité (l'essentiel de l'expansion s'étant produit avant, au moment de l'inflation).

En plus du zig-zag simple, c'est-à-dire sur une portion plus ou moins ample du trajet du photon dans l'espace cosmique, un facteur contribue à allonger le trajet. C'est celui d'un emboîtement de zig-zag à différentes échelles, se traduisant par un aspect « fractal » (dans son sens imagé) du trajet. Il se manifeste d'autant plus que la longueur du chemin total est grande ; on peut comparer cela à l'étalement de la probabilité de présence au cours du temps d'un mobile dans une marche aléatoire. Sur la figure 13, on a montré une série de zig-zags plus petits pour le trajet entre les points A et C. Même si l'augmentation de la longueur d'un trajet à une échelle donnée (par l'effet des déviations le fractionnant) est minime, l'accumulation des augmentations à différentes échelles conduit à un accroissement global significatif (pour un trajet élémentaire s'amplifiant de 15% à une étape donnée, le cumul sur 6 échelles conduit l'indice à dépasser la valeur de 2). On peut supposer que, à densité de matière comparable, la taille du trajet augmente cet effet et accroît l'indice n , tout en se stabilisant par effet statistique au-delà d'un certain seuil. Le milliard d'années-lumière (de l'ordre de 10^{25} m) nous fournit une grande marge pour cet effet par rapport à l'unité astronomique de la distance terre-soleil (10^{11} m).

L'imagination peut-elle nous aider dans l'appréhension d'un cosmos non vide et réfringent ? Quand il s'agit de milieux denses tels un morceau de verre, nous regardons de haut, de loin, un matériau homogène : nous le prenons comme tel, sans nous préoccuper *a priori*, ni du vide, ni des atomes qu'il contient. Ce doit être la même chose pour la dimension cosmologique, nous installant à une échelle où l'homogénéité (et l'isotropie) de l'univers ont un sens. Il nous faut donc nous faire plus grand que les galaxies : à cette échelle l'univers, n'est qu'un fluide

uniforme translucide dont nous ne percevons pas les grains. Quel est son indice ? Mais, dans un effet inverse, si nous nous faisons tout petit au milieu des atomes, dans le grand vide de la matière du milieu réputé dense (les noyaux atomiques ont des dimensions de l'ordre de 10^{-15} m pour des tailles d'atomes de 10^{-9} m), nous verrions des morceaux de trajet de la lumière à sa vitesse maximale c_0 , oubliant qu'elle est réputée aller à une vitesse moitié pour l'ensemble de son voyage ! D'habitude on parle d'indice en faisant aller notre pensée de l'extérieur du milieu où $c = c_0$ (c'est la zone libre où l'on contourne la matière), vers l'intérieur où l'on a $c < c_0$. Cette fois, c'est le contraire : on part de l'intérieur d'un petit bout d'univers où l'on a $c = c_0$ et l'on fait comme si l'on pouvait sortir de l'univers et voir augmenter l'indice... Mais l'extérieur d'où regarder le fluide de galaxies comme un seul milieu est un rêve : il n'existe pas, pas davantage que de vis-à-vis possible à ce milieu, qui donnerait lieu à des phénomènes de réfraction par exemple. Heureusement, l'imagination et son bras théorique fictionnel (au sens donné plus haut) le permettent.

10.1. Approche gravitationnelle

Précisons les mécanismes de modification du trajet du photon dans le cas gravitationnel. Cela renvoie d'ailleurs à une correspondance entre gravitation et électromagnétisme / optique, au moins pour prévoir un indice optique n (la suite concerne alors aussi partiellement les phénomènes électromagnétiques). De nombreux auteurs s'y sont penchés : Möller (1952), Feynman (1964), Landau et Lifchitz (1970), Evans et al. (1996), Straumann (2000), Nandi & Islam (2009), Sarazin et al. (2018)... On rencontre dans ces travaux diverses formules fournissant des propriétés « optiques » à partir d'informations de nature gravitationnelle, en relation avec la donnée d'une métrique (relativité générale). Ainsi Landau et Lifchitz (*op. cit.*) proposent-ils un lien entre le coefficient temporel g_{00} d'une métrique et la constante (ou permittivité) diélectrique ε selon

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{g_{00}}}$$

D'où on tire un lien $n(g_{00})$, car n et ε sont liés selon $n^2 = \varepsilon/\varepsilon_0$.²⁴ Il reste donc à exprimer g_{00} pour différents cas. Dans celui d'une métrique à symétrie sphérique autour d'une masse M on a directement une équation liant n à la distance r à la masse (Sarazin *et al.*, *op. cit.*) :

$$n(r) = 1 + \frac{2GM}{rc_\infty^2}$$

Où c_∞ est la vitesse de la lumière loin des masses, soit c_0 dans nos notations. Pour des masses importantes, et pour des distances proches des centres de masse, l'indice peut être arbitrairement grand, supérieur à 2 ou davantage (c'est aussi le cas pour des masses faibles, à condition de passer suffisamment près ; nous ne discutons pas la signification physique) ; les vitesses de la lumière sont alors divisées par ce facteur par rapport à la valeur « dans le vide », c'est à dire sans masse. Ceci se traduit par un ralentissement de la lumière au voisinage des masses. Pour une métrique euclidienne minkovskienne on a classiquement

$$g_{00} = 1 - \frac{2V}{c^2}$$

Où V est le potentiel de gravitation, fonction des masses et des distances. Nous ne chercherons pas à corréler ces différentes expressions ni à calculer des indices $n(r)$ variant en fonction de la distance à des masses pour diverses distributions et selon diverses métriques, retenant toutefois leurs valeurs locales possiblement importantes d'après la théorie. Nous cherchons plutôt un indice pour l'ensemble du cosmos à l'échelle de

²⁴ Pour Straumann $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$, expression à rapporter aux précédentes (?).

l'univers. Il serait alors approprié de voir du côté de la métrique co-mobile FLRW (mais son sens physique s'accorde-t-il avec un calcul « optique » ?).

Nous replaçant à une échelle d'ensemble, les mesures de distances par chandelles standard ne donnent pas le trajet effectivement parcouru par la lumière pour nous parvenir depuis les objets lointains. Elles fournissent la distance euclidienne la plus directe, en correspondance avec nos étalons et horloges fondés sur c_0 . La luminosité reçue est une portion de luminosité où la diminution se fait en proportion de la surface que nous évaluons en $4\pi R^2$ d'où nous déterminons un R conforme à nos étalons habituels²⁵ (Fig. 14) ; les mesures de distances angulaires suivent la même démarche. En bref, il faut faire une distinction entre la distance d'un trajet et ce qui est d'abord une convention pour partager une luminosité ou la taille d'un élément de longueur : le δS /surface (πR^2) ou δl /périmètre ($2\pi R$) ne sont pas modifiés par un trajet plus long que R . On imagine pour les trajets une droite comme on en connaît autour de nous. Mais ce n'est pas la course qu'a empruntée la lumière, elle qui a contourné de multiples obstacles (tant macroscopiques comme étoiles et galaxies, que microscopiques comme atomes et molécules de gaz, ionisé ou non, et poussières) par effet gravitationnel (et électromagnétique, voir ci-après) le long de son trajet. On peut envisager de multiples déviations plus ou moins importantes de ce type, sur de longues distances ou de micro-trajets (cf. ce que l'on connaît des mirages gravitationnels micro/macro lensing) : elles vont s'ajouter²⁶.

10.2. Approche « optique électromagnétique »

Au zig-zag gravitationnel peut se rajouter un zig-zag optique ou électromagnétique (qui nous a d'ailleurs mis sur la piste du premier). Sans reprendre le cas des milieux denses ou même celui de l'atmosphère, limitons une esquisse phénoménologique à un milieu dilué. Nous suivons les recommandations de Feynman (1964) pour qui le cas avec des interactions entre atomes voisins excités par la lumière (milieu dense) mériterait un traitement différent. Le trajet haché est alors produit par les diverses rencontres faites par le photon avec les atomes et ions ; on pense à la diffusion Rayleigh (1899), etc. A angles moyens égaux, sa longueur est proportionnelle au nombre de rencontres (ce qui suit s'applique aussi à ce qui est dit à l'instant pour l'effet gravitationnel). Regardons ce nombre n_r pour des trajets « typiques » de longueur l . Soit \underline{n}_r la valeur par unité de longueur, fonction du nombre linéaire moyen d'atomes ou molécules, noté n_m ; celui-ci est supposé connu à partir du nombre par unité de volume ; il faut tenir compte d'une certaine probabilité de rencontre (caractère aléatoire) ou section efficace σ . On a $\underline{n}_r = \sigma \cdot n_m$. Le nombre de rencontres total sera $n_r = \underline{n}_r \cdot l = \sigma \cdot n_m \cdot l$. Nous faisons la distinction entre les longueurs l_{c0} , pour le trajet rectiligne, et l_c , pour celui en zig-zag en correspondance.

Raisonnons par rapports, supposant que, toutes choses égales par ailleurs (même taille), le ratio de deux indices pour deux milieux dilués différents par leur densité, est une fonction croissante inconnue f du rapport entre les nombres de rencontres. Ce que nous écrivons $n_r/n_{r0} = f(n_m/n_{m0})$, opposant un milieu appelé vide (vitesse c_0 , nombre de rencontres n_{r0}) à un milieu « réfringent » (avec les notations correspondantes). Revenons sur la comparaison entre le trajet de la lumière entre la terre et le soleil d'un côté (c'est notre référence pour le « vide »), et celui dans le milieu cosmologique interstellaire et intergalactique, de l'autre. On sait que 99% de la masse baryonique est constituée de gaz (c'est l'entièreté de la matière des différents types de nébuleuses), avec une proportion significative de gaz ionisé. En voyageant, les photons interagissent avec les charges électriques rencontrées dans la matière neutre des étoiles et des gaz, et plus directement avec les particules chargées des gaz ionisés (dans l'un et l'autre cas il s'agit surtout des électrons). Ils interagissent aussi par l'effet gravitationnel. Dans l'espace cosmique, le nombre de particules est faible, de l'ordre de quelques centaines à quelques dizaines de milliers par volume de 1 cm^3 (Lequeux, 2008). En se ramenant à un trajet linéaire à l'intérieur de ce volume, nous prendrons la racine cubique. Ainsi, avec un nombre moyen de 10^3 particules par cm^3 , nous prendrons un nombre linéaire d'une dizaine par cm, soit 10^3 par mètre. En prenant une section efficace de 10^{-2} on a $\underline{n}_r = \sigma \cdot n_m = 10$ par mètre.

