

Une introduction atypique à la Relativité Générale

Chapitre I : La pesanteur

©Amanuensis

2020/04/11

Lien de publication de la version courante:

<http://www.lahri.org/public/IntroRG-Ch1-pesanteur.pdf>

Textes et dessins, ©Amanuensis, sauf dessins indiqués ©Mailou

Commentaires: <https://forums.futura-sciences.com/physique/871138>

Contact avec l'auteur: amanuensis at lahari.org

Avec mes remerciements pour les commentaires des premiers relecteurs, connus sur le forum comme Mach3, Yves95210 et Mailou75. Et spécialement à Mailou75 pour les figures!

Source : IntroRG-Ch1-pesanteur-v14-

Sommaire

Introduction à la série	2
La pesanteur	5
La pesanteur comme phénomène constaté par tout un chacun	5
La pesanteur chez les Oberthiens	6
Une définition universelle de la pesanteur	8
Pesanteur et accélération	9
Pesanteur et référentiel	9
Mesurer la pesanteur	14
Direction	15
Intensité	15
Accéléromètres	17
Que mesure un accéléromètre?	18
Mesurer la pesanteur avec un accéléromètre	21
Pesanteur et accélération propre	22
Résumé du premier chapitre	23
Annexe A: Concepts importants	25
Annexe B : Les vaisseaux-cylindre	26

Introduction à la série

Ce texte est le premier d'une série se voulant une introduction (très atypique) à la Théorie Générale de la Relativité (GTR, selon l'anglais, dans la suite), en plusieurs chapitres. Il ne s'agit pas d'une description complète de la théorie, c'est un sorte de préalable, ne couvrant que certains aspects, pouvant être décrits .

La GTR est abordée usuellement suivant la progression historique après un enseignement de la mécanique de Newton, puis un enseignement poussé de la théorie restreinte de la relativité, et d'entrée avec des outils mathématiques assez « avancés » pour introduire la formule principale de la GTR (l'équation de champ d'Einstein), qui la présente comme une théorie de la gravitation, une théorie différente de celle de Newton. Cette série de textes procède différemment, en partant d'une analyse voyant dans la GTR trois théories complémentaires : une théorie de l'inertie et de la pesanteur, une théorie des mesures

spatiales et temporelles (métriques), et une théorie de la gravitation. L'approche usuelle part de la théorie métrique (la partie essentielle de la « relativité restreinte »), puis y ajoute la gravitation. Ici, on va partir de la pesanteur et de l'inertie.

La GTR procède à une unification de la gravitation et de l'inertie ; elle contient une théorie de l'inertie, une théorie différente, et d'une certaine manière révolutionnaire, de l'inertie de Newton.

La mécanique de Newton contient déjà une unification, partielle, de la gravitation et de l'inertie, d'une part via la proportionnalité universelle entre *masse grave* (qui apparaît dans les formules ressortissant à la gravitation) et *masse inerte* (celle apparaissant dans les formules ressortissant à l'inertie), et d'autre part via les concepts phénoménologiques de poids et de pesanteur. On peut aller jusqu'à dire que la GTR est une théorie de la pesanteur, et de la pesanteur comme manifestation de l'inertie.

L'examen des textes visant le grand public montre que les concepts liés à l'inertie et à la pesanteur sont souvent mal compris et donc mal restitués, ce qui est moins le cas pour la gravitation.

Un premier volet couvre la pesanteur et l'inertie, en partant d'une part des phénomènes (de ce que l'on constate, observe) et d'autre part de ce qui est enseigné dans le cadre de la en mécanique de Newton, quand cela reste pertinent avec la GTR. La présentation est faite avec suffisamment de généralité pour être un tronc commun à la mécanique classique (celle de Newton) et à la GTR, en favorisant, par souci pédagogique, l'angle de la mécanique classique, mais *sans pré-conception contraire à la GTR*. Cela donne une présentation peu usuelle de la mécanique classique, car adaptée à l'abord de la GTR, et en s'appuyant aussi sur les faits, observations et expériences indépendamment du modèle même de la mécanique de Newton. La présentation demande plusieurs « renversements de point de vue », dont la compréhension et l'acceptation font partie intégrante de la préparation à la GTR.

Ce premier chapitre concernera la pesanteur, en tant que phénomène ; le deuxième traitera de l'inertie. Ce premier volet a la propriété de ne pas référer à une quelconque métrique, i.e., on ne s'occupe pas, ni pour des hypothèses, ni pour des outils, de théories concernant les notions de durée ou de longueur ; ces notions sont utilisées « naïvement », pour repérer les événements par exemple, sans explications rigoureuses sur ce qu'elles représentent.

Avec chaque chapitre divers concepts plus mathématiques seront introduits, des concepts couramment utilisés en GTR mais d'application plus large, y compris à la mécanique classique. Par exemple, la modélisation en quatre dimensions, avec les concepts associés,) sera introduite assez tôt. Ils ne sont pas spécifiques à la GTR, et leur utilisation en mécanique classique peut être éclairante.

Caveat lector

L'auteur n'est pas un professionnel de la physique : ni un enseignant, ni un chercheur. L'auteur a néanmoins une solide formation initiale en mathématiques et en physique, qu'il a continuée en autodidacte avec l'aide de professionnels, ainsi que d'échanges avec d'autres étudiants. Les textes ne sont pas des assemblages de textes pris ci et là, comme notes de lecture, comme on en trouve des quantités publiés électroniquement (ou même sur papier, souvent à compte d'auteur) par des non-professionnels. La manière d'introduire les concepts, et surtout l'ordre dans lequel ils sont introduits, n'est pas ce qu'on trouve typiquement.

Les textes ne contiennent aucune idée originale, ils respectent, ou du moins sont censés respecter, ce qui est normalement enseigné sur la GTR, tel que le comprend l'auteur. Les textes ont été relus par différentes personnes, dont un enseignant professionnel. Cela ne garantit pas l'absence d'erreurs, toujours possibles puisque le texte n'est pas la copie de textes d'autre origine qui pourraient être indiqués comme références.

Le lecteur doit conserver son sens critique, et prendre garde qu'il peut y avoir des erreurs, et confronter ces textes par lui-même à d'autres sources s'il a le moindre doute. **Ces textes ne remplacent en aucun cas des livres de référence ou des cours de physiciens professionnels sur la GTR** ; ce ne sont que des prolégomènes, une approche et des notions qui peuvent être utiles à comprendre avant d'aborder des textes de référence.

L'auteur assume la totale responsabilité des erreurs résiduelles, et est ouvert à toute rectification ou commentaire, qui pourront amener des révisions des documents.

La pesanteur

Où la pesanteur est présentée comme un phénomène en soi, sans s'occuper de ses causes.

La pesanteur comme phénomène constaté par tout un chacun

L'idée de poids, de pesanteur, est familière. Les objets ont un poids, lâchés ils tombent verticalement sous l'effet de ce poids.

À l'école on apprend que le poids est une force, à distinguer de la masse. Que le poids est la force obtenue comme le produit de la masse par la pesanteur. Que celle-ci se mesure donc en N/kg, le newton étant l'unité de force et le kilogramme celle de masse. Mesurer le poids d'un objet se fait avec une balance, par exemple un peson à ressort, le poids, une force, étant compensé par une autre force, celle du ressort, qu'on mesure via l'allongement du ressort.

On apprend aussi que le poids d'un objet n'est pas partout le même: par exemple il diffère sur Terre et sur la Lune. Que la pesanteur ne dépend pas de la nature de l'objet ; par exemple sur la Lune, où règne le vide, les plumes et les marteaux tombent à la même vitesse, même si cette vitesse n'est pas la même que sur Terre.

