

## Chapitre Six

# DIFFICULTÉS DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

**1. Introduction.** - Les difficultés de la Relativité restreinte apparaissent toutes lorsqu'on essaye d'intégrer dans cette théorie l'interaction gravitationnelle. La résolution de ces difficultés mène à la Relativité générale qui est donc la Théorie relativiste de la gravitation. Cette théorie devient nécessaire lorsque les masses des corps deviennent très importantes, ou bien lorsque leurs vitesses s'approchent de celle de la lumière, tandis qu'on s'intéresse à leurs actions gravitationnelles.

**2. Egalité de la masse inerte et de la masse gravitationnelle.** - Il existe a priori deux masses différentes : la masse inerte  $m_i$  qui mesure les propriétés d'inertie des corps et intervient dans l'équation  $F = m_i \gamma$  (l'indice  $i$  fait référence à la masse inerte et n'est pas un indice de numérotation); et la masse gravitationnelle  $m_g$  qui mesure la force avec laquelle un corps agit gravitationnellement et qui intervient dans l'équation :

$$\mathbf{F} = G \frac{m_g m'_g}{r^2} \mathbf{u} \quad (6, 1)$$

$\mathbf{F}$  est la force subie par le point  $M'$ , dirigée vers  $M$  (force toujours attractive) donc opposée au vecteur  $\mathbf{u}$  défini par :

$$\mathbf{u} = \frac{\overrightarrow{MM'}}{\|\overrightarrow{MM'}\|} \quad (6, 2)$$

A priori, ces deux masses n'ont rien à voir l'une avec l'autre, et pourtant elles sont proportionnelles. En effet, pour toutes les particules, le rapport  $\frac{m_i}{m_g}$  est le même. Ces deux masses sont donc égales en choisissant la même unité.

Pour l'interaction électrostatique, il n'y a aucun rapport entre l'inertie d'un corps caractérisée par sa masse, et sa capacité d'attraction électrostatique suivant la loi de COULOMB caractérisée par sa charge électrique. Tel est le cas par exemple du muon et de l'électron, toutes deux particules rigoureusement élémentaires pour la Théorie quantique des champs, et qui ont la même charge, et pas du tout la même masse.

On sait que la Relativité restreinte établit que  $E = m_i C^2$  mais cette théorie ne traite à aucun moment de la gravitation. Or le défaut de masse d'un atome par rapport à ses constituants séparés, dû à l'énergie potentielle de l'interaction forte, est le même en terme de masse inerte et de masse gravitationnelle, ce qui paraît miraculeux. En conclusion de ce paragraphe, l'égalité entre  $m_i$  et  $m_g$ , loin d'être quelque chose de naturel, apparaît comme complètement inattendu et miraculeux; quelque chose qui s'ajoute à la Mécanique newtonienne et à la Relativité restreinte sans être englobé dans ces théories.

**3. Vérification expérimentale de l'égalité entre  $m_i$  et  $m_g$ .** - La force qui attire un corps suivant la verticale sur la Terre est principalement due à l'attraction gravitationnelle de la Terre faisant intervenir  $m_g$  (la force centrifuge due à la rotation de la Terre sur elle-même est ici négligée). Un corps en chute libre obéit donc à :

$$m_i \gamma = m_g \mathbf{g} \quad \text{soit :} \quad \gamma = \frac{m_g}{m_i} \mathbf{g}$$

Ainsi, l'égalité de l'accélération de chute libre pour tous les corps est une confirmation de l'égalité entre  $m_i$  et  $m_g$ .

C'est GALILÉE le premier qui découvrit que tous les corps tombent avec une accélération indépendante de leur masse. Son matériel expérimental consistait en un plan incliné pour ralentir la chute, et une horloge à eau pour mesurer le temps. L'expérience de chute depuis la tour de Pise de deux corps constitués de matériaux différents, qu'elle ait réellement eu lieu ou non, est restée célèbre. Un pendule simple au bout duquel on accroche différents matériaux permet également de vérifier cette égalité entre la masse inerte et la masse pesante (HUYGENS : 1629- 1695).

En 1889, la précision fut considérablement améliorée par Roland von EÖTVÖS. Il vérifia l'égalité entre  $m_i$  et  $m_g$  à  $10^{-9}$  près. EÖTVÖS utilisa le fait que sur la Terre, la force à laquelle est soumise un corps immobile est la somme de la force de gravitation appliquée par la Terre, faisant intervenir la masse gravitationnelle, et de la force d'inertie centrifuge due à la rotation de la Terre sur elle-même, faisant intervenir la masse inerte. Il en résulte que l'accélération  $\mathbf{g}$ , faisant intervenir ces deux forces, que prend un corps lâché, sera variable d'un corps à l'autre si  $m_i \neq m_g$ . Il utilise alors un pendule de torsion au deux bouts duquel sont attachés les deux corps différents A et B. L'absence de torsion permet de vérifier l'égalité entre  $m_i$  et  $m_g$ . Récemment, R. H. DICKE améliora l'expérience d'EÖTVÖS en utilisant la force d'attraction gravitationnelle du Soleil et la force centrifuge due à la rotation de la Terre autour du Soleil. Les mesures ont alors une période de 24 heures, due à la rotation de la Terre sur elle-même, permettant ainsi de filtrer les bruits éventuels. Il atteint alors la précision de  $10^{-11}$ .

Il fut montré également, avec une précision bien moindre, que les neutrons tombent avec la même accélération que la matière ordinaire, et que la force gravitationnelle subie par les électrons dans le cuivre est la même que celle subie par les électrons libres.

Une expérience actuellement envisagée est de vérifier que les antiprotons tombent exactement de la même manière que les protons.

On voit donc le long cheminement expérimental suivi par la vérification de plus en plus précise de l'égalité entre  $m_i$  et  $m_g$ . Ce cheminement avait fortement impressionné EINSTEIN, qui allait faire de cette égalité le fondement de la Relativité générale.

**4. La boîte aux deux photons.** - Reprenons cet exemple étudié au § 3 du chapitre 4. L'ensemble de la boîte et des deux photons présente une inertie caractérisée par la masse inerte  $m_i = \frac{P^0}{C} = \frac{2h\nu}{C^2}$ , due à l'énergie cinétique des deux photons, alors que la boîte elle-même a une masse nulle. Le système constitué de la boîte et des deux photons, dans son ensemble, doit donc être capable d'attirer gravitationnellement, puisque  $m_i = m_g$ . Ainsi, ce n'est plus seulement la masse au repos qui attire, mais également l'énergie potentielle (voir le paragraphe 2) et l'énergie cinétique (énergie cinétique des photons).