Pour ce qui concerne les rencontres entre le soleil et la terre, l'unité astronomique ($1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$), l'abondance de gaz est moindre que dans d'autres zones, périphériques ou localisées, de la galaxie. Folger (2022) indique que la densité de matière est 80 fois moindre dans la zone d'influence du champ magnétique solaire. On voit que si l'on appelle l'un le vide, l'autre ne l'est pas. La question est de savoir de combien, compte-tenu de la fonction f inconnue.

En plus de l'effet électromagnétique « classique », mentionnons un effet quantique observé dans des expériences de laboratoire : des gaz, de différentes natures (H, He, Na...) suffisamment ionisés pour parler de

²⁵ Première approche fondée sur l'approximation statique sans expansion (Taillet et al., op. cit.).

²⁶ La dualité entre trajet euclidien et trajet non euclidien est celle rencontrée en relativité générale entre les distances locales dx , dy , dz et une distance globale dl , celle du trajet d'ensemble de la lumière dans la géodésique, où jouent les coefficients g_{ij} de la métrique.

plasmas, sont refroidis et manipulés par rayonnements laser. Dans ces conditions, on parvient à ralentir considérablement la vitesse de la lumière : elle peut atteindre 12% de sa valeur dans le vide (Goyon *et al.*, 2021), ou même vingt millions de fois moins, soit la valeur de 17 mètres par seconde (Hau *et al.*, 1999). Certains travaux parviennent même à arrêter des photons. On sait que le milieu interstellaire est majoritairement (près de 70%) constitué de gaz (H surtout), en grande partie ionisé et qui peut être réputé « froid ». Les températures et densités ont peu de chose à voir avec celles des expériences de laboratoire (où les plasmas sont plus denses, et les froids plus intenses, proches du 0 K), alors même que l'on ne parle pas de manipulation par laser ! Notre connaissance de ces phénomènes est insuffisante pour pouvoir dire, si à un moindre degré et de façon un peu différente, ces phénomènes quantiques pourraient aussi jouer dans le milieu cosmique et contribuer au ralentissement de la lumière.

10.3 Discussion

En dehors de la terre et ses milieux denses, des situations se rencontrent où la vitesse macroscopique de la lumière est inférieure à sa valeur dans le vide. Ainsi les photons à l'intérieur du soleil le traversent en plusieurs dizaines de milliers, voire près d'un million, d'années (suivant les hypothèses prises pour leur marche aléatoire, dite de l'ivrogne), avec des vitesses se comptant en millimètres par seconde ; cela correspond à un indice se montant à quelques 10^{11} ! Dans l'univers primordial (avant les 380 000 ans de la libération de la lumière), la densité excessivement élevée conduisait à une « vitesse » de la lumière très faible (tendant vers zéro ; un indice tendant vers l'infini) !

Mais revenant aux milieux non denses, nous ne sommes pas en mesure d'aller plus avant et de comparer, quantitativement, à l'échelle cosmologique, les effets d'une nature ou d'une autre. L'effet gravitationnel domine-t-il l'effet électromagnétique ? A-t-on le droit de parler de réfringence pour l'univers, et non d'effet de courbure de l'espace-temps ? Dans un esprit phénoménologique et relationnel, il ne nous paraît pas opportun de plaider l'étanchéité parfaite de la coupure entre les deux classes de phénomènes (gravitationnels / électromagnétiques) : les vitesses associées sont évaluées par des rapports entre elles, d'un domaine à l'autre ainsi reliés, même si nous définissons des pôles différents pour le bon fonctionnement de notre pensée. Si nous exprimons la vitesse de la lumière dans un milieu réfringent par sa valeur en m/s, c'est, via un c_0 , par comparaison avec un mouvement du pôle gravitationnel. L'analogie, faite par divers auteurs, entre les fonctionnements du tenseur métrique g_{ij} en relativité générale (responsable des propriétés géométriques du milieu) et de l'ellipsoïde des indices n_{ij} d'un milieu réfringent, rejoint cette correspondance entre gravitation et électromagnétisme que nous mettons en relief ²⁷.

²⁷ Peut-on pousser un peu plus loin l'analogie entre relativité générale et optique des milieux réfringents ? Dans ce second cas, on a aussi biréfringence, avec apparition possible d'images multiples d'un même objet.

Nous retiendrons de cette partie que, pour une triple raison, une gravitationnelle, une électromagnétique, et une autre reposant sur l'emboîtement de trajets en zig-zag, nous nous attendons à une vitesse de la lumière inférieure à l'échelle cosmologique à ce qu'elle est dans notre voisinage solaire ; il reste à en faire une évaluation quantitative précise.

11. Conclusions

Si l'intellection de la migration de la lumière à l'échelle cosmologique n'aboutissait pas comme nous l'espérons, c'est l'ensemble des propositions du présent texte qui deviendrait caduque. Alors nous éprouverions une contradiction douloureuse entre ce qui nous paraît avoir une cohérence interne forte, d'un côté, et l'interprétation des phénomènes physiques qui s'en écarterait, de l'autre. Comme nous l'avons dit, nous avons poussé le plus loin possible une idée simple ; la tenue d'ensemble et la nature des résultats obtenus peuvent-ils encourager une reprise de ces questions par les physiciens ? Car la matière noire est une alerte ! Il faut remettre l'ouvrage sur le métier.

Passant de la mesure de la vitesse de la lumière aux raisonnements sur la matière noire, nous avons renversé les rôles. Si, dans les deux cas, nous avons mesuré des rapports v/c , nous avons commencé par dire, cherchant à évaluer c : « nous connaissons v au numérateur » ; et un peu plus tard, tournant notre regard vers les étoiles des galaxies reculées pour apprécier leurs vitesses, nous avons affirmé : « nous connaissons c au dénominateur » ! Alors, quelle déclaration serait universelle ? Nous dirons : ni l'une ni l'autre, il n'y a que des choix, il n'y a que des conventions. Nous nous sommes placés dans une compréhension relationnelle²⁸ selon laquelle nous ne connaissons que des rapports de mouvements (sans nous préoccuper d'espace ni de temps). Cette démarche fournit un cadre unique dans lequel reprendre des problèmes que les auteurs cherchent à résoudre séparément (de la matière noire à la tension de Hubble, en passant par l'énergie sombre et les mirages gravitationnels). La multiplicité des phénomènes arrimés ne renforce-t-elle pas la crédibilité de notre approche ? La prise en compte d'un point de vue général sur les rapports v/c nous libère d'un attachement excessif à un c constant. Il faut cesser de diviniser la lumière. Certes, comme pour Descartes et Galilée, sa vitesse excède notre entendement, mais à l'échelle de l'univers, elle se traîne lamentablement ; un facteur 2.4 ne bouleverse pas la donne (et ne change pas d'ordre de grandeur).

²⁸ L'importance de l'aspect relationnel se manifeste à propos de la recherche en physique de théories unitaires : pourraient-elles « tenir » sans contrastes à exprimer comme ici (gravitation / électromagnétisme) ? C'est dans cet esprit que nous avons débattu des relations entre mécanique quantique et relativité générale (Guy, 2016).

De très nombreuses solutions aux problèmes cités au début du texte ont été proposées dans la littérature. Notre objectif n'est pas d'en comparer les avantages et les inconvénients, ni de préciser comment les nôtres se situent par rapport à elles²⁹. Cela pourra venir plus tard, sans d'ailleurs les oublier car elles peuvent s'associer : là où les écarts aux solutions que nous proposons ne semblent pas opérer avec toute la précision requise, c'est que d'autres mécanismes se rajoutent. Il ne faut pas voir ici un unique coup de baguette magique pour tout résoudre, mais une piste, à joindre à beaucoup d'autres, dans l'effort de comprendre. Avec sur la table un plan *a priori* élémentaire que nous rappelons : - tenir compte, pour son trajet à l'échelle de l'univers, d'une « vitesse » de la lumière différente de sa valeur dans le vide ; - ne pas dissocier ce qui concerne cette vitesse des autres vitesses.

La valeur proposée $c_c = c_0/\alpha$ avec $\alpha = 2.4$ (ordre de grandeur) donne des résultats cohérents pour la matière noire³⁰, l'énergie sombre et divers problèmes cosmologiques qui y sont reliés : *les puissances du paramètre α , soient $\alpha^1 = \alpha$, α^2 et α^4 permettent de retrouver la hiérarchie et les bonnes proportions pour la trilogie matière baryonique / matière noire / énergie sombre* (Tableau 1). Matière noire et énergie sombre sont pour nous le nom des corrections à faire pour compenser l'« erreur » d'appréciation concernant la vitesse de la lumière à l'échelle cosmologique. Avec la matière noire, on regarde des objets « isolés » (des étoiles, des galaxies) avec d'abord un regard « newtonien » ; avec l'énergie sombre, on regarde l'univers dans son ensemble, avec, inévitablement, l'œil einsteinien de la relativité générale. La compatibilité entre les deux regards est assurée par une valeur particulière de la vitesse de la lumière. La remarquable correspondance entre le fonctionnement des « erreurs » et celui de leurs corrections est tout autant à mettre au crédit du travail des physiciens, astronomes et astrophysiciens qui ont construit un édifice cohérent sur lequel s'appuyer en toute sécurité. A vrai dire, les deux fonctionnements se confortent l'un l'autre.

Comment un seul chiffre suffirait-il, et comment encaisser les 33 milliards d'années de l'histoire de l'univers ? En réponse, n'oublions pas les circularités épistémologiques qui sous-tendent nos raisonnements cosmologiques habituels avec $c = c_0$. Et n'oublions pas le contexte général et gardons quelque modestie : il y a un point sérieux de frottement, de déconnexion même, entre notre physique d'ici-bas et celle que nous projetons au loin. N'est-ce pas insensé de proclamer sans ciller qu'on ignore 95% de la matière de l'univers et se réjouir de la bonne

²⁹ Dans un passé récent (Guy, 2010b), nous avons imaginé une loi modifiée de la gravitation (tenant compte des vitesses relatives des masses en mouvement), pour accommoder les questions de matière noire et d'énergie sombre. Ce modèle, n'a pas connu de prolongement : sans doute n'explique-t-il pas de nombreux faits d'observation (tel celui de la masse manquante demandée par les mirages gravitationnels) ?