On apprend encore qu'on peut se trouver en apesanteur (ou en impesanteur, décrit comme une absence de pesanteur), situation où il se passe des tas de choses troublantes, assez différentes de notre expérience usuelle. On en voit l'exemple dans les vidéos sur la Station Spatiale Internationale, les avions en vol parabolique ou encore dans des fictions sur fond de conquête spatiale.

On apprend enfin que la pesanteur en un lieu est modélisée, à l'instar d'une force ou d'une vitesse, par un vecteur, un objet mathématique ayant une direction (la verticale, du haut vers le bas) et une intensité, qui est d'environ 9,81 N/kg dans le cas de la surface de la Terre (indiqué aussi comme « 1 g », qui n'est pas un gramme, mais un alias grand

public d'une valeur s'exprimant avec une unité bien moins connue, mais officielle, 981 gals, proche donc de 1 kgal).

À ce stade, quelques difficultés apparaissent en creusant un peu. Par exemple on dit « être en apesanteur » mais on ne dit jamais « être en pesanteur », et même rarement « être pesant » (sauf au sens figuré). Si la pesanteur dépend du lieu, il semble raisonnable de penser que l'impesanteur est une fonction du lieu et non un état : on devrait dire « être en un lieu où règne l'impesanteur ». La difficulté est dans la notion de lieu.

Prenons un « avion zéro-G », et un individu en « impesanteur » pendant la phase parabolique, et oublions mentalement l'avion : on imagine alors la personne en plein air en train de tomber, en un lieu où avant et après le passage de l'avion, régnait la pesanteur terrestre. Comment la pesanteur (ou son absence) peut-elle « dépendre du lieu », alors? On peut se poser d'ailleurs la même question pour les planètes vues comme se déplaçant dans le Système Solaire : là où était ou va aller une planète vue comme en mouvement la pesanteur n'est pas celle qui règne sur la planète.

Le lecteur attentif aura remarqué que jusqu'ici il n'est nulle part question de gravitation. Le mot « gravité » n'a pas été utilisé, en particulier pas en lieu et place de « pesanteur », comme on le voit couramment. Le point essentiel qui est développé ici est justement que la notion de pesanteur est distincte de celle de gravitation, une distinction qui se révèle souvent mal prise en compte dans la littérature visant le grand public. Cette confusion vient du fait que la gravitation est l'aspect dominant dans la pesanteur qui affectent les phénomènes étudiés à la surface de la Terre. Mais dominant ne signifie pas exclusif.

Pour illustrer cela, je vais prendre (comme à d'autres endroits dans le texte) une citation prise dans la littérature (au sens large, incluant l'audio, la vidéo, et autres supports), ici une bande dessinée récente de science fiction. (Ailleurs cela sera un documentaire, ou des textes de vulgarisation scientifique, etc.)

La pesanteur chez les Oberthiens

La scène se passe dans un vaisseau interstellaire habitable au très long cours (quatre générations selon le texte), de taille kilométrique et de forme cylindrique, l'espace de vie étant la surface interne¹. Une personne explique à une autre :

« Mais utilise ta tête pour une fois! Si nous arrivons à marcher normalement sur le plancher du vaisseau-cylindre, c'est parce qu'il tourne sur lui-même et crée une force centrifuge qui fait office de gravité. »

1. *Centaurus*, de Léo et Janjetov.

(Note: les habitants du vaisseau n'ont pas de gentile dans le roman ; j'utilise « Oberthiens » pour une raison qui n'échappera pas à tout le monde.)

Pour la majorité des lecteurs, tous Terriens, cette phrase ne choquera pas. Elle serait même naturelle si les personnes en question étaient nouvellement venues dans le vaisseau-cylindre après avoir vécu leur jeunesse sur Terre. Mais ce n'est pas le cas dans le roman: les deux personnes sont nées dans le vaisseau, y ont vécu toute leur vie, de même que leurs parents et leurs grands-parents. L'usage des termes « gravité » et « marcher normalement » est alors incongru.

Les deux personnages (pas plus que leurs enseignants, ou tout habitant du vaisseau) n'ont aucune expérience directe de la gravitation, n'ayant jamais subi dans leur chair l'attraction d'un corps massif important, ni même observé le mouvement de planètes ou de satellites sous l'effet de la gravitation. D'un point de vue phénoménologique, la gravitation n'apparaît pas dans leur monde (ses manifestations seraient très difficiles à mesurer, même avec une instrumentation aussi précise que ce que l'on sait faire actuellement). Dans le contexte, invoquer la gravitation, quelque chose d'essentiellement fictif pour eux, ne fait pas sens, surtout avec une demande « d'utiliser sa tête »! Ils devraient parler de ce qu'ils vivent effectivement, non? Et ce qu'ils vivent effectivement, c'est la pesanteur.

Les premières remarques de cette section, quelques pages plus tôt, sont parfaitement adaptées aux Oberthiens, qui n'auraient aucune raison de penser que cela ne s'applique pas pour eux. On va donc continuer de parler de pesanteur en s'astreignant à ce que cela s'applique aussi bien aux Oberthiens qu'aux Terriens, comme règle évitant de se restreindre à ce qui se passe sur Terre, et donc de ne pas parler de gravitation!

Le constat amenant à la notion de pesanteur est empirique, c'est une description des phénomènes tels qu'observés, sans chercher à les « expliquer » par une cause. C'est le constat d'un champ de force, peu variable dans le temps et l'espace à l'échelle humaine, qui confère à tout objet son poids, cette force qui tend à tirer ou pousser les objets vers une même direction, le bas. Un deuxième constat empirique est que cette force est proportionnelle à la masse de l'objet, au sens de la quantité de matière: doubler la quantité de sable dans un sac le rend deux fois plus difficile à soulever.

Cette force affecte la majeure partie de la vie courante (comme le montre vivre en impesanteur). Elle affecte des aspects des plus triviaux, comme manger ou préparer la nourriture, comment se déplacer; elle affecte l'instrumentation, qu'elle soit commune (balances, horloges à balancier) ou scientifique. Elle affecte la manière de construire les bâtiments, et aussi les règles sportives, comme la taille d'un terrain de tennis ou celle des haies en athlétisme, ou les figures en gymnastique, etc., la liste est longue. Elle affecte la perception de l'espace, le rendant non isotrope, en définissant une direction privilégiée (la verticale), ainsi que l'organisation dans l'espace.

Ce qu'observent les habitants à la surface interne du cylindre est qualitativement identique à ce qu'on observe à la surface de la Terre, au premier ordre. Et l'identité d'expérience va très loin si l'intensité du champ est identique, à savoir de l'ordre du kilogal (de « 1 g »). Car alors le plus gros de l'instrumentation (comme un peson à ressort) ou des pratiques de construction de bâtiment ou des règles sportives, etc., peuvent être conservées. De même que nous, Terriens, ne voyons rien de particulier dans la vie courante décrite dans l'ouvrage en question, de même les Oberthiens consulteront la littérature et les films des Terriens sans problème d'interprétation de l'organisation spatiale, des mouvements, des bâtiments, des manifestations sportives, etc.

Notons que c'est bien pratique pour les auteurs (qu'il s'agisse, de bande dessinée, films ou romans), pour relater des histoires se déroulant dans un habitat cylindrique: la description de la vie courante est comme sur Terre, c'est bien plus simple à illustrer que, par exemple, quand cela se passe « en impesanteur » !

Que pourrait-on faire dire au locuteur qui serait plus compatible avec leur expérience effective? Par exemple « Si nous arrivons à marcher normalement sur le plancher du vaisseau-cylindre, comme nos ancêtres marchaient à la surface de la Terre, c'est parce que le vaisseau tourne sur lui-même et que cela crée une pesanteur orientée vers l'extérieur du vaisseau. »

Une définition universelle de la pesanteur

Il est donc raisonnable d'utiliser une même description pour le phénomène, et un terme commun. On a la chance qu'une terminologie cohérente soit disponible en français, avec les termes pesanteur, poids, peser, impesanteur... On peut donner une première définition de la pesanteur, en termes de ressenti, de ce qu'on observe, indépendamment de sa cause, et valable dans tous les environnements où le phénomène est vécu, planète ou vaisseau-cylindre ou vaisseau spatial.