Rappelons ce qui a été dit au § 3 du chapitre 4 : l'énergie potentielle d'interaction (interaction forte par exemple) correspond à la composante de temps  $P^0$  du quadrivecteur impulsion-énergie des particules de champ (gluons dans le cas de l'interaction forte) assurant l'interaction. Ce sont donc toutes les composantes de temps  $P^0$  de toutes les particules contenues dans le système qui doivent avoir une action gravitationnelle. Cette composante de temps, nous l'avons nommée masse-énergie au § 3 du chapitre 4. Ceci nous oblige à revoir la loi de la gravitation universelle qui, sous sa forme newtonienne, ne fait intervenir que les masses au repos  $m_i = m_g$  des particules constituantes, et non les masses-énergies.

D'autre part, lorsqu'on change de référentiel, toutes les composantes du quadrivecteur impulsion-énergie se mélangent pour intervenir dans la nouvelle composante  $P^0$ . Suivant un raisonnement analogue à celui fait au § 19 du chapitre 5, on en conclut que toutes les composantes  $P^\alpha$  ont une action gravitationnelle. On a là déjà, la possibilité d'avoir des nombres négatifs (certains  $P^\alpha$ ) à l'origine d'effets gravitationnels. Nous reverrons cela au § 12. Nous verrons également d'autres problèmes posés par l'union de la gravitation et de la Relativité restreinte aux § 12 et § 14.

Puisque la boîte aux deux photons est capable d'attirer gravitationnellement, elle doit également être sensible à la gravitation. Remarquons à ce sujet que le même paramètre, la masse gravitationnelle, caractérise, en Mécanique newtonienne, déjà deux propriétés différentes : le rôle actif consistant à attirer gravitationnellement et le rôle passif consistant à être dévié (accélééré) par un champ de gravitation.

En particulier, on peut penser que les photons, capables d'attirer gravitationnellement par leur composante  $P^0$ , doivent être sensibles à la gravitation. On arrive à la conclusion que la lumière doit être déviée dans un champ de gravitation. Il en résulte que les équations de MAXWELL, dont on déduit la propagation rectiligne de la lumière, doivent être fausses en présence d'un champ de gravitation. Ainsi, l'électromagnétisme qui était en parfait accord avec la Relativité restreinte, pose problème lorsqu'on fait intervenir l'interaction gravitationnelle.

**5. Nécessité de cette égalité.** - Une première remarque est qu'il est nécessaire que  $m_i = m_g$  pour la structuration de l'univers tel qu'on le connaît. En effet, une planète comme la Terre par exemple exploserait immédiatement s'il n'en était pas ainsi, l'uranium, par exemple, devant orbiter autour du Soleil à une vitesse différente de celle de l'eau. Ceci car la force centrifuge qui dépend de  $m_i$  doit équilibrer la force de gravitation qui dépend de  $m_g$ . À tout le moins, si cela n'était pas suffisant pour faire exploser la Terre, cela aurait grandement gêné sa formation. Pour que les poussières interstellaires puissent se réunir en étoiles et en planètes par la gravitation et même former des structures à très grandes échelles comme les galaxies, il est nécessaire que  $m_i = m_g$ .

En effet, si  $m_i \neq m_g$ , dans un nuage de poussières interstellaires tout autour d'une étoile par exemple, des poussières de matériaux différents animées de vitesses voisines au même endroit, auraient un équilibre entre force de gravité et force d'inertie différent, et il y aurait séparation de ces matériaux. Ainsi, un corps comme la Terre, ne pourrait pas avoir rassemblé dans un volume réduit tous les

éléments nécessaires à la vie.

Certes, l'effet de marée a également tendance à faire exploser des corps trop volumineux, lorsque le gradient de gravité est important. Cependant son effet peut devenir négligeable lorsque le gradient de gravité est suffisamment faible. Dans le cas cité ci-dessus, ce n'est pas le gradient qui intervient, mais la gravité elle-même.

**6. Unification de l'inertie et de la gravitation.** - Nous avons insisté au § 2 du chapitre 5 sur le fait que le même paramètre  $q$  : la charge électrique, intervient pour l'électrostatique et le magnétisme dans les équations :

$$\mathbf{F}_1 = q\mathbf{E} \quad \text{et} \quad \mathbf{F}_2 = q\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$$

et nous avons dit que ceci était le premier indice d'une unification possible.

L'équation (5,3) montre que pour un système de charges en mouvement :

$$B \sim \frac{E}{C}$$

donc  $F_2 \sim q\left(\frac{v}{C}\right)E$ ; et  $F_2 \sim F_1 \frac{v}{C}$ . On voit que la vitesse de la lumière entre comme facteur d'échelle dans l'électromagnétisme. Pour les vitesses faibles devant celle de la lumière, la force magnétique est très faible. Pour les vitesses voisines de celle de la lumière, les deux forces ont le même ordre de grandeur.

Pour un plasma, il existe une température à partir de laquelle les particules chargées deviennent ultra-relativistes :  $v \sim C$ . Les forces électrostatiques et magnétiques ont donc alors la même intensité. Lorsque la température chute, il y a un découplage de l'intensité de ces deux forces.

Présentement, on pense que lors du refroidissement du plasma constituant l'univers après le Big Bang, il y a eu de la même manière découplage successif de l'intensité des quatre interactions fondamentales. Suffisamment tôt après le Big Bang, elles devaient toutes avoir la même intensité et être unifiées en une interaction unique.

Suivant le raisonnement précédent, le fait que le même paramètre  $m$  intervienne pour l'inertie et la gravitation nous fait penser qu'un même phénomène physique se tient caché derrière ces deux manifestations a priori déconnectées. Accordant le rôle principal à la gravitation, qui est une des quatre interactions structurant l'univers, nous pensons donc que l'inertie doit être un aspect particulier de la gravitation. Ceci mène directement au *principe de MACH* étudié au paragraphe suivant, du nom du physicien autrichien Ernst MACH (1838- 1916).