³⁰ *L'univers est une pierre précieuse ; la matière noire est un diamant !?*

marche du modèle standard ? Divers auteurs, tels Smolin (1997, 2008), Lepeltier et Bonnet-Bidaud (2012), Lepeltier (2014), etc., ont exprimé leur insatisfaction sur cet état de fait et leur attente de changements conceptuels indispensables. La situation ne mérite-t-elle pas un certain bouleversement ? Dans le sens d'un rafraîchissement des concepts, et non d'un surcroît de technicité mathématique ? De multiples questions sont posées, et il conviendra d'examiner tant les faits et calculs allant dans le sens indiqué, que les réfutations d'une vitesse de la lumière plus petite que notre valeur « habituelle ». A tout le moins, retenons une réflexion sur le statut de la vitesse de la lumière : l'équation $c = cste$, énoncée toute seule et valable en tout temps et tout lieu, base de modélisation des phénomènes physiques, avec l'indication de quelque valeur que ce soit, est dépourvue de sens.

Remerciements

Je remercie la grande foule de ceux qui me côtoient (en particulier les membres de ma famille) ; ceux, moins nombreux, avec qui j'ai pu discuter ces questions. Ce travail bénéficie du travail de tous mes collègues physiciens, astronomes et astrophysiciens. J'exprime ma gratitude à J.-Ph. Uzan et R. Lehoucq pour leur livre sur les constantes fondamentales qui m'a accompagné au début du chemin ; à Th. Buchert, P. Corpet, Ph. Coueignoux, Ph. Dujardin, G. Paturel, E. Touboul, et maints autres, pour les échanges de vue fertiles, sans prétendre qu'aucun n'adhère à mon point de vue. Ce texte n'est qu'une bouteille à la mer : le lecteur peut-il me suivre un instant, au moins par jeu intellectuel, et me rendre le service de me critiquer et me signaler les erreurs concernant les faits discutés et les interprétations proposées ?

Références

- Alloin D. & Boisshot A. (2008) Galaxies, *Encyclopedia Universalis*, tome 10, 384-396.
- Ananthaswamy A. (2022) Tensions dans le modèle cosmologique, *Pour la Science*, 537, 22-29.
- Aubert D. (2019) Cosmologie physique, Ellipses, 250 p.
- Bekenstein J.D. (2009) Relativistic MOND as an alternative to the dark matter paradigm, *Nuclear Physics A*, 827, 555c-560c.
- Blamont J. (2001) La mesure du temps et de l'espace au XVII^e siècle, *Dix-septième siècle*, 4, 213, 579-611.
- Barrow J.D. (1998) Cosmologies with varying light-speed, *ArXiv*, 19 p.
- Bertone G. (2014) *Le mystère de la matière noire. Dans les coulisses de l'univers*, Dunod, 198 p.
- Borka D., Capozziello S., Jovanovic P. & Borka Jovanovic V. (2016) Probing hybrid modified gravity by stellar motion around galactic center, *Astroparticle physics* 79, 41-48.
- Buchert Th. (2000) On average properties of inhomogeneous fluids in general relativity: dust cosmologies, *General relativity and gravitation*, 32, 105-126.
- Buchert Th. (2008) Dark energy from structure, a status report, *General relativity and gravitation*, 40, 467-527.
- Buchert Th. (2012) Univers invisible ou univers inhomogène ? Les problèmes de la matière et de l'énergie noire, in : Lepeltier et Bonnet-Bidaud (dir) : *Un autre cosmos ?* Vuibert, 99-119.
- Chiba R. & Schönrich R. (2021) Tree-ring structure of Galactic bar resonance, arXiv: 2102.08338v2, 15 p.
- Claeskens J.-F. (2003) *Les mirages gravitationnels et les paramètres cosmologiques*, thèse, Université de Liège.
- Combes F. (2015) *La matière noire, clé de l'univers ?* Vuibert, 182 p.
- Courtois H. (2020) *Voyage sur les flots de galaxies. Laniakea, et au-delà*, Dunod, 208 p.
- Essen L., Gordon-Smith A.C. (1947) The velocity of propagation of electromagnetic waves derived from the resonant frequencies of a cylindrical cavity resonator, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical sciences*, 348.
- Evans J., Nandi K.K. & Islam A. (1996) The optical-mechanical analogy in general relativity: exact newtonian forms for the equation of motion of particles and photons, *General relativity and gravitation*, 28, 4, 413-439.
- Feynman R.P. (1964) *The Feynman lectures on physics*, California Institute of Technology, en ligne.
- Fleury P., Dupuy H. & Uzan J.Ph. (2013) Interpretation of the Hubble diagram in a non-homogeneous universe, *Physical Review D*, 87, 123526.
- Folger T. (2022) Espace interstellaire: la deuxième vie des sondes « Voyager », *Pour la Science*, 540, 24-35.
- Gasparini A. (2020) *Cosmologie et relativité générale, une première approche*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 198 p.
- Giovannini D., Romero J., Potocek V., Ferenczi G., Speirits F., Barnett M., Faccio D. & Padgett M.J. (2015) Spatially structured photons that travel in free space slower than the speed of light, *Science*, 347, 6224, 857-860.
- Goyon C., Edwards M.R., Chapman T., Divol L., Lemos N., Williams G.J., Mariscal D.A., Turnbull D., Hansen A/M. & Michel P. (2021) Slow and fast light in plasma using optical wave mixing, *Phys. Rev. Lett.*, 126, 6 p..
- Greaves E.D., Rodriguez A.M. & Ruiz-Camacho J. (2009) A one-way speed of light experiment, *Am. J. Phys.* 77, 10, 894.
- Guth A. (1981) Inflationary universe: a possible solution to the horizon and flatness problems, *Physical Review D*, 23, 2, 347-356.
- Guy B. (2010a) Les relations de Lorentz et le temps : proposition d'utilisation d'un paramètre tri-dimensionnel défini par un déplacement. La question du temps en physique. En ligne sur le site archive.org.
- Guy B. (2010b) A modified law of gravitation taking account of the relative speeds of the moving masses. A preliminary study, <hal-00472210>.
- Guy B. (2011) Penser ensemble le temps et l'espace, *Philosophia Scientiae*, 15, 3, 91-113.
- Guy B. (2013) Sur la « vitesse » de la lumière et sa mesure : disparition des étalons d'espace et de temps ; l'étalon de mouvement ; <hal-00814874>; et communication au 22^e Congrès général de la société française de physique, Marseille, Juillet 2013 (P082).
- Guy B. (2015) Sur l'âge et le vieillissement comparés de deux jumeaux (théorie de la relativité), <hal-01196320>.
- Guy B. (2016) Relier la mécanique quantique et la relativité générale : réflexions et propositions <hal-00872968>.
- Guy B. (2019a) *ESPACE = TEMPS. Dialogue sur le système du monde*, Paris : PENTA Editions.
- Guy B. (2019b) La transformation de Lorentz, le temps et l'espace. Généralisation du facteur γ en fonction de la direction du mouvement caché dans les horloges, 25^e Congrès général de la Société française de physique, Nantes Poster 40 <hal-02068970>.

- Guy B. (2022a) Eléments d'histoire des concepts de temps et d'espace : rôle du mouvement, glissements de sens, <hal-03442268>.
- Guy B. (2022b) Does movement precede space and time? The contribution of relational thinking and embodied cognition, <hal-03713817>.
- Guy B. (2022c) La pensée complexe du temps, The Conversation, France, 19 juillet.
- Hau L.V., Harris S.E., Dutton Z. & Behroozi C.H. (1999) Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas, *Nature*, 397, 594.
- Herrmann S., Senger A., Kovalchuk E., Müller H. & Peters A. (2005) Test of the isotropy of the speed of light using a continuously rotating optical resonator, *Physical Review Letters*, 95.
- Heyvaerts J. (2006) *Astrophysique: étoiles, univers et relativité*, Dunod, Paris, 370 p.
- Huterer D. & Turner M.S. (1999) Prospects for probing the dark energy via supernova distance measurements, *arXiv*.
- Lachièze-Rey M. (2020) *Initiation à la cosmologie*, Dunod, 152 p.
- Landau L. & Lifchitz E. (1970) *Théorie des champs*, Physique théorique, tome II, Mir, Moscou, 494 p.
- Lee A.R. and Kalotas T.M. (1975) Lorentz transformations from the first postulate, *Am. J. Phys.*, 43, 5, 434-437.
- Lepeltier Th. (2014) *La face cachée de l'univers*, Seuil, 246 p.
- Lepeltier T. & Bonnet-Bidaud J.M. (dir) (2012) *Un autre cosmos ?* Vuibert, Paris, 148 p.
- Lequeux J. (2008) Milieu interstellaire, *Encyclopedia Universalis*, Paris, tome 12, 831-834.
- Lévy-Leblond J.M. (1976) One more derivation of the Lorentz transformation, *Am. J. Phys.* 44, 3, 271-277.
- Lévy-Leblond J.M. (2001) De la relativité à la chronogéométrie, ou : pour en finir avec le second postulat et autres fossiles, *Colloque de Cargèse, « Le temps »*, 5 p.
- Maeder A. (2017a) An alternative to the Λ CDM model: the case of scale invariance, *The Astrophysical Journal*, 834, 2.
- Maeder A. (2017b) Dynamical effects of the scale invariance of the empty space: the fall of dark matter? *The Astrophysical journal*, 849, 2.
- Magueijo J. (2000) Stars and black holes in varying speed of light theories, *arXiv*, 14 p.
- Magueijo J. (2003a) New varying speed of light theories, *Rep. Prog. Phys.*, 66, 2025-2068.
- Magueijo J. (2003b) *Plus vite que la lumière*, Dunod, 324 p.
- McGaugh S.S. (2014) The third law of galactic rotation, *Galaxies*, doi: 10.3390, 23 p.
- McGaugh S.S., Lelli F. & Schombert J.M. (2016) The radial acceleration relation in rotationally supported galaxies, *arXiv*: 1609.05917v1.
- Michelson A.A., Pease F.G. & Pearson F. (1935) Measurement of the velocity of light in a partial vacuum, *Astrophysical Journal*, 82, 26.
- Milgrom M. (2002) MOND theoretical aspects, *New Astronomy Reviews*, 46, 741-753.
- Mizony M. (2017) Que vaut la constante de Hubble ? <hal-01579377v1>.
- Möller (1952) *The theory of relativity*, Clarendon Press, Oxford, en ligne sur archive.org.
- Moore Th. A. (2014) *Relativité générale*, traduction française Richard Taillet, De Boeck, 482 p.
- Morin E. (2014) *Introduction à la pensée complexe*, Seuil, 160 p.
- Müller H., Herrmann S., Braxmaier C., Schiller S. & Peters A. (2003) Modern Michelson-Morley experiment using cryogenic optical resonators, *Physical Review Letters*, 91, 2,
- Nandi K.K. & Islam A. (2009) On the optical-mechanical analogy in general relativity, *arXiv*, 11 p.
- Pailler F. (2022) Colombe: « De quelles couleurs sont les étoiles ? », The Conversation France, 22 octobre.
- Patrel G. & Teerikorpi (2006) The extragalactic cepheid bias: a new test using the period-luminosity-color relation, *Astronomy and Astrophysics*, 452, 423-430.
- Patrel G., Teerikorpi T. & Baryshev Y. (2017) Hubble law: measure and interpretation, *Special Issue on the foundations of astrophysics and cosmology*, 22 p.
- Petit J.-P. (1988) Cosmological model with variable light velocity: the interpretation of red shifts, *Modern Physics Letters A*, 3, 18, 1733.
- Poincaré H. (1902) *La science et l'hypothèse*, Flammarion.
- Poincaré H. (1905) *La valeur de la science*, Flammarion.
- Rayleigh F.R.S. (1899) On the transmission of light through an atmosphere containing small particles in suspension, and on the origin of the blue of the sky, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 47:287, 375-384.