Définition P1: La pesanteur en un lieu et un instant est le vecteur tel qu'un objet quelconque restant en ce lieu subit à cet instant une force égale à sa masse fois ce vecteur, indépendamment de toute autre caractéristique de l'objet. On parle de pesanteur quand ce vecteur est peu variable dans le temps et dans l'espace.

Cela parlera de la même manière aux Terriens et aux (éventuels) Oberthiens, et amène à conclure à une pesanteur nulle pour un occupant de l'ISS ou d'un avion en vol parabolique, trois cas qui diffèrent si on privilégiait la cause au phénomène.

Pesanteur et accélération

On peut éviter de parler de force en considérant l'accélération. Un objet maintenu immobile a évidemment une accélération nulle. S'il subit une pesanteur non nulle et qu'il reste néanmoins immobile, c'est qu'il subit d'autres forces contrecarrant l'effet de la pesanteur, par exemple la force exercée par le support quand posé dessus. Quand on lâche un objet immobile, ou plus généralement qu'on supprime les autres forces qu'il subissait, autres que l'effet de la pesanteur, il se mettra en mouvement, avec une accélération initiale égale à celle de la pesanteur. D'où la définition :

Définition P1': La pesanteur en un lieu et un instant est l'accélération du mouvement d'un objet quelconque initialement immobile, puis lâché de manière à ce qu'il ne subisse aucune influence, accélération évaluée immédiatement après le lâcher.

Dans le langage courant, on parle de pesanteur quand ce vecteur est peu variable dans le temps et dans l'espace.

Pesanteur et référentiel

Le terme de lieu dans la définition P1 demande clarification ; cela peut surprendre, mais c'est le terme le plus difficile à cerner dans l'expression. La notion de lieu est relative, comme on peut aisément s'en rendre compte en pensant à un objet en un lieu sur Terre et à l'emplacement où se trouve le même objet au même moment relativement au Soleil. Le terme technique pour parler d'une référence par rapport à laquelle se détermine un lieu est celui de *référentiel*. Cette notion est critique pour la notion de pesanteur.

Pour illustrer cela, on va étudier le cas des vols paraboliques, des « avions zéro-G », et plus particulièrement de la phase d'impesanteur. Cet exemple identifiera deux référentiels distincts, et s'intéressera à la notion de pesanteur pour chacun d'entre eux.

L'appellation commerciale « zéro-G » a pour objet des vols paraboliques effectués par un avion, dans le but de mettre les passagers dans un « état d'impesanteur » (de micro-pesanteur, l'expérience n'étant pas parfaite, la conduite correcte du vol étant assez difficile pour les pilotes). La figure https://fr.wikipedia.org/wiki/Vol_parabolique#/media/Fichier:Parabolic_flight.png schématise un vol de ce type.

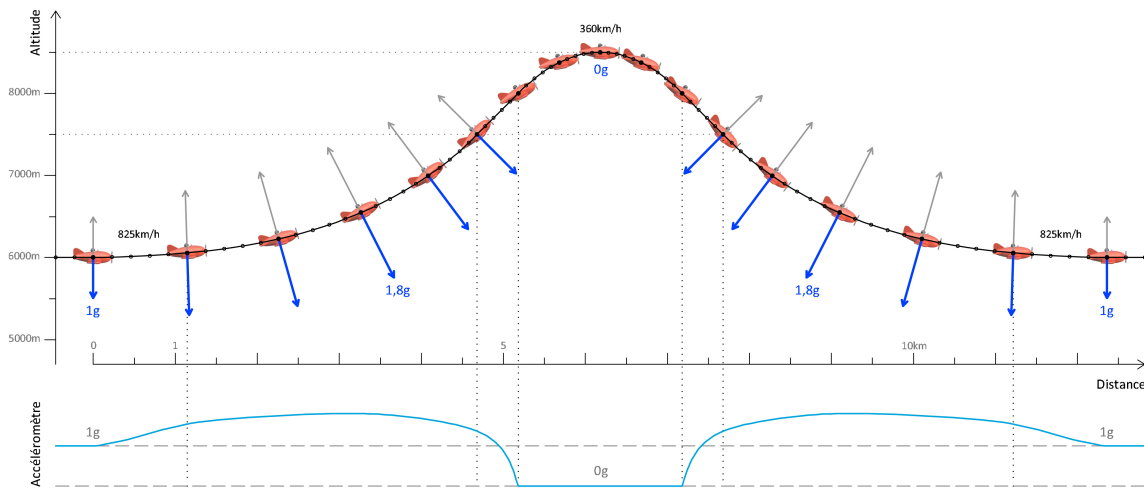
La période pendant laquelle les passagers ont cet « état » est assez courte. Elle est précédée et suivie de deux phases pendant lesquelles il est question d'hyperpesanteur. La description est bien celle de ce qui est vécu et ressenti par les passagers, et s'exprime

bien en termes de pesanteur (difficile de faire autrement, puisque l'idée centrale est celle d'impesanteur). Intéressons nous à ce ressenti, en commençant par des descriptions issues de la littérature.

[À propos de la phase d'hyperpesanteur, dans un article grand public, du Huffington Post] « *Cette accélération donne l'impression de peser quasiment deux fois son poids (1,8g).* » Le mot « impression » fait penser à une illusion. Suivant les définitions qu'on a vu jusque là, ce n'est pas une illusion. Le poids est effectivement quasiment doublé par rapport à ce qu'il est au sol. C'est un ressenti, cela s'applique aux objets environnant, c'est mesurable. La seule illusion serait de considérer la masse comme doublée. (Notons d'ailleurs un peu plus loin dans le texte; « *Par contre, quand on arrive à l'apprécier, notamment debout, l'hypergravité est aussi très intéressante. Il est extrêmement difficile de lever le bras. La mâchoire et les paupières semblent vouloir s'affaisser toutes seules.* », on parle bien là d'effets ressentis, pas d'une simple impression.)

[À propos de la phase d'impesanteur] « *En gros, l'avion est à ce moment en chute libre et ses passagers aussi. Ce qui donne l'impression de ne plus avoir de poids, d'être en apesanteur.* » a) L'avion n'est pas en chute libre (au contraire, il est piloté très finement en utilisant la poussée des moteurs et les effets aérodynamiques sur les gouvernes. Cela est nécessaire pour compenser les forces aérodynamiques, les effets de l'atmosphère.) L'avion suit la même trajectoire que s'il *était* en chute libre *en l'absence d'atmosphère*. Par contre, les occupants ne touchant pas l'avion et immobiles relativement à l'avion sont en chute libre. b) Et là encore, ce n'est pas une illusion, le poids est bien ressenti et mesuré comme nul (chute libre). Et il s'agit bien d'impesanteur, pas d'une *impression* d'impesanteur.

Du point de vue des passagers, l'intensité de la pesanteur varie donc avec le temps. Dans un premier diagramme, détaillant certains aspects, l'intensité de pesanteur ressentie par les passagers est indiquée sous le dessin.