**7. La force centrifuge et le principe de Mach.** - Dès NEWTON, et même avant, les physiciens s'étaient aperçus que, si le mouvement de translation a un caractère relatif, le mouvement de rotation semble, lui, avoir un caractère absolu.

Imaginons un avion à hélices isolé dans l'espace interstellaire (ce qui est un endroit curieux pour un tel appareil, mais il s'agit d'une expérience de pensée) et supposons que l'hélice tourne par rapport à l'avion. Il semble qu'on puisse savoir d'une manière absolue si c'est l'hélice qui tourne ou bien l'avion. Il suffit d'accrocher au bout des pales de l'hélice et au bout des ailes, des ressorts se terminant par de petites masses. Les ressorts se tendront au bout du corps qui tourne à cause des forces centrifuges qui se développent dans un corps tournant.

Ce qui est remarquable, c'est qu'un corps ne tourne pas de cette manière, qu'on appelle ici absolue, quand justement il ne tourne pas par rapport aux étoiles, et que les forces centrifuges se développent quand le corps tourne par rapport aux étoiles.

Le physicien et philosophe (évêque irlandais 1685- 1753) George BERKELEY fut le premier à émettre des critiques sur la notion d'espace absolu qu'il considérait comme une notion purement métaphysique sans support expérimental suffisant, et dont on pourrait peut être, dans une meilleure théorie, se passer. Il affirma qu'en fait, la réalité physique consiste en l'ensemble de ces étoiles constituant un ensemble de masses gigantesques. L'idée de MACH, que l'on appelle maintenant *principe de MACH*, est que ce sont justement les étoiles et plus généralement toutes les masses de l'univers qui sont responsables des forces centrifuges, et plus généralement de toutes les forces d'inertie par une action gravitationnelle. On fait ainsi l'économie d'une coïncidence troublante.

On comprend en effet alors pourquoi  $m_i = m_g$ ; l'inertie est due à une action gravitationnelle de l'ensemble des masses de l'univers imposant que le corps donné ait "en moyenne" une accélération nulle par rapport à l'ensemble de l'univers.

"en moyenne" est un terme demandant à être précisé dans une théorie complètement machienne; et nous verrons que la Relativité générale, bien qu'intégrant logiquement le principe de MACH, n'est pas complètement machienne.

**8. La philosophie positiviste.** - Il est à noter que BERKELEY a une conception philosophique dans la mouvance de ce qui allait devenir la *positivisme*. Ce mouvement voulait se débarrasser des présupposés métaphysiques inutiles à la science et se cantonner aux grandeurs observables.

Pour BERKELEY, puis le physicien positiviste Ernst MACH, l'espace absolu était une telle conception métaphysique inobservable, donc vide de sens.

Par leurs critiques de la Mécanique newtonienne et de cette notion d'espace absolu, ils ont fait progresser la science en préparant la venue de la Relativité générale. MACH a beaucoup influencé EINSTEIN. Le remplacement de l'espace absolu par l'ensemble des étoiles était un grand progrès.

Cependant, si il faut toujours soumettre à la critique les concepts métaphysiques à la base de la science, il est vain de vouloir les éliminer tous. La conception positiviste extrême mène à la négation de toute réalité explicable par la science.

A force de rejeter toute métaphysique, et tout concept non directement relié à l'expérience, on arrive en effet à une science où la

priorité est donnée aux sensations directes. On arrive alors à des absurdités. Ainsi, Auguste COMTE affirma que cela n'avait pas de sens de parler de la température des étoiles ou de leur composition chimique, dans la mesure où on ne pourra jamais aller sur place faire des expériences. DUHEM et BERTHELOT ainsi que MACH rejetèrent la réalité des atomes car non visibles directement. Ce n'était pour eux qu'une hypothèse commode. Plus près de nous, le fait qu'on ne puisse pas isoler les quarks hors des nucléons amène certains à dire que ce ne sont pas des objets réels, mais uniquement des calculs.

Très succinctement, on peut retracer de la manière suivante l'origine du positivisme : il vient de la reconnaissance du fait qu'à l'origine des concepts de la science, il y a des mythes métaphysiques, d'origine religieuse ou mystique parfois. Il vient alors de la volonté radicale d'éliminer toute métaphysique de la science. La science devient alors *empirique*. L'âme à la naissance est une page blanche sur laquelle les expériences sensibles écrivent peu à peu. Mais la seule théorie valable expliquant comment on peut acquérir une telle connaissance du réel uniquement à partir de l'expérience sensible et sans aucune métaphysique est la théorie de *l'induction*. La critique valable par HUME de l'induction mène alors à *l'idéalisme* (il n'y a plus de vérité) et au positivisme : les théories sont seulement des conventions ou des instruments commodes.

La conception réaliste : le *réalisme métaphysique*, est concrètement différente de la conception positiviste :

Le réalisme, en postulant l'existence d'une réalité objective compréhensible, donne la priorité aux concepts sur les équations. Il y a alors forcément des *concepts primitifs* non définissables et forcément auréolés d'un certain vague; et il y a nécessairement des concepts a priori métaphysiques c'est à dire dont on ne sait pas a priori s'ils sont falsifiables (au sens de POPPER) ou non. Tel est le cas par exemple du modèle d'univers infini de la Relativité générale a priori difficilement testable. Les positivistes, en interdisant ces préoccupations ou interrogations sous prétexte qu'elles n'ont pas un rapport avec l'observation directe bloquent la science.

Donnons un exemple concret : dans la conception réaliste, l'univers repose sur les trois concepts métaphysiques *d'espace, de temps, et de matière* ou plutôt de particule ou quanton (du nom inventé par le philosophe Mario BUNGE). De la matière peut être à un endroit à un moment donné et à un autre endroit à un autre moment. En réunissant ainsi les trois concepts, on arrive au concept de mouvement puis à sa mesure scalaire, l'énergie. On arrive à la définition suivante de l'énergie : *l'énergie est la mesure unifiée des différentes formes de mouvement*. On a alors mieux compris l'énergie que si l'on dit uniquement qu'elle est équivalente à l'équation de conservation correspondante.

La conception réaliste est plus performante du point de vue pédagogique que la conception positiviste, car dans la vie quotidienne, tout le monde adopte spontanément la position réaliste et est habitué à celle-ci. Il y a alors continuité entre la façon quotidienne de penser et la façon de penser en science.