- Riis E., Aaen Andersen L.U., Bjerre N. & Poulsen O. (1988) Test of the isotropy of the speed of light using fast-beam laser spectroscopy, *Physical Review Letters*, 60, 2, 81.
- Rodrigues G. & Bengaly C. (2021) A model-independent test of speed of light variability with cosmological observations, *arXiv:2112.01963*, 13 p.
- Rosset C. (2003) *Contribution à la mesure de la polarisation du fond diffus cosmologique dans le cadre des programmes Archeops et Planck*, thèse doctorat Université Paris 7, 197 p.
- Rubin V.C. & Ford W.K. (1970) Rotation of the Andromeda Nebula from a spectroscopic survey of emission regions, *The Astrophysical Journal*, 159, 379.
- Sarazin X., Couchot F., Djannati-Atai A. & Urban M. (2018) Can the apparent expansion of the universe be attributed to an increasing vacuum refractive index? *ArXiv*, 9 p.
- Schaefer B.E. (1999) Severe limits on variations of the speed of light with frequency, *Physical Review Letters*, 82, 25, 4964.
- Selleri F. (1996) Noninvariant one-way velocity of light, *Foundations of physics*, 26, 5, 641.
- Smolin L (1997) *The life of the cosmos*, Oxford University Press.
- Smolin L (2008) *The trouble with physics*, Penguin books ltd.
- Straumann N. (2000) Reflections on gravity, *ArXiv*, 26 p.
- Sus A. (2014) Dark matter, the Equivalence principle and modified gravity, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 45, 66-71.
- Taillet R., Villain L. & Febvre P. (2013) *Dictionnaire de physique*, De Boeck, Bruxelles, 900 p.
- Terry J.N., Patrel G. & Ekholm T. (2002) Local velocity field from sosie galaxies, 1. The Peebles' model, *Astronomy and Astrophysics*, 393, 57-68.
- Uzan J.-Ph. et Lehoucq R. (2005) *Les constantes fondamentales*, Belin, Paris, 488 p.
- Uzan J. Ph. (2022) Que nous enseigne l'accélération de l'expansion cosmique ? Conférence à Lyon, Société française de physique.
- Vaihinger H. (1923) *La philosophie du comme si*, préface et traduction par Christophe Bouriau. Nancy: Philosophia Scientiae, numéro spécial, 8, 2013.
- Will C.M. (1992) Clock synchronization and isotropy of the one-way speed of light, *Physical Review D*, 45, 2, 403.
- Zwicky F. (1933) Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln, *Helvetica Physica Acta*, 6, 110-127.

Tableau

Puissance i du paramètre α	Valeur proposée (environ)	Equations vérifiées par α^i (et par d'autres paramètres)
$i = 1$ $\alpha^1 = \alpha$	2.4	$r = v_m/c_0 = v_a/c_c$ ratio Doppler $\alpha = v_m/v_a = c_0/c_c$ vitesse « mesurée » / vitesse attendue (étoiles lointaines) vitesse lumière vide/ vitesse lumière cosmos Indice optique (milieu cosmologique)
$i = 2$ α^2	6	$\alpha^2 = \rho_{\text{CDM}}/\rho_b$ densité matière noire (CDM = <i>cold dark matter</i>) / densité matière baryonique b $\theta = \frac{4G(\frac{M}{\alpha^2})}{d(c_0/\alpha)^2}$ mirage gravitationnel : angle θ , G constante de gravitation, M masse perturbatrice $\left(\frac{H}{\alpha}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \left(\frac{\rho}{\alpha^2}\right)$ H constante de Hubble, ρ densité de matière totale (CDM + b)
$i = 4$ α^4	36 soit $\alpha^4 - 1 = 35$	$\alpha^4 - 1 = \rho_\Lambda/\rho_b$ densité énergie sombre /densité matière baryonique $\alpha^4 - 1 = T_{\mu\nu}^{(\Lambda)}/T_{\mu\nu}^{(m)}$ Tenseur énergie-impulsion énergie sombre / T. e. i. matière baryonique

Tableau 1 Synthèse des résultats concernant les puissances du paramètre α

Le paramètre α et ses différentes puissances rassemblent les solutions proposées aux problèmes cosmologiques évoqués dans le présent article. A la puissance 1, soit α , il régit le rapport des vitesses ‘mesurées’ aux vitesses ‘attendues’ pour les étoiles dans les galaxies, et pour les divers mouvements célestes qui montrent un besoin de matière noire. A la puissance 2, soit α^2 , il exprime le rapport entre la quantité de matière noire et celle de matière baryonique dans l’univers. A la puissance 4, soit α^4 auquel on soustrait 1, il exprime le rapport entre le contenu en énergie sombre et celui de la matière baryonique dans l’univers. Matière noire et énergie sombre sont pour nous le nom des corrections à faire pour compenser l’‘erreur’ d’appréciation concernant la vitesse de la lumière à l’échelle cosmologique.

Figures

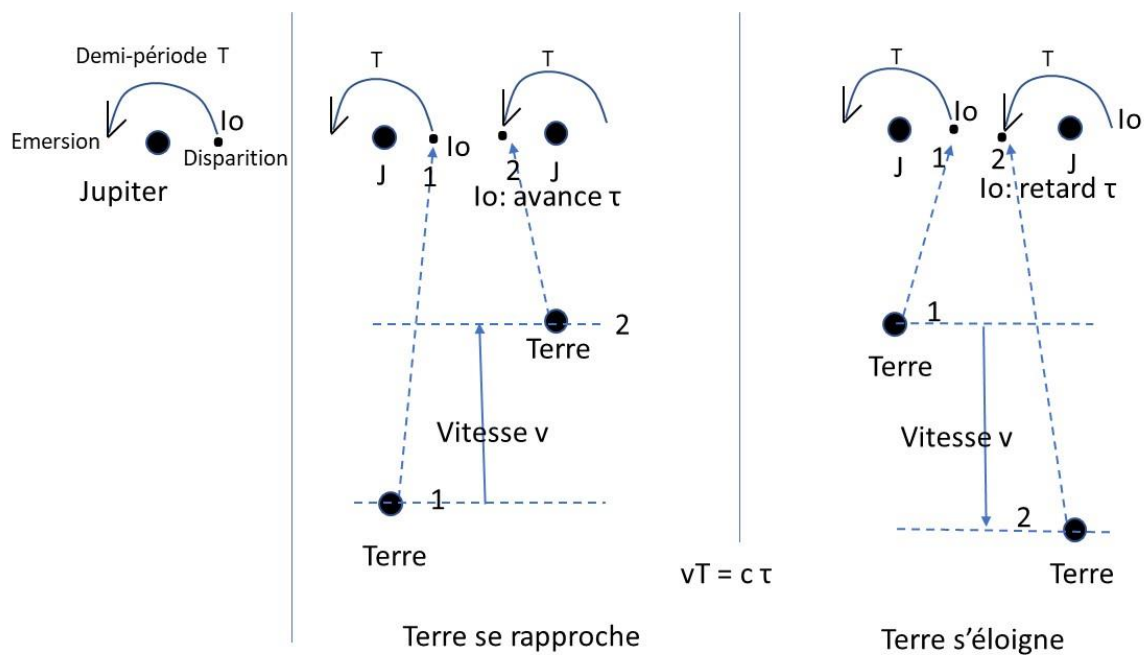


Figure 1. Vitesse de la lumière et occultations du satellite Io de Jupiter (Römer)

A gauche : Io contourne Jupiter avec une demi-période notée T (entre la disparition et l'émerision). *Au centre* : observations depuis la terre quand celle-ci se rapproche de Jupiter à la vitesse v . Dans la position 1, on voit disparaître Io ; dans la position 2, après un parcours de la terre de longueur vT , on voit réapparaître Io avec une avance τ par rapport à T . L'avance τ correspond au trajet vT effectué par la lumière à la vitesse c ; on a donc $c \tau = vT$ ou encore $v/c = \tau / T$. *A droite* : la terre s'éloigne de Jupiter et voit la réapparition de Io avec un retard τ ; mêmes relations entre les grandeurs (raisonnement semi-quantitatif).

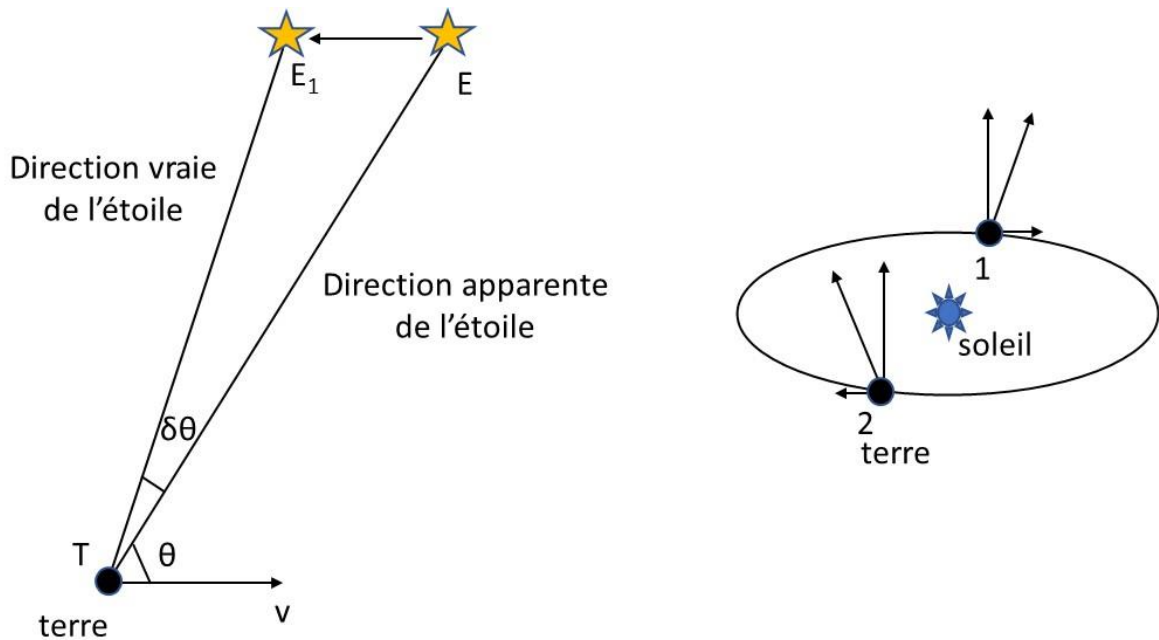


Figure 2. Vitesse de la lumière et aberration stellaire (Bradley)

A gauche : angle $\delta\theta$ marquant la différence entre la direction vraie d'une étoile et sa direction apparente, du fait du mouvement de la terre autour du soleil ; la vitesse de la lumière en provenance de l'étoile (vecteur E_1T) se compose avec le vecteur v (EE_1) pour donner le vecteur résultant ET . Schéma à droite : dans l'explication précédente, on a idéalisé à un moment donné ce qui repose sur la comparaison d'observations tout au long de l'année (en particulier les positions 1 et 2 de la terre sur son orbite autour du soleil, à six mois d'intervalle). L'angle $\delta\theta$ est petit et vaut approximativement v/c (évalué par comparaison de deux angles mesurés à six mois d'intervalle).