ZeroG-3c.jpg

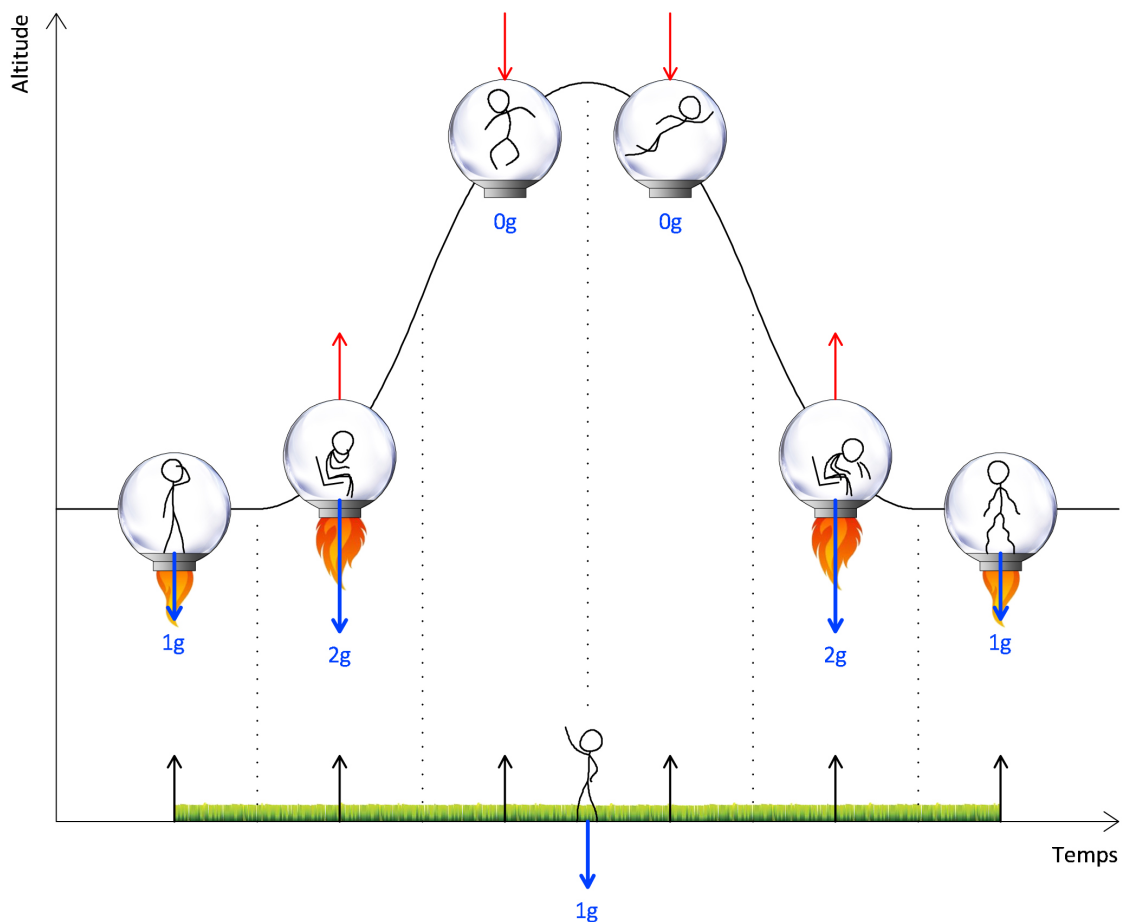
L'abscisse représente à la fois l'espace et le temps, la vitesse horizontale est considérée constante. La flèche en bleu représente la pesanteur ressentie dans l'avion, dans le repère du sol.

La trajectoire, considérée dans le référentiel terrestre, est la succession d'une phase horizontale (accélération verticale nulle), d'une phase de propulsion avec accélération verticale vers le haut, d'une phase de chute libre (accélération verticale vers le bas due à pesanteur), d'une phase de propulsion vers le haut, et retour à un mouvement horizontal (accélération verticale nulle). ©Mailou75 et Amanuensis.

Mais quid de la direction? Quelques textes indiquent qu'elle est maintenue perpendiculaire au plancher de la cabine. Ce qui fait que vu du sol sa direction varie selon l'attitude de l'avion, l'angle que son plancher fait avec l'horizontale, comme on le voit sur la figure ci-dessus. Par contre la pesanteur relative au référentiel terrestre reste identique en tout lieu du vol. On a deux pesanteurs différentes, tant en intensité qu'en direction.

Maintenant, regardons la trajectoire des occupants en ignorant l'avion. Pendant la phase présentée comme d'impesanteur, un occupant parcourt une parabole, qui est la trajectoire qu'il suit sous l'effet de son poids (accélération en coordonnées de 1 ggal), mais celui venant d'une *autre* pesanteur que celle qu'il ressent : celle « vue du sol », la pesanteur terrestre usuelle. Cette pesanteur là est à très peu de choses près constante tout le long de la trajectoire, d'environ 1 ggal et restant parallèle à elle-même. Toujours vu du sol, les occupants subissent deux phases d'accélération vers le haut, de l'ordre de 1 ggal, avant et après la phase d'impesanteur, comme illustrée par la figure page 12.

Il s'agit dans tous les cas de la même succession de lieux, les occupants ne sont pas ubiquistes. On aurait des pesanteurs différentes pour un même lieu? Force est d'admettre que parler de dépendance en lieu et instant est insuffisant, un autre facteur doit interve-



bulle.jpg

Le dessin schématise seulement ce qu'il se passe sur la verticale : la propulsion vers le haut est schématisée par un moteur de fusée.
 les flèches rouges indiquent l'accélération en coordonnées, vu du sol (relativement au référentiel terrestre).
 Les flèches bleues indiquent l'intensité de la pesanteur ressentie, somme de l'accélération en coordonnées et de la pesanteur dans le référentiel terrestre.
 ©Mailou75 et Amanuensis, avec un clin d'oeil au site xkcd.

nir. Dans ce qui précède, la différence évidente est que dans un cas on parle de ce qu'il se passe « dans l'avion », et dans l'autre de ce qu'on voit *du sol*. Et les deux points de vue ne sont pas conciliables en termes de pesanteur, ni non plus de mouvement : expliquer le mouvement d'un objet dans le volume de l'avion exige une pesanteur nulle (conformément à ce que voient, observent, mesurent les passagers dans le même volume), mais expliquer le mouvement de ce même objet vu du sol exige une pesanteur « terrestre ». L'avion aurait donc une influence sur la pesanteur, mais cela sans changer celle « vu du sol ».

Le facteur manquant doit distinguer « dans l'avion » et « au sol ». Le terme technique

pour cela est celui de référentiel. L'approche intuitive de l'idée de référentiel est celle d'un objet approximativement indéformable relativement auquel on va pouvoir parler de position (position relative au référentiel), et de là, d'immobilité, de trajectoire, de vitesse (la variation de la position relative en fonction du temps) et d'accélération (la variation de la vitesse)². Le référentiel le plus utilisé en pratique est celui qu'on peut construire à partir de la planète elle-même, on parle de référentiel terrestre. L'idée de référentiel est un concept à la fois mental (un humain comprend les mouvements et l'immobilité en choisissant plus ou moins consciemment un référentiel), et physique (c'est une manière de repérer les positions, une première étape vers la mathématisation des mouvements). Le choix d'un référentiel est subjectif : du point de vue mental le choix dépend de la situation, et du point de vue physique le choix d'un référentiel est arbitraire, et se fait en fonction du problème à traiter. La notion de pesanteur montre que le choix d'un référentiel affecte cet effet sensible et mesurable qu'est la pesanteur, autrement dit que la notion de référentiel est un peu plus qu'une simple convention.

Mais comment un référentiel, qui n'est à première vue qu'un choix arbitraire au même titre qu'un système de coordonnées, pourrait-il avoir un effet physique observable, palpable? La question est importante, mais mal posée. Ce n'est pas le référentiel qui a un effet physique éventuel, mais le corps qui sert de référence. Penser autrement procède d'une illusion, et demande un renversement de point de vue. Le plus souvent un objet est immobile dans le référentiel défini par un solide parce que ce dernier exerce une force sur l'objet. Pour rester immobile dans un avion en vol normal, il faut un contact avec l'avion (assis sur un siège, on est en contact avec celui-ci). La particularité des 20 secondes d'impesanteur est bien qu'on puisse être *immobile* par rapport à l'avion *sans contact avec lui* (plus généralement sans interaction directe).