De plus, c'est une erreur de croire que le savoir des élèves se construit directement et uniquement des observations par induction. Ce n'est pas comme cela d'ailleurs que la science s'est construite historiquement. Donnons un exemple : tous les faits d'observation étaient là (phases de la Lune etc), en ce qui concerne les marées, et depuis fort longtemps; mais on n'a réussi à comprendre les marées, et à les prévoir avec précision, que lorsque la gravitation newtonienne fut disponible, et ce fut alors très rapide.

Le positivisme a besoin de beaucoup d'expériences, chacune ayant peu d'importance. Le réalisme a besoin de peu d'expériences, mais chacune est cruciale car elle peut falsifier la théorie.

Dans la conception réaliste, une bonne théorie (dans son domaine d'application, comme la Mécanique newtonienne) est un reflet de la réalité. Elle est donc unique (à un isomorphisme près des structures, comme la mécanique des matrices de HEISENBERG et les fonctions d'onde de SCHRÖDINGER), intangible et éternelle et également vraie dans tout l'univers. De plus le progrès de la science doit nécessairement se faire de manière discontinue; car on découvre brutalement de nouveaux pans de la réalité. Il ne s'agit pas simplement d'équations de mieux en mieux approchées.

Dans la conception réaliste, la science est unificatrice et réductionniste. Puisqu'il y a une réalité et une seule descriptible par la science, la science est unique et forme un tout. Il ne peut pas y avoir de science autonome dans son domaine avec ses propres règles et échappant aux autres domaines de la science.

Le positivisme distingue souvent les expériences proches des sens directs, comme la vision d'un objet, auxquelles il accorde une part de réalité, et les théories complexes comme la structure atomique de la matière qui ne sont que des hypothèses commodes. Mais il y a continuité entre ces deux aspects, de telle sorte que la coupure est arbitraire. La reconnaissance d'un objet fait en effet déjà appel à des théories complexes comme les lois de la perspective, appréhendées spontanément par le cerveau. On ne voit jamais l'objet "directement", on voit les photons diffusés par ce dernier, suivant des lois faisant appel à des théories admises etc (c'est en ce sens que l'induction pure n'existe pas).

Une théorie physique est une construction globale, et il est possible que certains concepts de la théorie ne soient pas reliés directement à une observation. Après tout, l'espace absolu de NEWTON est une réalité physique, si l'on considère que c'est la trace locale, là où on est, de l'influence de l'ensemble des étoiles. C'est un certain état du vide au point considéré, causé par les étoiles. La Relativité générale (et le principe de MACH) ne détruit pas l'espace absolu. Elle en explique son origine, ses propriétés, et ses limites. La notion de fixité qui était attachée à l'espace absolu de NEWTON a, elle, disparu. On ne peut en effet privilégier un référentiel galiléen dont on dirait qu'il est absolument fixe. Concluons ce paragraphe en remarquant qu'une philosophie discutable fut à l'origine, dans le cas considéré d'un progrès considérable de la science, mais ce progrès fut l'œuvre de physiciens réalistes.

**9. La force de Coriolis et le principe de Mach : le pendule de Foucault.** - Pour aller plus avant dans la confirmation expérimentale du principe de MACH, nous allons utiliser le pendule de FOUCAULT. Faisant intervenir la force de CORIOLIS, il est beaucoup plus sensible qu'un simple ressort faisant intervenir la force centrifuge.

Le physicien Léon FOUCAULT (1819-1868) fit son expérience célèbre en 1851. Il attachait un pendule (constitué d'un objet en bronze très lourd suspendu au bout d'une corde) à la voûte du Panthéon à Paris. Son but était de démontrer par cette expérience la rotation de la Terre sur elle-même. GALILÉE avait montré grâce à son principe de relativité, que le mouvement de translation très rapide d'un point de la surface de la Terre lié à la rotation de la Terre sur elle-même ne donne pas lieu à des manifestations mécaniques visibles localement, mais il n'avait pas non plus prouvé que la Terre tourne sur elle-même.

Considérons, pour simplifier le raisonnement, un pendule de FOUCAULT situé au pôle nord. Dans ce cas, le plan d'oscillation du pendule est fixe par rapport à un référentiel galiléen. Il en résulte que par rapport à la surface terrestre, il tourne avec une vitesse angulaire opposée à celle de la surface terrestre par rapport au référentiel galiléen. On peut étudier directement le mouvement du pendule dans un référentiel terrestre, en utilisant la force de CORIOLIS.

Le pendule de FOUCAULT permet alors de tester la non rotation par rapport à un référentiel galiléen, dont les directions d'axes sont matérialisées très précisément par le plan d'oscillation du pendule.

Si l'on considère le Soleil, on s'aperçoit qu'il se décale de 1° environ par jour par rapport au plan du pendule. Cela est lié au fait que le centre de gravité de la Terre n'est pas l'origine d'un référentiel galiléen, la Terre tournant autour du Soleil en un an.

Toutes les étoiles visibles appartiennent à notre galaxie : la Voie lactée. Le Soleil fait un tour de la Voie lactée en 250 millions d'années. Les étoiles se décaleront donc lentement par rapport au plan d'oscillation du pendule de FOUCAULT de 1° environ en un million d'années, en ordre de grandeur.

Pour avoir une direction fixe, il ne faut pas non plus prendre la galaxie d'ANDROMÈDE, ni encore les galaxies proches, jusqu'à l'amas de la Vierge à 50 millions d'années lumières environ. Par contre, si nous prenons des galaxies à quelques milliards d'années-lumière, là certainement, plus aucun mouvement ne sera décelable.

Le pendule de FOUCAULT oscille en ignorant superbement son environnement local, faisant fi de la Terre, du Soleil, du groupe local de galaxies, du super-amas local de galaxies, contenant l'amas de la Vierge. Il obéit à l'ensemble des galaxies lointaines constituant la masse gigantesque de l'univers. Aussi, nous ne dirons plus que le plan du pendule est immobile par rapport aux étoiles, mais par rapport aux *galaxies lointaines*.

L'inertie serait alors due, d'après le principe de MACH, à l'action gravitationnelle de *l'ensemble des galaxies lointaines*.