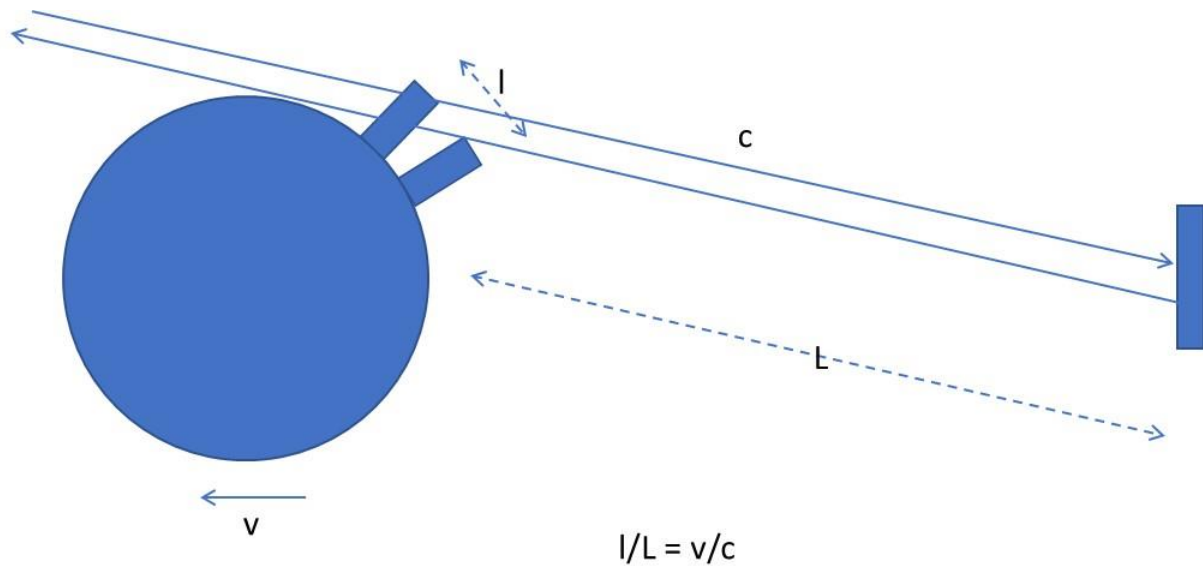


Figure 3. Mesure de la vitesse de la lumière par Fizeau et Foucault

Une roue dentée tourne à la vitesse périphérique v . Elle comporte des dents séparées de vides, distants entre elles de l , qu'un faisceau de lumière traverse. La lumière se réfléchit sur un miroir distant de la longueur $L/2$. On règle la vitesse v de telle sorte que la lumière ait le temps de faire un aller et retour (soit un trajet de longueur L) pendant que la roue dentée effectue le trajet d'une dent à une autre, soit v . Cela se fait pendant le temps $\Delta t = L/c = l/v$. On en tire la relation indiquée dans le texte.

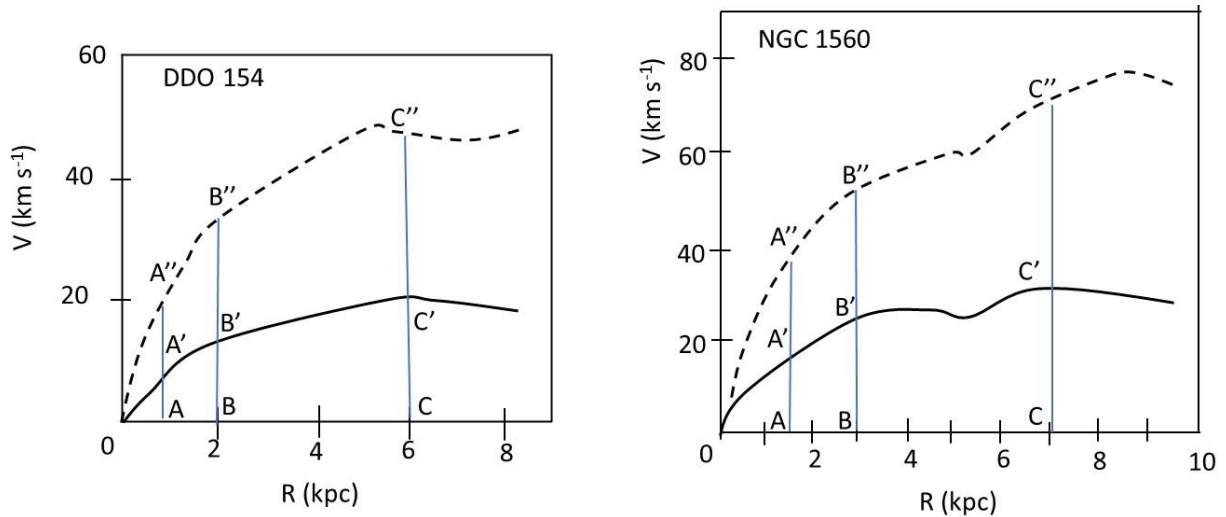


Figure 4 : vitesse des étoiles dans les galaxies spirales

Deux galaxies spirales ont été choisies dans McGaugh (2014) : la galaxie DDO 154 à gauche, la galaxie NGC 1560 à droite. Les vitesses de rotation des étoiles sont figurées en ordonnée (km/s), leur distance au centre de la galaxie est notée R, en abscisse (kpc). Deux courbes sont représentées pour chaque galaxie : en traits pointillés les valeurs « mesurées » (points originaux dans l'article cité) ; en trait plein, les valeurs estimées à partir des hypothèses faites sur la quantité de matière baryonique et sa distribution dans la galaxie. En fonction de R croissant, on constate une montée nette des vitesses puis une stabilisation en un plateau, avant une légère redescente. Les vitesses dans les parties montantes des deux courbes présentent un rapport constant (les pentes ne sont pas strictement rectilignes, mais le ratio entre les valeurs des vitesses reste en gros constant). Ce rapport est le même sur les plateaux où il se lit de façon particulièrement visible. C'est-à-dire que l'on a $AA''/AA' \approx BB''/BB' \approx CC''/CC'$ pour chacune des deux galaxies. Pour DDO 154, les rapports sont respectivement égaux à 2,3 ; 2,5 et 2,4 ; pour NGC 1560, les rapports sont respectivement égaux à 2,4 ; 2,3 et 2,3 (estimations approximatives). Ce sont donc aussi les mêmes rapports que l'on trouve dans les deux galaxies différentes.

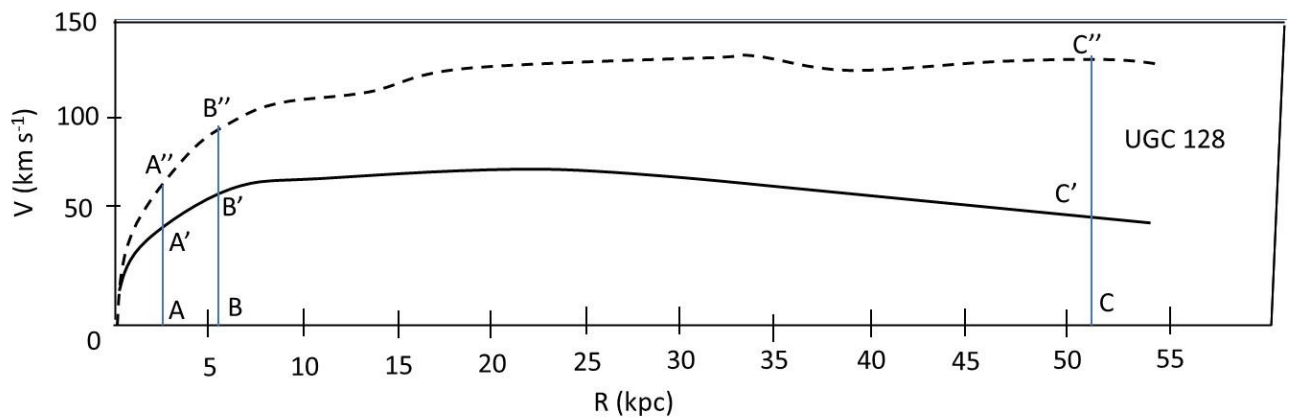


Figure 5 : Courbe $v(R)$ pour la galaxie spirale UGC 128

Courbe en pointillés : mesures ; courbe en trait plein : valeurs attendues. Nous pouvons faire les mêmes commentaires que pour la figure précédente. A savoir que l'on distingue deux parties, la première pour des R petits voit l'augmentation forte des vitesses avec la distance au centre, la seconde une stabilisation et légère décroissance. Les rapports de vitesses sont aussi approximativement égaux, c'est-à-dire que $A''A/A'A \approx B''B/BB' \approx C''C/CC'$ (valeurs respectives 1,5 ; 1,9 et 2,5).