Il y a quand même quelques exceptions, comme les satellites géostationnaires, qui sont immobiles dans le référentiel terrestre sans contact direct. Néanmoins, cette approche apparaît être la bonne et devra être développée.

Revenons à la pesanteur dans un avion zéro-G. Celle-ci, en tant que phénomène perçu, doit être définie relativement à un référentiel. La pesanteur ressentie, observée, mesurée par les occupants (y compris perçue nulle pendant la phase centrale), est celle relativement au référentiel concrétisé par l'avion. Celle invoquée par les observateurs au sol pour rendre compte du mouvement parabolique des occupants est celle relativement au référentiel terrestre. Une fois pris en compte la relativité au référentiel, les deux points de vue deviennent cohérents.

L'idée qu'en un même lieu et un instant la pesanteur puisse avoir des valeurs différentes selon le référentiel n'a rien de spécifique à un avion se baladant dans l'atmosphère terrestre. C'est valable pour un vaisseau spatial (qu'il y règne l'impesanteur, ou qu'il soit

2. Dans ce chapitre la notion de référentiel n'est pas traitée rigoureusement. En restant avec une notion approximative, la description s'applique aussi bien à la GTR qu'à la mécanique classique.

en rotation, ou autre). C'est aussi valable pour une planète se baladant dans l'espace. Cela permet d'une part de montrer que la notion de référentiel est essentielle, d'autre part de proposer une deuxième définition de la pesanteur.

Définition P2: Étant donné un référentiel, la valeur du champ de pesanteur en un instant donné et un lieu donné de ce référentiel est définie comme le vecteur tel qu'un objet quelconque immobile relativement au référentiel subit à cet instant une force égale à sa masse fois ce vecteur, indépendamment de toute autre caractéristique de l'objet.

On a aussi ainsi pris en compte l'aspect relatif de la notion d'immobilité en un lieu. Ceci dit, la définition n'est pas encore totalement satisfaisante, ne serait-ce que par l'absence d'une définition rigoureuse d'un référentiel.

Comme on l'a fait avec pour la définition P2, une variante en termes seulement d'accélération est

Définition P2': Étant donné un référentiel, la valeur du champ de pesanteur en un instant donné et un lieu donné de ce référentiel est définie comme l'accélération, relativement au référentiel, du mouvement d'un objet quelconque initialement immobile relativement au référentiel, puis lâché de manière à ce qu'il ne subisse aucune influence, accélération prise immédiatement après le lâcher.

Mesurer la pesanteur

Il a été répété plusieurs fois que la pesanteur était un phénomène que l'on ressentait, que l'on observait, que l'on mesurait. Mais comment cela se mesure-t-il en pratique, quels sont les instruments utilisés? Au-delà de l'intérêt même de comprendre l'instrumentation, ce sujet va éclairer le rapport entre pesanteur et accélération.

La pesanteur étant modélisée comme un vecteur (une intensité et une direction), une mesure vise à caractériser tout ou partie de ce vecteur. Il y a toute une collection de dispositifs pour mesurer la pesanteur. Certains se limitent à en déterminer la direction (la verticale), d'autres en mesurent une seule composante à la fois. Les plus sophistiqués déterminent toutes les caractéristiques du vecteur.

Direction

Beaucoup d'applications d'ordre pratique s'intéressent seulement à la direction de la pesanteur indépendamment de son intensité, c'est à dire à ce qui est, par définition, la verticale en un lieu. Le dispositif le plus simple, une invention dont on a perdu toute mémoire de l'origine, est le fil à plomb. Son plan perpendiculaire, par définition le plan horizontal, se repère avec un niveau à bulle. Dans le même esprit on peut citer les inclinomètres, qui mesurent un angle par rapport à l'horizontale. Dans ces exemples c'est la direction du poids (la force) d'un objet pesant immobile qui est indiquée, celle du poids du plomb, ou celle du poids du liquide.

Évidemment, si la pesanteur varie trop rapidement dans le temps, ces instruments frustrés ne seront pas utilisables! D'autres exemples seront présentés pour des mesures « instantanées » précises.

Intensité

Dans le cas de la pesanteur sur Terre (relativement au référentiel terrestre), la pesanteur est constante en un lieu, et ne varie guère en intensité d'un endroit à un autre. Mais ces petites variations intéressent les scientifiques, et des instruments de plus en plus précis et sophistiqués ont été développés.

Au XVIII^e, une méthode classique pour mesurer l'intensité de la pesanteur terrestre était la mesure de la période d'un pendule d'une longueur fixe. La théorie de Newton montre que la période des petites oscillations d'un pendule ne dépend que de la longueur du pendule et de l'intensité de la pesanteur. Des pendules de plus en plus complexes ont été utilisés, avec des dispositifs compensant les sources non désirées de variation, comme la température.

Une autre méthode consiste à mesurer le poids d'un objet de masse connue en le comparant à un étalon de force le plus précis possible. Cela peut se faire, à l'exemple du peson à ressort, avec un matériau élastique qui exerce une force dépendant de son allongement ou son écrasement. Un exemple est l'utilisation de la piézo-électricité, la modification des propriétés d'un cristal de quartz selon sa déformation quand écrasé (c'est le principe des balances électroniques de cuisine). D'autres étalons de force peuvent être basés sur d'autres phénomènes électromagnétiques, etc.

Une autre approche consiste à mesurer la pesanteur directement comme définie, c'est à dire à mesurer la durée de chute sur une distance calibrée (et donc son accélération si on la suppose constante) d'un corps d'épreuve initialement immobile puis lâché dans le vide. Des appareils modernes très précis utilisés en géodésie procèdent ainsi, et sont

présentés comme des « gravimètres absolus » (cf. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Gravimetre>).

Jusque là il a été question de dispositifs spécifiques, apparemment, à la mesure de la pesanteur ou de poids. Mais on peut aussi mesurer la pesanteur avec un accéléromètre, c'est-à-dire un dispositif conçu pour mesurer une accélération. Le propos principal de ces dispositifs est d'être installés dans des objets (un disque dur par exemple) ou des véhicules (voiture, avion, etc.) et d'en mesurer « de l'intérieur » l'accélération. Notons que le vivant a depuis longtemps développé et l'utilité et une technique pour ce genre de capteur, l'oreille interne des vertébrés contenant ce qu'il faut bien appeler un accéléromètre, un capteur essentiel au sens de l'équilibre.

Puisqu'il est quelque part question d'accélération dans la définition de la pesanteur, il est légitime de se demander comment un tel dispositif peut être utilisé pour mesurer la pesanteur. Et c'est de fait une application très courante des accéléromètres. Néanmoins la définition adoptée à ce stade du texte pour la pesanteur ne parle d'accélération que dans un cas particulier, alors qu'un accéléromètre mesure l'accélération dans toute situation.

Les concepts sont suffisamment distincts pour que cela ait amené à deux unités distinctes même si équivalentes. La pesanteur est souvent présentée comme s'exprimant en N/kg (cela vient de l'expression donnant le poids comme $F = mg$), ou dans des unités spécifiques comme le grand public « g » ou l'officiel gal. Alors qu'une accélération s'exprime en m/s^2 , sans unité spécifique (à l'instar de la vitesse par exemple). On justifie souvent le choix d'unités distinctes pour des grandeurs de même dimension par l'idée qu'il s'agit de grandeurs physiques de natures très différentes (comme par exemple le couple en newtons-mètres et l'énergie en joules).