Remarquons que le principe de MACH permet de prévoir l'existence des galaxies extérieures à la notre, ce qui fit l'objet d'un débat passionné au 19<sup>e</sup> siècle et au début du 20<sup>e</sup> siècle :

Tout groupement de matière ayant une rotation d'ensemble (moment cinétique total non nul), dans l'univers, devient progressivement plan, s'il existe des forces de friction internes.

La matière située dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation et passant par  $G$ , centre de gravité, est en effet soutenue par la force centrifuge et peut rester à distance constante de cet axe. La matière hors de ce plan tombe sur ce dernier, aucune force ne s'opposant à la gravité tendant à amasser la matière vers le centre de gravité contenu dans ce plan. Dans la mesure où il existe des forces de friction suffisantes pour ralentir un objet lors de son passage dans le plan, il finira par s'y stabiliser. Autrement, il peut y avoir un mouvement de va et vient de l'objet de part et d'autre du plan (ceci est le cas pour les amas globulaires d'une galaxie).

Il en est ainsi des anneaux autour des planètes (anneau de Saturne par exemple), du système solaire, et des galaxies ayant suffisamment de poussières et de gaz interstellaires pour assurer ces forces de friction : les galaxies spirales. Les galaxies elliptiques entièrement condensées en étoiles peuvent, elles, rester non planes.

La simple observation du ciel à l'oeil nu nous montre que la Voie lactée, notre galaxie est plane. Ceci montre donc que des forces centrifuges sont à l'oeuvre et qu'elle doit tourner par rapport à de la matière extérieure à elle (principe de MACH).

L'hypothèse la plus plausible ne lui faisant pas jouer un rôle particulier dans l'univers est alors de supposer que cette matière extérieure est constituée de galaxies semblables à la nôtre.

Ceci résout, en ce qui concerne les étoiles de notre galaxie, le problème fondamental suivant : comment se fait-il que le ciel ne nous tombe pas sur la tête? Les étoiles ne nous tombent pas sur la tête parce qu'elles sont soutenues par la force centrifuge.

En ce qui concerne les galaxies, elles ne nous tombent pas sur la tête, emportées qu'elles sont dans le mouvement général d'expansion de l'univers. Mais ce mouvement se ralentit effectivement. (si la gravité des masses seule agit. Mais, on a découvert récemment une accélération de l'expansion de l'univers due à un effet répulsif du vide, voir chapitre 18).

**10. Difficulté d'une théorie complètement machienne.** - Nous avons dit que l'inertie est un effet de la gravitation. Dans une telle théorie, on ne peut pas attribuer d'une manière intrinsèque une masse à chaque particule. Regardons en effet la différence qui existe entre un univers constitué de trois particules : 1, 2, 3; et un univers constitué de deux particules : 1, 2. Dans le premier cas, l'inertie de la particule 1 est plus grande que dans le second, car il y a plus de particules pour imposer leurs lois.

Pour une particule seule, on ne peut plus définir ni accélération ni effet gravitationnel; c'est à dire qu'on doit considérer que cette particule isolée est toujours soumise à une force gravitationnelle nulle. Toutes les autres interactions étant également absentes, la force totale est nulle. Admettons en effet que la relation  $\mathbf{F} = m\boldsymbol{\gamma}$  soit toujours vraie,  $\mathbf{F}$  étant nulle et  $\boldsymbol{\gamma}$  indéterminée donc quelconque. Cela nécessite  $m = 0$ . Cela est cohérent : la masse étant liée à l'arrière plan, lorsque ce dernier disparaît, la masse s'évanouit.

Ainsi la masse ne fait pas seulement intervenir la particule considérée, mais dépend aussi de l'univers dans son ensemble. On a donc là un exemple de non localité en physique, qui rappelle la non localité en mécanique quantique. Nous n'insisterons pas sur les inégalités de BELL et les corrélations à distance qu'elles impliquent. Prenons plutôt l'exemple des particules de spin  $\frac{1}{2}$ . On sait que pour revenir à la position initiale, il faut faire tourner la particule de  $4\pi$  et non pas de  $2\pi$ . Cela correspond au fait que le groupe de rotations n'est pas simplement connexe, mais cela fait référence au chemin complet de la rotation de l'état initial à l'état final; chemin qui correspond à un lien de la particule avec le reste de l'univers. On voit là la grande unité de la physique à travers des théories très différentes; comme si, quel que soit le chemin suivi pour progresser, on découvrirait peu à peu le même paysage.

De la même manière, on peut penser que le principe de MACH implique que des corps placés près d'une masse importante voient leur masse augmenter. Mais dans ce cas, comme dans le précédent, on peut remarquer que toutes les masses doivent augmenter dans la même proportion, les masses 1 et 2 par exemple :  $m_1 / m_2 = \text{Cte}$ . Les masses étant définies en rapport avec une masse choisie comme unité, des augmentations proportionnelles entre elles de toutes les masses sont indétectables et n'ont donc pas de réalité physique. Une augmentation globale de toutes les masses dans le voisinage considéré, peut avoir un effet de diminution des accélérations qui est peut-être bien pris en compte par les effets de ralentissement de l'écoulement du temps et de contraction des longueurs que nous découvrirons au chapitre 7.

En Relativité générale, on définit d'une manière absolue la masse d'un corps, indépendamment de considérations sur le reste de l'univers. Ainsi, la masse de l'électron est toujours la même, quelle que soit sa situation. Notons que cela est remis en cause en Electrodynamique quantique, puisque la renormalisation de la masse, fait intervenir l'interaction de l'électron avec les photons virtuels, interaction variable suivant l'environnement de l'électron.

En Théorie quantique des champs, l'idée de particules individuelles aux propriétés bien définies et fixées quel que soit l'environnement est donc ainsi mise en défaut. Il faut ainsi toujours penser l'électron entouré de son nuage de photons virtuels etc, ce nuage dépendant lui-même de l'environnement de l'électron.

**11. Relativité du mouvement de rotation et principe de Mach.** - Nous allons maintenant utiliser le principe de MACH pour passer de la relativité mathématique du mouvement de rotation à la compréhension de l'origine de la relativité physique du mouvement de rotation.