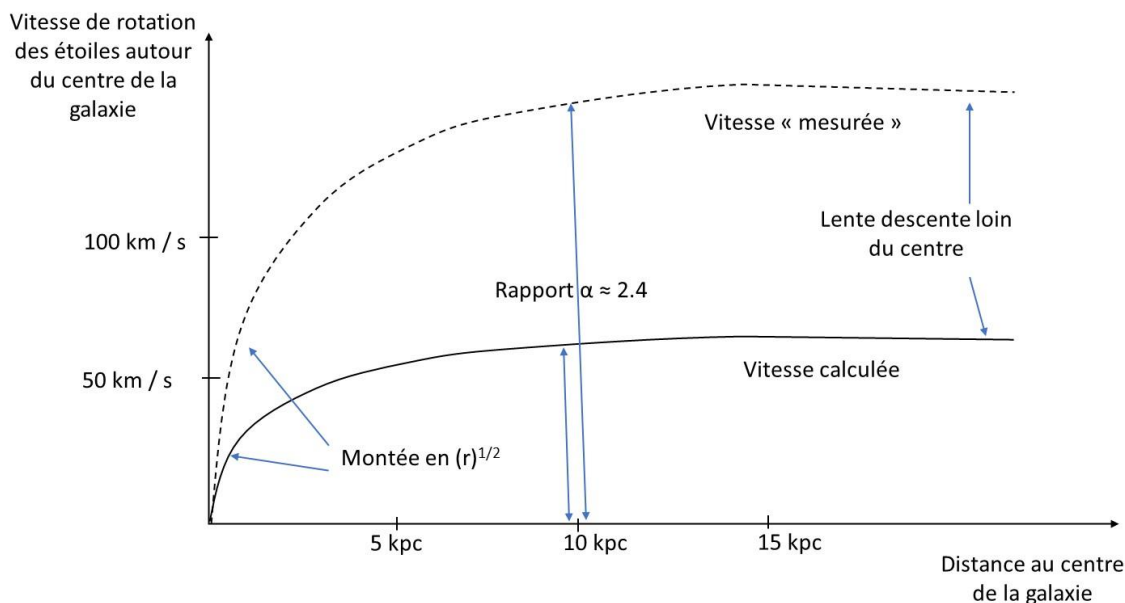


Figure 6 : Courbes de rotations idéalisées des étoiles dans les galaxies spirales

Nous idéalisons ici le comportement des vitesses des étoiles dans les galaxies spirales sur la base des deux figures précédentes (vitesses en ordonnée, distances en abscisse). La montée depuis le centre se fait verticalement à l'origine ($v(r)$ en $(r)^{1/2}$ pour une densité de matière constante). Il y a ensuite stabilisation et décroissance lente des courbes de vitesses lorsque la densité décroît. Le rapport entre la vitesse mesurée et la vitesse calculée reste constant et égal à α (voisin de 2,4), pour les différentes distances au centre, autant dans la partie ascendante que dans le plateau. Vitesses (en km/s) et distances (en kpc) données à titre indicatif. On repère au total dans McGaugh et McGaugh et al. (op. cit.) les rapports de vitesses suivant (estimés sur les plateaux externes) : 2 (NGC 7814), 2,4 (NGC6503), 1,7 (NGC7331), 2,5 (DDO154), 2,6 (UGC128), 2,3 (NGC1560), 5 (NGC3741). La moyenne (sans valeur statistique) vaut 2,6 (sans la valeur 5 éloignée du troupeau, elle vaut 2,3). Nous avons idéalisé un rapport unique voisin de 2,4 (voir aussi figure suivante). On constate que, non seulement les ratios présentent une constance pour les différents R d'une même galaxie, mais également d'une galaxie à l'autre. Des études statistiques seraient nécessaires pour cerner davantage ce ratio.

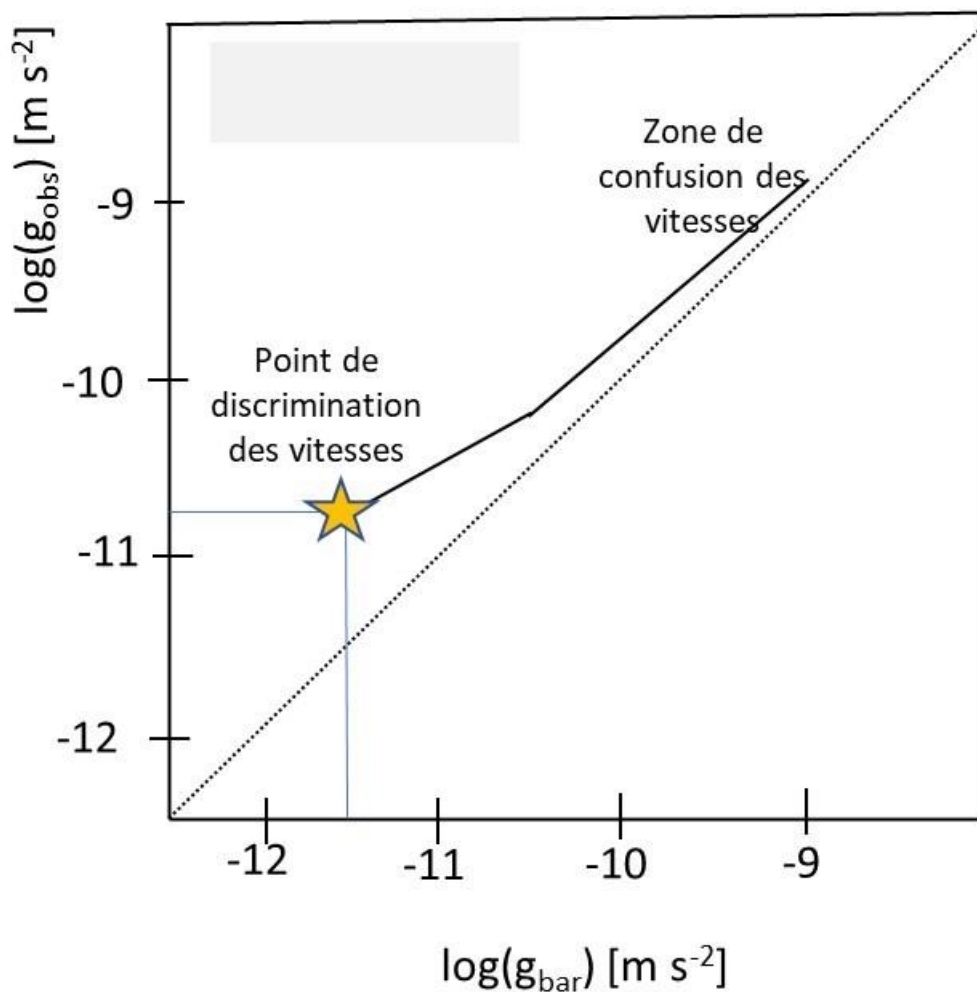


Figure 7 : Compilation des données de McGaugh et al. (2016)

McGaugh *et al.* (2016) ont compilé 2693 mesures de vitesses d'étoiles dans 153 galaxies. Ils ont pu, pour chacune d'elles, donner une estimation du potentiel de gravitation responsable de la vitesse observée soit g_{obs} (en ordonnée) en fonction du potentiel de gravitation calculé à partir de l'observation de la matière baryonique, soit g_{bar} (en abscisse). Toutes choses égales par ailleurs, le rapport des potentiels de gravitation est égal au rapport des carrés des vitesses. Les auteurs mettent en évidence une courbe figurée ici en noir plein, selon laquelle, pour les fortes accélérations, c'est-à-dire les faibles distances R au centre de la galaxie, les deux potentiels s'identifient (asymptote de pente 1, en pointillés) alors que pour les faibles potentiels (grandes distances au centre) on s'éloigne de l'asymptote et on a un écart entre les deux valeurs (point symbolisé par l'étoile). Dans notre interprétation, il n'y a pas de différence de comportement entre les faibles et fortes distances au centre : chaque fois que nous pouvons voir un rapport de vitesses de façon précise, il est le même, ce qui nous fait dire qu'il en est de même pour le rapport des potentiels, c'est le point étoile bien mis en évidence pour les faibles accélérations. Pour les fortes accélérations, tout un ensemble de facteurs font qu'il y a le plus souvent confusion des vitesses et donc des potentiels (voir texte). Au point étoile on a approximativement $\log(g_{\text{bar}}) = -11,5$, $\log(g_{\text{obs}}) = -10,7$ dont la différence vaut 0,8. Le rapport des g vaut donc $10^{0,8}$, et le rapport des vitesses vaut donc la racine carrée de ce dernier nombre, soit $10^{0,4}$, voisin de 2,5. Nous ne savons pas combien de galaxies sont cachées dans la zone du point étoile (y en a-t-il davantage que les quelques galaxies que nous avons examinées ?).

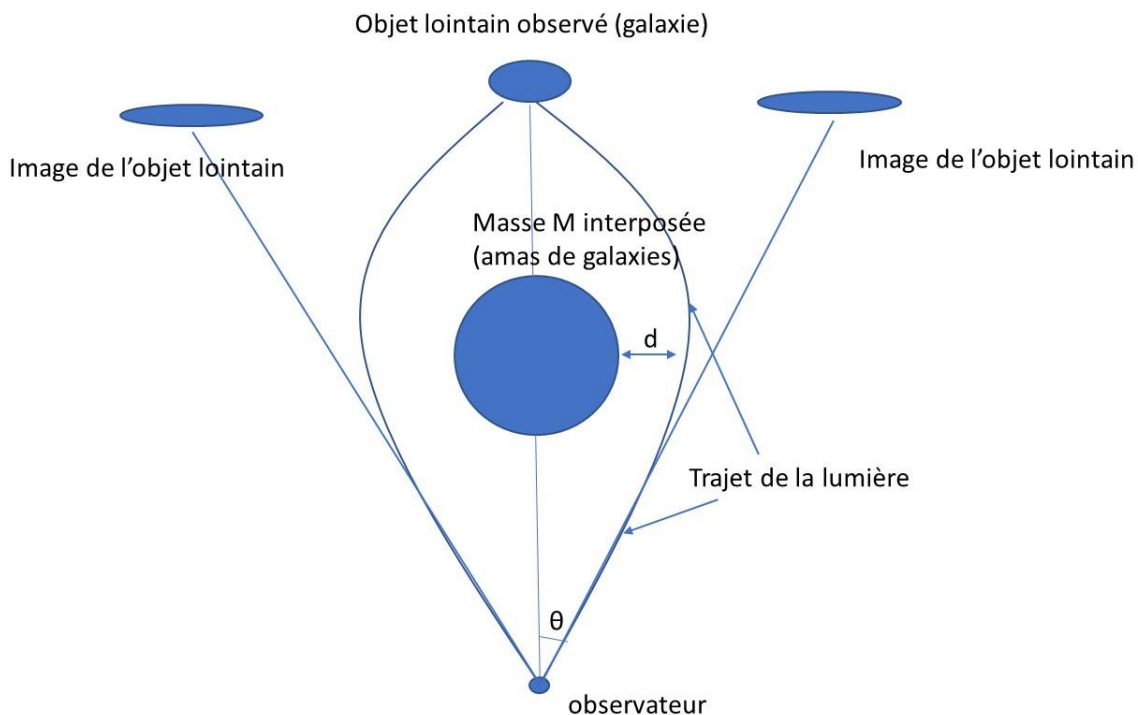


Figure 8. Mirages gravitationnels

Un observateur tourne son regard vers un objet distant, par exemple une galaxie ; entre eux se situe une autre galaxie, ou un amas, de masse M . En conséquence, le rayon en provenance de l'objet lointain, passant à la distance d de lui, est courbé ; il peut contourner l'objet par plusieurs côtés et plusieurs images peuvent être visibles par l'observateur. Ce phénomène est modélisé dans le cadre de la relativité générale. L'angle θ entre la direction vraie et la direction apparente (image) vérifie $\theta = 4GM/dc^2$, où G est la constante de gravitation et c la vitesse de la lumière (voir les hypothèses simplificatrices d'obtention de cette relation dans les ouvrages de relativité générale). Nous discutons dans le texte la valeur à accorder à c et la correction éventuelle à faire, liée à M , pour un même θ .