Mais cela ne s'applique pas bien au cas de la pesanteur. On va plutôt argumenter (en ligne avec la GTR) qu'il s'agit bien de la même grandeur physique, et on va utiliser comme unité pour la pesanteur l'unité normale d'accélération, le m/s^2 . Le champ de pesanteur apparaît alors comme un champ d'accélération, et il est mesuré comme tel par les gravimètres absolus. L'argument principal est que les instruments pour la pesanteur et ceux pour l'accélération sont exactement les mêmes (ceux mesurant l'un peuvent être utilisés pour mesurer l'autre) et qu'on ne peut alors y voir qu'une seule grandeur physique.

L'utilisation d'un accéléromètre pour mesurer la pesanteur réserve une surprise, de grande importance pour une initiation à la GTR.

Accéléromètres

Faisons d'abord un détour sur les accéléromètres³, et la variété de leurs utilisations. L'idée de base est de connaître l'accélération d'un objet, d'un véhicule, etc., dans un cas quelconque.

Mesurer une accélération pendant un court instant est utile dans de très nombreux domaines, et leur miniaturisation relativement récente en fait un dispositif devenu très courant, même si peu visible. Les applications incluent la détection de chocs (e.g., airbag), la détection d'une chute (mise en sécurité avant choc, e.g. disque dur), la mesure des g-forces, les instruments de navigation (centrales à inertie), les vibrations (surveillance de machines industrielles), les séismes, la détection de la verticale (dans les portables), . . . , liste non exhaustive.

Par intégration un accéléromètre permet une mesure de différence de vitesse entre deux instants, et par double intégration une mesure de longueur de parcours entre deux instants, dont il découlera d'autres applications (comme la navigation à l'estime). À cause de cette grande variété d'applications, il y a toute une gamme de techniques et d'instruments, adaptés aux différents besoins, selon la dynamique d'intensités à couvrir, la réponse en fréquence, la taille ou le prix, etc. La technique des microsystèmes électromécaniques (MEMS) a permis en particulier des dispositifs très petits, très peu onéreux et néanmoins assez précis. (Cf. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Accéléromètre> pour un peu plus de développement.)

Un point commun à ces dispositifs est qu'ils sont liés à l'objet dont ils mesurent l'accélération. Cette mesure est faite « de l'intérieur », et non en étudiant la trajectoire de l'objet de l'extérieur. La mesure n'utilise apparemment pas de référence extérieure, ce qui devrait interpeller. En effet, lieux et vitesses sont relatifs à un référentiel (une évidence pour la vitesse), et l'accélération se définit a priori comme la variation d'une vitesse. Elle devrait dépendre aussi du référentiel choisi. Or un accéléromètre indique la même chose indépendamment de tout référentiel, puisqu'aucune référence extérieure n'est prise en compte.

Dans le même ordre d'idée, la plupart de ces dispositifs sont indépendants des unités de durée et de longueur: ils ne contiennent pas d'étalon de temps (d'horloge) ni de longueur à étalonner. Plus exactement ils n'en ont pas du tout besoin pour indiquer la direction de l'accélération, et n'ont besoin d'étalons que pour mettre en chiffre l'intensité de l'accélération, ce qui peut se faire par étalonnage direct, i.e., en les calibrant par une accélération connue. (La même chose s'applique pour certains instruments pour la

3. Ici et dans ce qui suit, on applique une terminologie ne distinguant pas les accéléromètres un axe, qui ne mesurent qu'une composante, et les accéléromètres trois axes, qui mesurent un vecteur (et sont souvent la combinaison de trois accéléromètres mono-axe d'axes perpendiculaires entre eux).

pesanteur: ceux donnant la direction n'ont aucun usage d'unités, penser à un fil à plomb ou à un niveau à bulle.)

On est donc en présence d'une mesure indépendante de choix arbitraires, aussi bien concernant un système de coordonnées ou un référentiel, qu'un système d'unités.

Que mesure un accéléromètre?

Répondre correctement à cette question va être très important pour le sujet de fond, préparer à une introduction à la GTR.

Une des bases de la mécanique classique est que les lois de la physique s'expriment préférentiellement en prenant un référentiel galiléen ; on pourrait donc penser que l'accéléromètre indique l'accélération relative à un référentiel galiléen (et à tout référentiel galiléen, le passage entre deux de ces référentiels conserve l'accélération). Ce n'est pas le cas, l'expérience montre que l'indication donnée par un accéléromètre immobile relativement à un référentiel galiléen n'est pas nécessairement nulle (en pleine contradiction avec une affirmation qu'on trouve ça et là, selon laquelle l'espace serait isotrope quand considéré par rapport à un référentiel galiléen). (On a introduit ici la notion de référentiel galiléen, sans vraiment la définir ; on va s'empresse de l'oublier, elle n'est pas pertinente à ce chapitre.)

On va citer diverses expériences distinguant accélération « vue de l'extérieur » et ce que mesure un accéléromètre. Prenons le cas d'un humain (avec ses accéléromètres biologiques) dans une centrifugeuse sur Terre, accompagné d'un accéléromètre commercial et d'un gravimètre. Faisons tourner la centrifugeuse pour un ressenti de l'ordre de 20 m/s^2 (deux kilogals), en gros deux fois la pesanteur terrestre. C'est ce qu'indique l'accéléromètre, et ce que mesure aussi un gravimètre absolu, qui, rappelons le, mesure l'accélération d'une masse d'épreuve lâchée dans le vide. L'orientation de l'accélération indiquée par l'accéléromètre n'est ni verticale, ni horizontale ; elle pointe vers le haut et vers l'intérieur (centripète). (Corrélativement, et comme on s'y attend, le gravimètre absolu indique l'accélération opposée, vers le bas et l'extérieur (centrifuge).)

Si on calcule l'accélération de la centrifugeuse dans son mouvement circulaire relatif au référentiel terrestre (en appliquant les formules de la mécanique classique), on trouverait une accélération horizontale centripète de l'ordre de 17 m/s^2 , une valeur différente en intensité et en direction de celle indiquée par les instruments situés à l'intérieur de la cage de la centrifugeuse.

Une autre expérience menant à des mesures distinctes est présentée par un avion en vol parabolique. Une citation extraite du même texte grand public cité plus tôt: « *20 secondes avant puis 20 secondes après avoir flotté, le corps pèse presque deux fois son poids, à*

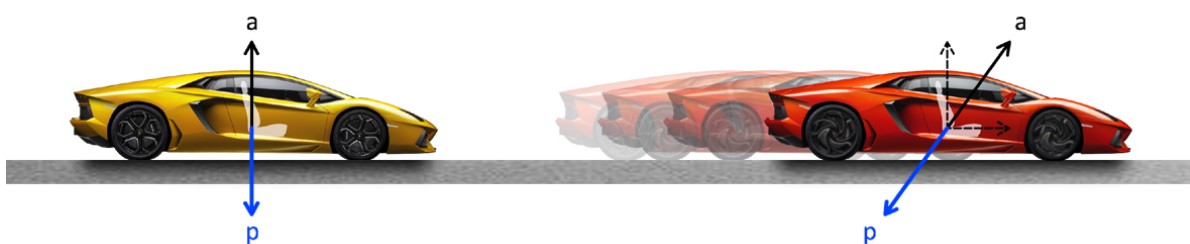
cause de l'accélération de 1,8g de l'avion. » La valeur de 1,8 g bien ce que mesurerait un accéléromètre dans l'avion. Mais ce n'est pas l'accélération de l'avion observée du sol : celle-ci serait verticale, vers le haut, et d'intensité de l'ordre de seulement 8 m/s^2 , soit 0,8 kgal.