Notons que la notion de mouvement implique toujours l'existence de deux corps qui bougent l'un par rapport à l'autre, et dont l'un est choisi comme référentiel. Si l'univers était constitué par une seule boule rigide, et de rien d'autre, le problème de savoir si cette boule tourne ou non n'aurait pas de sens. Ainsi la phrase "*La Terre tourne sur elle-même.*" n'a pas en fait de sens. Si la Terre était seule, il n'y aurait pas moyen de savoir si elle tourne ou non. Ce qui a un sens, c'est de dire que la Terre tourne par rapport au Soleil, ou aux étoiles. D'ailleurs, suivant ces deux cas, on considère le jour solaire, ou le jour sidéral, la différence entre les deux venant de la rotation de la Terre autour du Soleil en un an. Mais dire que la Terre tourne par rapport aux étoiles est équivalent à dire que les étoiles tournent autour de la Terre. C'est cela que nous appelons la relativité mathématique du mouvement de rotation. En ce sens, en Mécanique newtonienne, on peut dire que la Terre tourne par rapport à l'espace absolu, mais également que l'espace absolu tourne par rapport à la Terre.

Utilisons maintenant le principe de MACH : on peut dire que la Terre tournant par rapport aux galaxies lointaines il s'y développe des forces d'inertie qui font par exemple que le pendule de FOUCAULT tourne; mais on peut dire aussi bien, et grâce à ce principe de MACH que ce sont les galaxies tournant autour de la Terre qui font tourner le pendule par une action gravitationnelle. Nous avons là la relativité physique du mouvement de rotation; c'est à dire que nous intégrons avec une loi physique précise : l'action gravitationnelle des galaxies lointaines, la relativité du mouvement de rotation.

Il faut donc trouver une théorie dans laquelle on puisse effectivement traiter les choses de cette façon. C'est de là que vient le nom de Relativité générale, car ce n'est plus seulement le mouvement de translation rectiligne uniforme qui est relatif, mais également le mouvement de rotation, et plus généralement, tout mouvement accéléré, avec une accélération quelconque. L'ensemble des galaxies lointaines constitue simplement un référentiel privilégié; dans ce référentiel, les lois de la mécanique ont effectivement une forme plus simple.

La relativité du mouvement de rotation nous amène curieusement à penser de nouveau, comme au § 10 à la non localité. Mettons brusquement un objet en rotation. Nous pouvons considérer que c'est tout l'univers qui se met à tourner dans un mouvement d'ensemble autour de l'objet. Instantanément, l'ensemble des galaxies acquiert un mouvement parfaitement corrélé autour de l'objet. Il y a donc corrélation instantanée à distance, donc non localité, comme dans l'expérience de corrélation de photons d'ASPECT vérifiant les inégalités de BELL.

**12. Interaction gravitationnelle et relativité.** - Montrons tout d'abord qu'il est nécessaire de modifier considérablement l'interaction gravitationnelle décrite par la loi :  $F = \frac{Gmm'}{r^2}$ , de façon à la rendre relativiste. Cette loi, telle quelle, traduit en effet des actions instantanées à distance. Modifier la position d'une particule, donc  $r$ , change en effet  $F$  pour les deux particules instantanément. Or on sait qu'aucune interaction ne peut se propager plus vite que la lumière. Il faut donc modifier cette loi. En particulier, une oscillation périodique d'une masse doit créer un champ gravitationnel oscillant se propageant avec une certaine vitesse, c'est à dire une *onde gravitationnelle*. Mais on sait que les ondes électromagnétiques font intervenir des oscillations couplées des champs électrique et magnétique. Pour rendre l'existence de telles ondes gravitationnelles possibles, il doit donc exister un effet "magnétique" de la gravitation, lié au mouvement des masses.

La nécessité de faire intervenir un champ dans l'expression de l'interaction gravitationnelle vient déjà du fait que  $r$  n'est plus défini en Relativité restreinte. La valeur de  $r$  dépendra du référentiel galiléen choisi, définissant la simultanéité entre  $M$  et  $M'$ . Il n'est donc plus possible d'exprimer directement l'interaction gravitationnelle entre deux points. Les étudiants doivent remarquer que l'on parle de l'interaction gravitationnelle définie par la formule instantanée de NEWTON ci-dessus; à d'autres moments on parle de Relativité restreinte; mais on ne parle à aucun moment simultanément des deux! Sauf bien sûr lorsqu'on aborde la théorie correspondante qui est la Relativité générale. Bien sûr, le raisonnement précédent s'applique aussi à l'interaction électromagnétique, et conduit à la réalité physique de ce champ.

Reprenons maintenant ce qui a été dit au paragraphe précédent. Il faut pouvoir traiter la rotation du pendule de FOUCAULT en

supposant que c'est la Terre qui est immobile, et l'ensemble des galaxies lointaines qui tourne autour d'elle. L'ensemble de toutes ces masses lointaines en mouvement doit avoir un effet sur le pendule en mouvement. Cela évoque l'action magnétique de charges en mouvement sur d'autres charges en mouvement. On retrouve là encore, comme dans l'alinéa ci-dessus, qu'il doit y avoir en effet "magnétique" de la gravitation.

Le fait qu'on doive unifier, comme nous le suggère le principe de MACH, les forces d'inertie et de gravitation en une interaction unique, une nouvelle théorie de la gravitation, pose en apparence problème. Ces deux forces sont en effet apparemment d'une nature très différente en Mécanique newtonienne.

Si l'on observe le comportement à l'infini, on voit que les forces gravitationnelles tendent toujours vers 0 loin des corps les créant, tandis que les forces d'inertie restent finies (force de CORIOLIS) ou deviennent infinies (force d'inertie centrifuge) à l'infini, dans le cas d'un référentiel tournant par exemple.

L'existence des référentiels galiléens permet à loisir d'annuler les forces d'inertie globalement. Au contraire, les champs de gravitation réels ne peuvent être éliminés globalement par l'utilisation des forces d'inertie qui contrairement à eux ne s'annulent pas à l'infini (à cause aussi de l'effet de marée). Cet argument est utilisé pour dire que les forces d'inertie sont des forces fictives. En Relativité générale, elles sont bien sûr considérées comme réelles au même titre que la gravitation.

La différence entre les forces d'inerties et de gravitation apparaît également dans leurs expressions mathématiques très différentes.

Là encore, nous trouverons la solution en prenant l'analogie avec l'électromagnétisme et en considérant qu'il existe une partie magnétique de la gravitation.