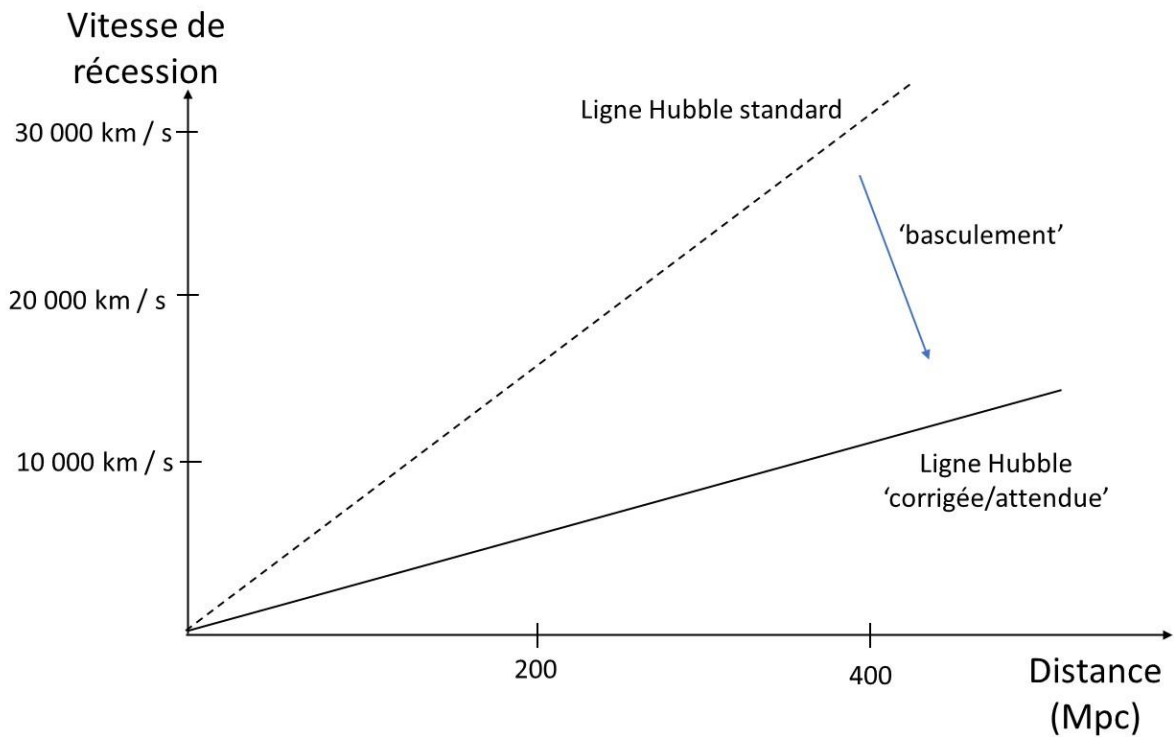


Figure 9. Proposition de révision du diagramme de Hubble

On représente en abscisse les distances des galaxies en Mpc, en ordonnée leurs vitesses de récession en km/s. La ligne en pointillés correspond à celle que l'on peut construire aujourd'hui à partir d'observations de diverses natures (redessiné à partir de Aubert, 2019). Dans notre hypothèse, il faut diviser les vitesses par un facteur voisin de 2.4 : cela correspond à la ligne en trait plein.

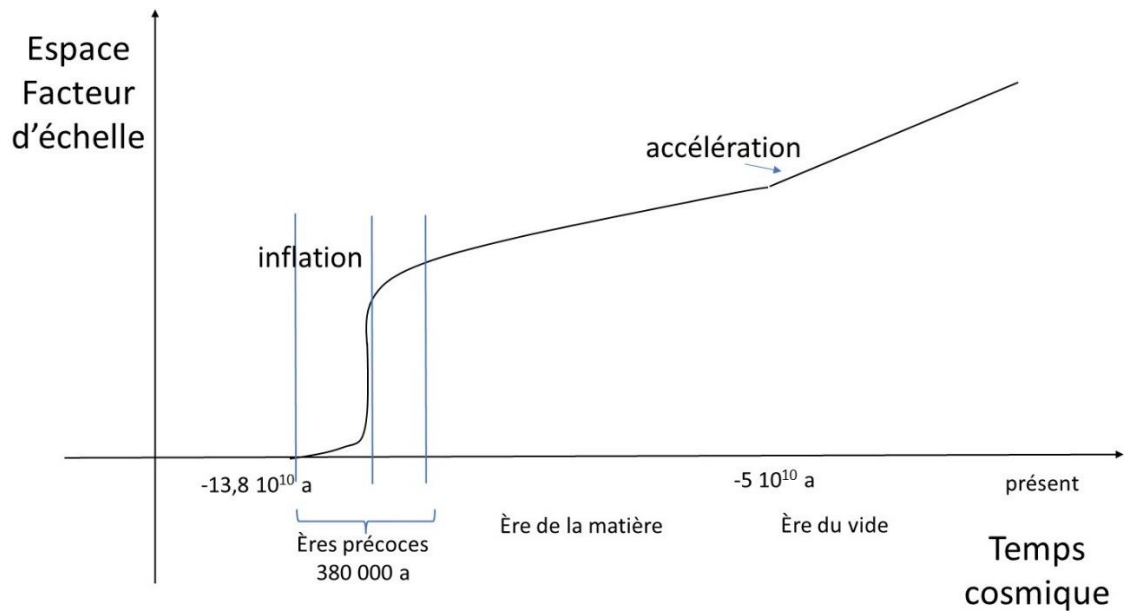


Figure 10 Grandes étapes de l'histoire de l'univers dans la conception standard

Le temps cosmique t est représenté en abscisse, le facteur d'échelle a en ordonnée (« taille » de l'univers). Mais les intervalles de temps ne relèvent pas d'une échelle unique : les « ères » précoces sont dilatées par rapport à l'ensemble de la durée s'étalant entre le big-bang et aujourd'hui (environ 13,8 milliards d'années dans la conception standard) : elles comprennent à leur tout début des durées extrêmement brèves (ère de Planck, inflation, etc.). Leur ensemble est estimé s'étaler sur 380 000 ans (âge où, en remontant le temps, on bute sur le CMB, *cosmic microwave background radiation*) à partir de quoi, il y a libération des photons et l'univers devient transparent et visible pour nous. Les échelles de temps se comptent alors en milliards d'années ; le début de l'accélération remonte à quelques 5 milliards d'années en arrière, ou quelque 8 milliards après le big-bang (ce nombre est sujet à variation suivant les auteurs).

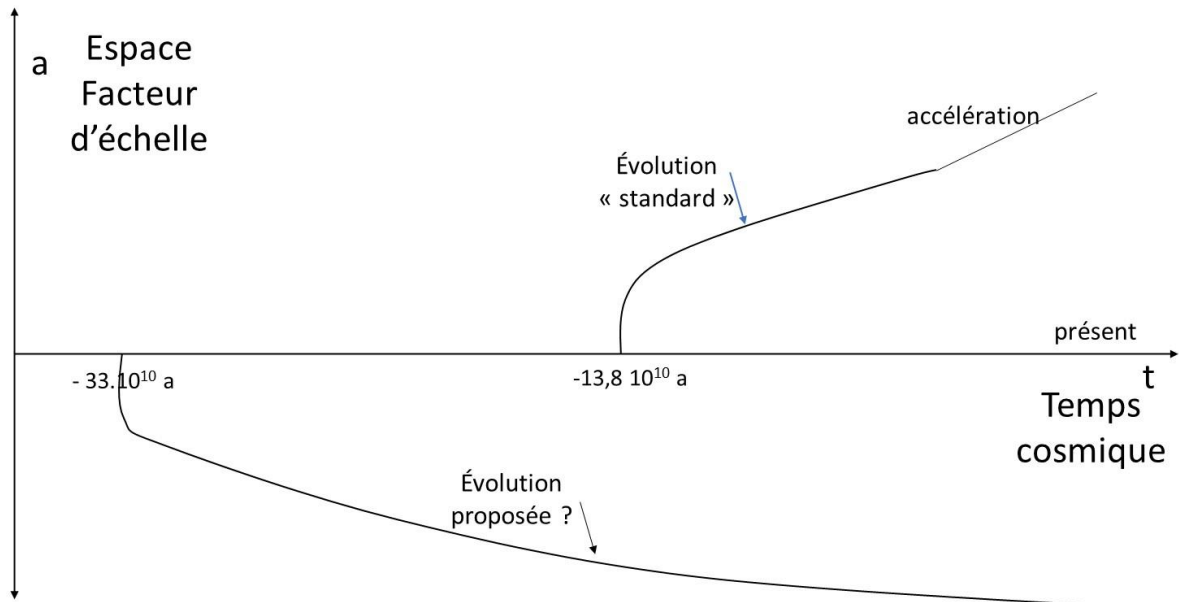


Figure 11 Histoire de l'univers rallongée

Les axes de coordonnées sont définis dans la figure précédente. On a dédoublé la dimension spatiale en mettant en regard deux évolutions (l'espace de l'expansion se développe aussi bien vers le bas que vers le haut). L'évolution admise généralement aujourd'hui est représentée dans la moitié supérieure, l'évolution proposée, plus longue, dans la moitié inférieure. On n'a pas tenté de représenter les étapes précoces qui doivent se dérouler aussi bien pour les deux évolutions, et qui sont indiquées dans la figure précédente. Alors que le big-bang est situé dans le passé à $- 13,8$ milliards d'années dans l'évolution courte, il est situé en arrière à $- 33$ milliards d'années dans l'évolution longue.