Enfin, imaginons un gravimètre absolu posé au sol (immobile relativement au référentiel terrestre). On a vu que le procédé consiste à mesurer, sur un parcours suffisamment petit pour qu'on puisse considérer la pesanteur comme constante, la durée de chute d'une masse d'épreuve sur une distance connue, dans le vide, initialement immobile (par rapport au bâti de l'appareil), et en déduire la pesanteur par la relation $\Delta z = g\Delta t^2$. Mettons alors un accéléromètre sur la masse d'épreuve, que va-t-il indiquer? Il indique très exactement 0 pendant la chute. Autrement dit, selon l'accéléromètre l'accélération de la masse est nulle, alors que le propos même du gravimètre est d'en mesurer l'accélération. Par contre le gravimètre indiquera bien une pesanteur de l'ordre du kilogal (il est conçu pour cela).

On se sort de cette situation confuse en posant qu'il y a *deux* notions distinctes de l'accélération. L'une serait la pesanteur, l'autre l'accélération de l'objet. Retour à la case départ? Pas exactement. Il s'agit bien dans les deux cas de l'accélération de la masse, dans un cas elle est mesurée « de l'intérieur », dans l'autre elle est mesurée « de l'extérieur », ce qui rappelle la pesanteur dans un avion zéro-G. L'accéléromètre solidarisé à la masse mesure « de l'intérieur » (comme dans le cas d'un accéléromètre dans un véhicule ou dans une centrifugeuse), le gravimètre mesurant la durée de chute mesure « de l'extérieur » (tout comme la mesure de l'accélération de la trajectoire d'un avion zéro-G, ou de celle de la centrifugeuse, vues dans le référentiel terrestre). Ce sont deux notions d'accélération, indépendamment de toute idée de pesanteur. On appelle celle « mesurée de l'intérieur » l'accélération propre et la seconde (qui dépend du choix de référentiel) *l'accélération en coordonnées*.

Comment passe-t-on de l'une à l'autre? Qu'indique l'accéléromètre dans la centrifugeuse avant la mise en rotation? Qu'indique celui dans l'avion zéro-G dans la phase en palier précédant la phase d'accélération verticale? Qu'indique celui de la masse d'épreuve dans le gravimètre avant d'être lâché? Dans les trois cas ils indiquent une accélération *vers le haut* d'intensité égale à celle de la pesanteur. En d'autres termes, ils indiquent l'opposé vectoriel de la pesanteur, comme s'ils étaient accélérés *vers le haut*. Dans les trois cas ils étaient immobiles ou en mouvement rectiligne uniforme relativement au sol (relativement au référentiel).

Que la valeur soit *l'opposée* de la pesanteur peut surprendre. On peut s'en convaincre en comparant l'accélération horizontale indiquée par un accéléromètre dans une voiture accélérant et l'accélération verticale qu'il indique: la direction indiquée est dans l'axe joignant arrière-bas vers l'avant-haut, et donc si l'accélération horizontale est bien celle du véhicule, c'est à dire vers l'avant, l'accélération verticale est vers le haut. Le ressenti est cohérent, on se sent enfoncé vers le dos du siège, ainsi qu'enfoncé vers le bas, vers l'assise du siège, à l'opposé de l'indication de l'accéléromètre, et de manière cohérente avec ce qu'on attend de la pesanteur. En conséquence la pesanteur ressentie relativement au véhicule est vers l'arrière et le bas.



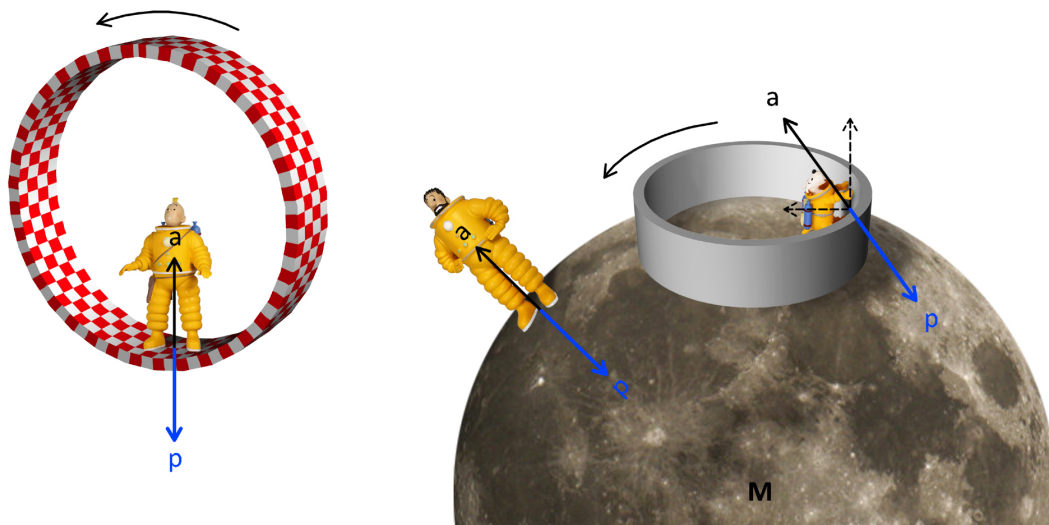
voiture-v3.jpg

Le vecteur p est la pesanteur selon le référentiel du véhicule. Le vecteur a est l'indication de l'accéléromètre. Dans le premier cas p est aussi la pesanteur selon le référentiel terrestre (les deux référentiels sont identiques). Dans les deux cas a est la somme de l'inverse de la pesanteur dans le référentiel terrestre et de l'accélération du véhicule mesurée dans le référentiel terrestre (nulle dans le premier cas, non nulle dans le second).©Mailou.

En résumé un accéléromètre indique, en première et grossière approximation, la somme vectorielle de l'accélération en coordonnée et de l'opposé de la pesanteur relative au référentiel. On va retrouver cela dans les différents cas traités. Dans une centrifugeuse, l'accélération en coordonnée (relative au référentiel terrestre) est centripète (le bras tire la cabine vers le centre), la pesanteur dans ce référentiel est vers le bas. L'accéléromètre à l'intérieur pointe à l'opposé de l'assise, et la pesanteur relativement à la cabine est vers l'assise.

Dans un vaisseau-cylindre, la pesanteur dans le référentiel extérieur (relativement auquel le cylindre est en rotation) est nulle, et l'accéléromètre indique une accélération centripète, qui est bien l'accélération en coordonnées. La pesanteur à la surface interne, relativement au cylindre, est bien centrifuge.

Comme l'indication de l'accéléromètre est indépendante de tout référentiel (un observateur lire la même indication quel que soit leurs mouvements respectifs), l'accélération propre est une grandeur vectorielle indépendante du choix de référentiel, contrairement



tintin-v3.jpg

À gauche une tranche de vaisseau-cylindre, au milieu une planète, et à droite une centrifugeuse sur une planète, ce qui combine les deux autres cas. Dans ce dernier cas, la pesanteur relative au cylindre est vers le bas et l'extérieur. Ce qu'on appelle la « force centrifuge » est une pesanteur. ©Mailou75.

à l'accélération en coordonnées. C'est une valeur « absolue », une propriété intrinsèque du mouvement suivi par l'accéléromètre. Elle permet de caractériser un ensemble particulier de mouvements, ceux tels que l'accélération propre est nulle tout au long du mouvement, les « mouvements de chute libre ».

Mesurer la pesanteur avec un accéléromètre

Le procédé pour mesurer la pesanteur (relative à un référentiel) avec un accéléromètre consiste donc simplement à lui donner une accélération en coordonnées nulle, c'est à dire le maintenir immobile ou en MRU relativement au référentiel. Il indique alors une accélération vers le haut, l'opposé vectoriel de la pesanteur.

Mais cela implique réciproquement qu'un accéléromètre indique la pesanteur relativement au référentiel relativement auquel il est immobile (par exemple parce que attaché), quel que soit ce référentiel, que ce soit celui défini par la Terre, par la cage de la centrifugeuse, par le sol habitable du vaisseau-cylindre, par la carlingue de l'avion zéro-G ou par un vaisseau spatial où règne l'impesanteur. Réciproquement on peut mesurer l'accélération d'un objet en utilisant un dispositif conçu pour la mesure de la pesanteur, comme un fil à plomb.