Tout d'abord, il y a également une grande différence apparente dans les formulations  $\mathbf{F}_1 = q\mathbf{E}$  et  $\mathbf{F}_2 = q\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$  de l'électromagnétisme. Mais examinons justement l'origine de la disparition de ce que nous appelons définitivement *l'effet magnétique* de la gravitation, dans les référentiels galiléens, en faisant une analogie avec l'électromagnétisme.

Considérons pour cela un ensemble de charges électriques immobiles les unes par rapport aux autres. Dans le référentiel  $R^0$  dans lequel elles sont immobiles, l'action électrique des charges est complètement caractérisée par le champ électrique  $\mathbf{E}$  somme des champs créés par chaque charge. Dans tout autre référentiel en mouvement par rapport à  $R^0$ , il y a en plus un effet magnétique caractérisé par le champ magnétique total  $\mathbf{B}$ . Ce champ agira sur une particule test de charge  $q$  animée de la vitesse quelconque  $\mathbf{v}$  par  $\mathbf{F}_2 = q\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$ , alors que la force à laquelle est soumise cette particule test est calculée uniquement avec le champ électrique par  $\mathbf{F}_1 = q\mathbf{E}$  dans  $R^0$ .

La disparition de tout effet magnétique dans  $R^0$  ne vient en aucune manière du fait que les forces magnétiques sont fictives et dues au fait qu'on a choisi un mauvais référentiel. Cette disparition n'est pas non plus un indice de l'impossibilité d'unifier les effets électrostatiques et magnétiques; la forme apparemment différente des formules donnant l'expression des forces électrostatiques et magnétiques non plus. Cette disparition des effets magnétiques dans  $R^0$  est simplement liée à la configuration particulière du système de charges à l'origine des effets électriques.

De même, la disparition des effets magnétiques de la gravitation dans les référentiels galiléens, doit être liée à la disposition particulière de toutes les galaxies remplissant l'univers. Nous verrons en effet au chapitre 18 sur la cosmologie relativiste, que la répartition des galaxies et plus généralement de toutes les masses, y compris les masses cachées non lumineuses, dans l'univers, et à grande échelle, est homogène et isotrope; ceci, tant en ce qui concerne les positions que les vitesses. Cette disposition particulière, alliée au principe de MACH, doit bien être à l'origine de la forme purement "électrostatique" de la gravitation dans les référentiels galiléens. Dans notre analogie, les charges électriques de  $R^0$  jouent le rôle des galaxies de l'univers.

Envisageons maintenant un autre problème posé par la réunion de la gravitation avec la Relativité restreinte. Ce problème se pose lorsque les masses deviennent très importantes, comme cela a été signalé dans l'introduction (§ 1).

Considérons deux particules de masse  $m$ . Lorsqu'on les rapproche, ces deux particules qui s'attirent gravitationnellement perdent de l'énergie gravitationnelle. À cause de la formule  $\Delta E = \Delta mc^2$ , et si les masses sont importantes, de façon à ce que  $\Delta E$  soit importante, vu de loin, la masse de l'ensemble des deux particules doit diminuer. Autrement dit, leur action gravitationnelle sur une troisième particule doit être inférieure à la somme de leur action gravitationnelle individuelle (lorsque chaque particule est seule); voir fig. 6.1 .



Fig. 6.1

Ainsi, l'interaction gravitationnelle est non linéaire, c'est à dire que la loi d'addition des forces gravitationnelles ne joue pas; le principe de superposition des états d'équilibre non plus. La loi de l'attraction universelle de NEWTON (6,1) est donc fautive lorsque les masses deviennent importantes, c'est à dire quand l'énergie gravitationnelle est importante.

Nous avons vu au § 5 chapitre 1 que le fait qu'une interaction soit non linéaire est lié à l'action des particules d'interaction les unes sur les autres. Effectivement les gravitons, particules assurant l'interaction gravitationnelle, comme toutes les particules ont un quadrivecteur impulsion-énergie avec une composante de temps  $P^0$ . La masse-énergie correspondante agit gravitationnellement et les

gravitons peuvent ainsi agir les uns sur les autres.

Dans l'exemple envisagé, le fait que l'action gravitationnelle soit inférieure à la somme des actions des deux masses, doit être lié au fait que se surajoute l'action gravitationnelle des gravitons. La diminution de la gravité doit être liée à un effet répulsif de ces gravitons auquel doit correspondre une composante de temps ou masse-énergie  $P^0$  négative (voir également § 4). L'effet est opposé de celui de deux charges électriques égales qui se repoussent toujours.

Ainsi, on peut dire que l'énergie gravitationnelle est négative. De plus, nous sommes conduit à considérer des masses négatives à l'origine d'effet répulsif en Relativité générale. Nous reverrons cela au chapitre 8 et au chapitre 19

**13. Difficulté du concept de référentiel galiléen.** - Nous avons vu que ce concept était essentiel pour la construction de la Mécanique newtonienne, puis la Relativité restreinte. Or un certain malaise ne peut manquer d'apparaître lorsqu'on cherche effectivement dans la réalité un exemple de référentiel galiléen. Certes, en ce qui concerne la non rotation, un pendule de FOUCAULT peut faire l'affaire, mais en ce qui concerne le mouvement de translation rectiligne uniforme d'un point du référentiel, la vérification est plus délicate. Voyons cela plus précisément. La Terre ne peut convenir de par sa rotation sur elle-même, mais également du fait de son accélération (de chute libre) vers le Soleil. Le Soleil ne peut convenir pour les mêmes raisons. Il "tombe" perpétuellement vers le centre de notre galaxie. Enfin les galaxies agissent gravitationnellement les unes sur les autres et sont ainsi soumises à des accélérations. Où trouver dans l'univers un référentiel non accéléré?

Peut-on définir un référentiel galiléen d'une manière absolue sans faire référence à l'astronomie? Une particule libre  $y$  est animée d'un mouvement rectiligne uniforme. Cela est fort bon, mais toutes les particules sont soumises à la gravitation, même les particules de masse nulle comme le photon, comme nous l'avons vu au § 4. Il est possible de considérer une particule isolée dans le vide interstellaire loin de toute étoile comme libre; mais outre que c'est placer fort loin la recherche d'un référentiel galiléen, cette particule ne sera libre qu'en première approximation. Si sa trajectoire dans un référentiel n'est pas tout à fait une ligne droite, comment allons-nous savoir si elle est soumise à un faible champ de gravitation, ou si le référentiel choisi n'est pas tout à fait Galiléen?