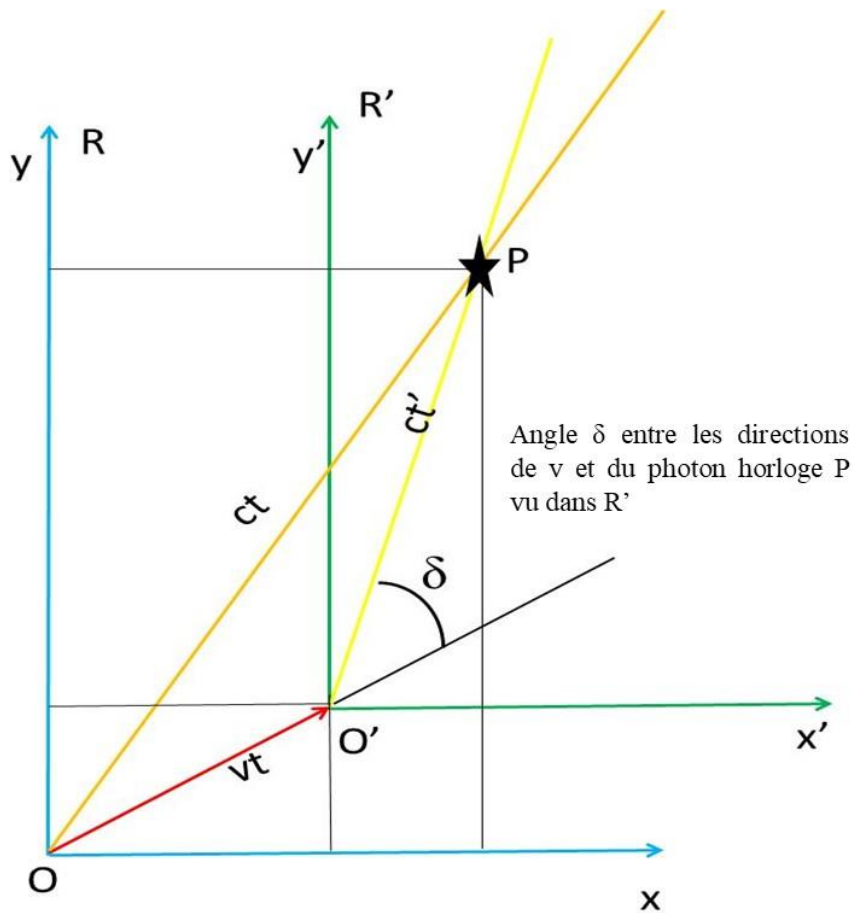


Figure 12 Aspect vectoriel des rapports v/c dans la Transformation de Lorentz

On cherche à déterminer le facteur γ de la Transformation de Lorentz dans le cas où l'angle δ entre les vitesses v (déplacement relatif des repères R et R') et c (photon horloge P) est quelconque (Guy, 2019b). Les nombres v et c sont les modules des vitesses vectorielles correspondantes. On est amené à considérer le triangle $OO'P$. Les calculs montrent que l'on a même γ pour un triangle de côtés vt , ct , ct' et pour le triangle qui aurait pour côtés t , $(c/v)t$, $(c/v)t'$. Ce qui importe *in fine*, outre l'angle δ , ce sont les rapports v/c . Cette construction fournit une aide visuelle pour comparer des mouvements dans l'espace 3D, c'est-à-dire ayant un caractère vectoriel (que l'on n'a pas en comparant simplement des modules dans v/c).

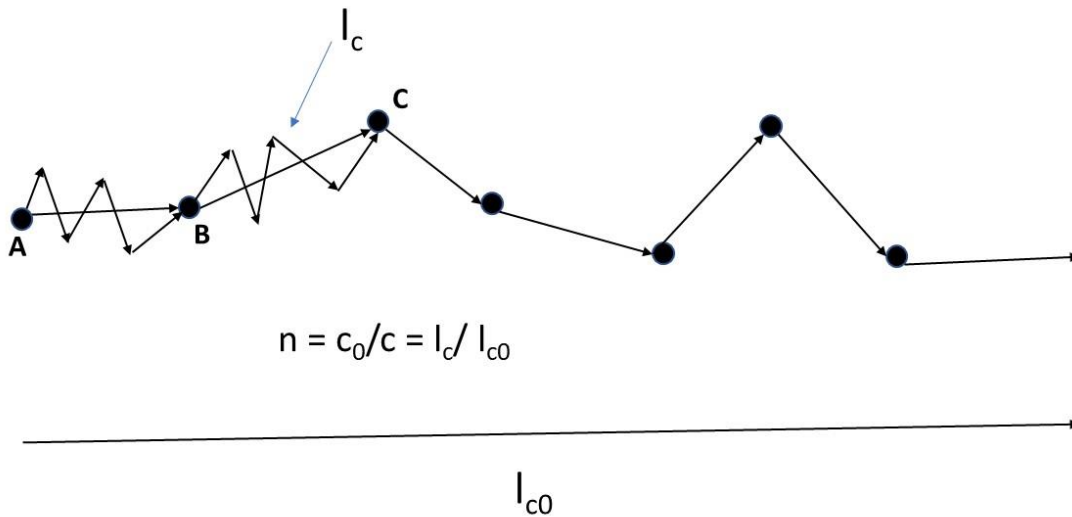


Figure 13 Trajet de la lumière dans un milieu présentant des obstacles

Dans le vide parfait (en bas sur la figure), sans interaction avec la matière, les photons de lumière effectuent le trajet de longueur l_{c0} à la vitesse maximale c_0 . Par comparaison, dans le milieu dit réfringent (en haut), ils rencontrent des atomes de matière qui les dévient par différents mécanismes gravitationnels et électromagnétiques ; ils effectuent alors un trajet en zig-zag, plus long que l_{c0} , que nous nommons l_c . D'un point de vue macroscopique, ils donnent l'impression d'aller plus lentement pour franchir la distance l_{c0} , à une vitesse c . L'indice du milieu vérifie $n = c_0/c = l_c/l_{c0}$. Le milieu cosmologique est très vaste et permet un certain caractère fractal pour le trajet en dent de scie : sur le trajet du point A au point C, le trajet (qui est déjà coudé par rapport au trajet 'direct') est lui-même fractionné. Cette circonstance, si elle se reproduit un certain nombre de fois, fait augmenter de façon significative la longueur finale, même si à une étape donnée l'accroissement est limité.

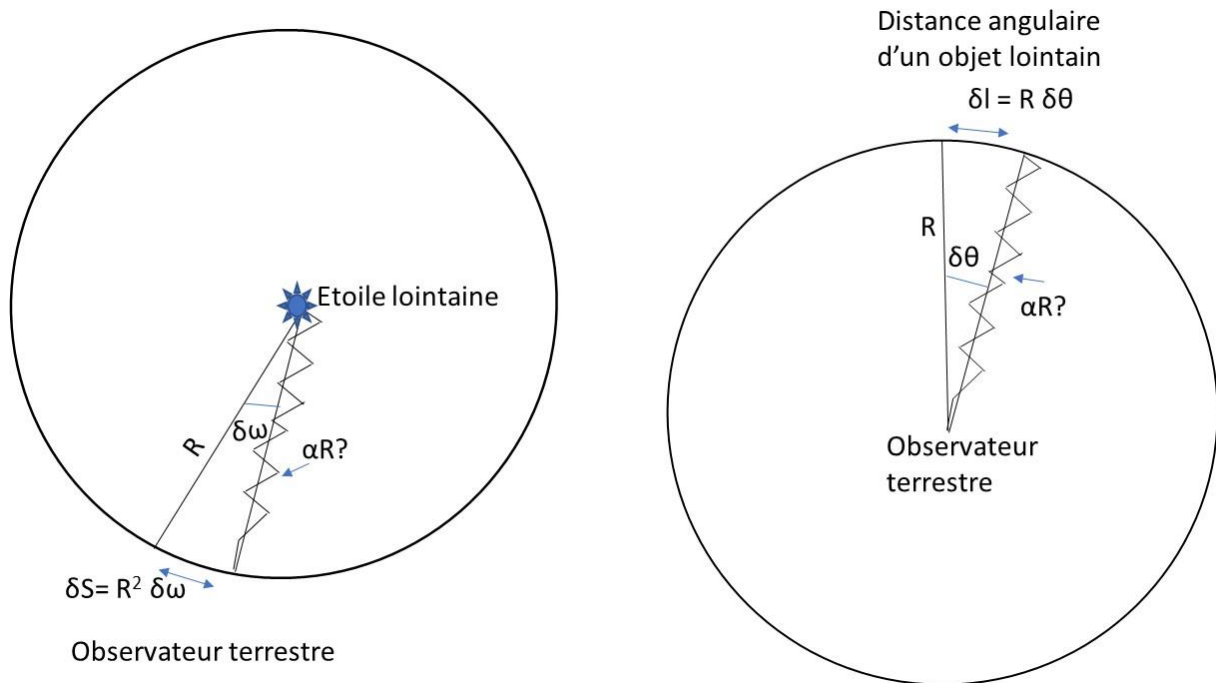


Figure 14 Distance de luminosité et distance angulaire

A gauche : une étoile lointaine envoie une partie de sa luminosité à un observateur terrestre, proportionnelle à l'élément de surface vue de l'étoile δS : l'observateur considère que cette luminosité (par rapport à la luminosité totale intrinsèque supposée connue dans une « chandelle standard ») est en proportion de la surface totale S entourant l'étoile. L'observateur « projette » une distance R euclidienne vers l'étoile, telle que $\delta S = R^2 \delta\omega$ où $\delta\omega$ est l'élément d'angle solide d'où l'on voit l'étoile. Cette distance ne correspond pas au trajet effectif de la lumière qui a transporté l'élément de luminosité δS jusqu'à l'observateur, trajet qui est en forme de zig-zag, fonction des obstacles rencontrés (interactions gravitationnelles et électromagnétiques). *A droite* : un objet ayant une extension spatiale vraie supposée connue δl est vu selon un angle $\delta\theta$ par un observateur terrestre. De même l'observateur « projette » vers l'objet une distance R telle que $\delta l = R \delta\theta$; ce n'est pas la distance parcourue par la lumière qui, comme précédemment, a un parcours sinueux depuis l'objet visé.