Notons le fait extrêmement important que c'est l'égalité entre  $m_i$  et  $m_g$  qui empêche effectivement de savoir si la gravité est effectivement nulle ou non. S'il existait deux particules de même masse inerte et de masses gravitationnelles différentes, par exemple, le champ de gravitation serait nul lorsque leurs trajectoires seraient identiques. Si  $m_i$  était différente de  $m_g$ , il serait toujours possible par assemblage de constituer deux telle particules. S'il était possible ainsi de déterminer un lieu où la gravitation est nulle, un référentiel galiléen en un tel lieu serait tel que les particules non soumises aux autres interactions y obéissent au principe de l'inertie.

Le cas des corps pseudo-libres sur Terre, comme un solide sur une table à coussin d'air, est intéressant, car il montre l'exemple d'un raisonnement en boucle. On affirme d'abord que le solide est libre car soumis à deux forces opposées : son poids et l'action du coussin d'air. On dit que l'on vérifie alors le principe de l'inertie dans un référentiel galiléen. On oublie de dire que ce qui permet d'affirmer que les deux forces sont opposées, c'est justement son mouvement rectiligne uniforme, le principe de l'inertie étant admis, ainsi que le fait, sans aucune justification que la Terre est un référentiel galiléen. Le fait est que tout cela fonctionne, mais le problème est qu'on peut ainsi trouver autant de référentiels galiléens qu'on veut, tous différents les uns des autres, et accélérés les uns par rapport aux autres. Ainsi, du fait que tous les corps accélèrent de la même façon vers la Terre (toujours dû à  $m_i = m_g$ ), on peut considérer un ascenseur en chute libre comme un bon référentiel galiléen. Des particules non soumises aux autres interaction que la gravitation y ont effectivement un mouvement rectiligne uniforme. Il suffit donc d'affirmer que la gravitation est nulle dans l'ascenseur. Certes, cela paraît surprenant, mais la mécanique que l'on développe ainsi est cohérente. Il nous est plus commode de considérer la Terre comme un référentiel galiléen plutôt que l'ascenseur en chute libre.

Mais nous savons maintenant que ces arguments de commodité ne sont pas des justifications pour une théorie physique. La réalité doit s'imposer plus fortement que par simple commodité. En effet, si nous adoptons la conception réaliste de la science, la théorie n'est pas une manière commode de classer les observations. Elle est le reflet de la réalité.

Enfin on peut rejeter l'exemple de l'ascenseur en chute libre lorsqu'on se rend compte que de tels ascenseurs en différents points de la Terre ne sont pas en translation rectiligne uniforme les uns par rapports aux autres. Il n'en est pas moins vrai qu'on peut plutôt rejeter l'existence de référentiels galiléens globaux, et prendre effectivement les référentiels en chute libre et sans rotation par rapport aux galaxies lointaines comme les référentiels galiléens locaux dans lesquels la Relativité restreinte s'applique (Nous verrons au § 2 du chapitre 7 que c'est effectivement la bonne solution).

En conclusion : la construction précise d'un référentiel galiléen englobant tout l'univers est une impossibilité pratique. J'espère dans ce paragraphe avoir créé un sentiment de doute quant à la vision précise d'un référentiel dont on serait sûr qu'il est parfaitement galiléen avec vérification à l'appui.

Un des piliers de la Relativité restreinte, le référentiel galiléen, est ainsi un colosse aux pieds d'argile, et s'avère pour l'instant aussi nébuleux que l'était l'espace absolu de NEWTON.

**14. Expérience des deux barres.** - Elle va confirmer ce qui a été dit au § 1, à savoir que la Relativité générale devient nécessaire lorsque les masses sont animées de vitesses voisines de celle de la lumière. Considérons donc de nouveau l'expérience des deux barres. Nous supposons maintenant qu'il s'agit de deux barres massiques s'attirant par la gravitation, de masses volumiques  $\rho_0$  dans le référentiel  $R^0$  constitué par les barres.

Notons tout d'abord que la Mécanique newtonienne est compatible avec la loi de la gravitation universelle :  $F = \frac{Gmm'}{r^2}$ . On obtient bien une force invariante. La gravitation ne pose donc pas le problème que posait l'électromagnétisme. Cependant cette fois-ci, la

difficulté vient de la Relativité restreinte. Vue de  $R$ , à cause de la contraction des longueurs, la densité massique devient :  $\rho = \frac{\rho_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  (cf (3,8)). De plus, ce qui attire, c'est  $\frac{E}{C^2}$ ,  $E$  étant l'énergie totale : masse au repos et énergie cinétique, c'est à dire ce qu'on appelle masse-énergie (cf § 4); ce qui correspond à une densité apparente de masse gravitationnelle :  $\frac{\rho}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  (cf (4,10)).

Finalement la situation devient encore pire que dans le cas de l'électrostatique seule; la force gravitationnelle par unité de longueur se trouve multipliée par :

$$\left[ \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right]^2$$

en passant de  $\bar{R}$  à  $R$  au lieu de rester invariante comme elle le devrait. Il y a en effet un terme en  $\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  pour le rôle attractif d'une barre, mais également encore une fois ce terme pour le rôle passif d'être attiré de l'autre barre. En électrostatique, la force par unité de longueur était multipliée par :

$$\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

(§ 11 chapitre 4, terme en  $\lambda^2$ )

Là encore il y a contradiction entre la loi de la gravitation universelle newtonienne et la Relativité restreinte; ici (6,1) est fausse quand les vitesses deviennent proches de celle de la lumière.

Il faut bien sûr donner la préférence au cadre conceptuel de la Relativité restreinte. Il faudra donc dans ce cadre modifier la loi de la gravitation universelle. Gardant le concept de masse invariante attachée intrinsèquement aux particules, la manière la plus simple de résoudre le problème posé ici consiste encore à penser, comme pour l'électromagnétisme, qu'il doit exister une forme magnétique de l'interaction gravitationnelle liée au mouvement des masses. Cette force doit avoir, dans notre exemple, un effet répulsif.