À ce propos, une classique question piège: dans quelle direction va une flamme de bougie à l'intérieur d'une voiture (bien fermée) en phase d'accélération? Réponse vers l'avant. En effet, de même que la flamme d'une bougie immobile va vers le haut, à l'opposé de la pesanteur, dans la direction indiquée par un accéléromètre, elle ira dans le sens de l'accélération de la voiture! Plus généralement, la poussée d'Archimède est dans le sens opposé à celui de la pesanteur⁴. (Sans entrer dans les détails, c'est en fait un peu plus compliqué que cela pour la flamme de bougie: même si l'enceinte est bien fermée.)

On notera qu'un accéléromètre à la surface de la Terre indiquera une accélération vers le haut, alors qu'un gravimètre absolu mesure une accélération vers le bas, tant par l'affichage (il est prévu pour mesurer la pesanteur) que par la méthode de mesure. Un accéléromètre mesure sa propre accélération alors qu'un gravimètre absolu mesure l'accélération d'un objet par rapport à l'instrument.

Pesanteur et accélération propre

On a donc un nouvel aspect de la pesanteur, qui pourrait la définir : étant choisi un référentiel, la pesanteur en un lieu et instant est, pour ce référentiel, l'opposée vectorielle de l'accélération propre d'un immobile en ce lieu et instant, relativement à ce référentiel.

On peut observer là un joli renversement conceptuel. La pesanteur est présentée comme relative (dépendant du choix de référentiel) alors que souvent pensée absolue, par confusion avec la gravitation. Par ailleurs l'accélération propre est présentée comme de mesure absolue alors que l'accélération usuelle est définie comme relative. D'où une contradiction apparente, la pesanteur étant mesurable comme une accélération propre.

La définition comme l'opposée de l'accélération d'un *immobile* donne la clé de l'apparente contradiction: la dépendance au référentiel n'est pas dans « accélération » mais dans « immobile ».

Cet aspect « absolu » de l'accélération propre, qui n'a été définie de manière empirique, interpelle. Ne peut-on pas dire que c'est l'accélération relativement à un certain référentiel? On pourrait, mais ce serait de manière circulaire. Pour un lieu et un instant, on peut toujours trouver un référentiel relativement auquel la pesanteur est nulle, et donc dans lequel l'accélération en coordonnées coïncide avec l'accélération propre. Il suffit de prendre un certain référentiel localement en chute libre, comme un objet tombant tout près de l'objet dont on considère l'accélération. Mais le choix de ce référentiel est ad-hoc, il dépend de l'objet dont on étudie l'accélération propre, et cela ne permet pas d'y voir quelque chose d'absolu, du moins pas de manière simple.

4. On peut aussi considérer un ballon rempli d'hélium attaché par une ficelle, une sorte de fil à plomb inversé.

Par ailleurs un accéléromètre mesure une valeur instantanée. Cette accélération, prise en un même lieu (du référentiel), peut être variable en temps et en espace. Or aussi bien les sensations humaines que les effets sur les objets ne sont pas appréhendés de la même manière selon la rapidité de la variation de l'accélération.

Ce qu'on entend couramment par « pesanteur » est un phénomène très peu variable, tant dans le temps que dans l'espace. À l'opposé, si l'accélération varie très vite autour d'une valeur moyenne stable, on parlera de vibration, de tremblement. Ainsi un sismomètre peut être un accéléromètre conçu pour mesurer les vibrations du sol, alors qu'un gravimètre est adapté à la mesure d'une accélération stable.

Nous pouvons maintenant compléter la définition de la pesanteur: c'est un champ vectoriel peu variable dans le temps et l'espace, de grandeur celle d'une accélération, qui indique l'accélération subie initialement par un corps massif lorsque lâché après avoir été immobile relativement au référentiel choisi, ce qui est aussi l'accélération indiquée par un accéléromètre lors de la phase d'immobilité. Sa direction est par définition la verticale, par convention la pesanteur est orientée vers le bas, et son unité naturelle est celle d'une accélération, le m/s^2 en SI.

Résumé du premier chapitre

Dans ce chapitre la pesanteur a été présentée et étudiée comme phénomène; il n'a pas été question des *causes* de la pesanteur, et du coup il n'y a pas eu besoin de parler de gravitation.

La pesanteur y a été présentée comme un phénomène, ressenti, observable et mesurable, dont les propriétés au premier ordre en font un phénomène universel que l'on peut décrire et caractériser indépendamment de toute analyse causale, qu'on la ressente à la surface d'une planète, à la surface d'un vaisseau-cylindre, ou par son absence dans un vaisseau en orbite.

L'étude de la pesanteur a permis de dégager la notion de référentiel, essentielle à la définition de la pesanteur, qui dépend du (qui est relative au) référentiel. Un référentiel permet de se repérer dans l'espace. Les exemples de référentiel sont ceux concrétisés par un objet approximativement indéformable, servant d'environnement, comme une planète ou un véhicule (avion, vaisseau spatial, etc.). Par exemple, l'état d'impesanteur est vécu dans un véhicule qui sert de référentiel, c'est le cas d'un vaisseau en orbite ou dans un avion $0g$.

Une définition pas trop abstraite de la pesanteur, et donc du poids, relativement à un référentiel (planète, véhicule, vaisseau) est:

Définition P2: Étant donné un référentiel, la valeur du champ de pesanteur en un instant donné et un lieu donné de ce référentiel est définie comme le vecteur, éventuellement nul, tel qu'un objet quelconque immobile relativement au référentiel subit à cet instant une force (le poids de l'objet) égale à sa masse fois ce vecteur, indépendamment de toute autre caractéristique de l'objet.

La définition implique que la pesanteur a la dimension d'une accélération. On peut exprimer la pesanteur directement comme une accélération, avec la définition :

Définition P2': La pesanteur en un lieu et un instant est l'accélération du mouvement d'un objet quelconque initialement immobile, puis lâché de manière à ce qu'il ne subisse aucune influence, accélération prise immédiatement après le lâcher. On parle de pesanteur quand ce vecteur est peu variable dans le temps et dans l'espace.

La pesanteur se mesure avec un accéléromètre. On a aussi introduit la notion d'accélération propre comme une notion indépendante de tout référentiel, définie comme ce que mesure un accéléromètre idéal, ce qui permet une définition plus abstraite de la pesanteur. Cette définition a divers avantages, l'un étant de ne pas parler de force ni de masse. Un autre avantage est de cerner précisément la nature de la dépendance au référentiel:

Définition P3 : Étant donné un référentiel, la valeur du champ de pesanteur en un lieu et instant donnés est l'opposée vectorielle de l'accélération propre d'un point matériel qui est immobile en ce point relativement au référentiel.

et en pratique:

Définition P4: Étant donné un référentiel, l'accélération de la pesanteur en un lieu et instant est l'opposée de ce que mesure un accéléromètre idéal immobile relativement au référentiel.

Annexe A: Concepts importants

Plusieurs concepts ont été introduits en plus de celui de pesanteur, qu'il est utile de formaliser, car on va les utiliser ou les approfondir dans les chapitres qui suivent. Un peu de mathématiques est introduit ici.

Référentiel

Ce que signifie ce terme est très précis, mais ne sera bien défini dans cette série que plus tard. En première approche, c'est un ensemble de lieux qui servent de référence pour décrire tous les lieux et donc les positions de points matériels, les relations spatiales entre objets, ainsi que les mouvements (dont la vitesse et l'accélération). L'esprit humain utilise inconsciemment un référentiel pour organiser les positions et les mouvements. Les cas usuels sont basés sur des objets rigides, comme la Terre (référentiel terrestre), ou des véhicules.

De nombreux concepts physiques sont relatifs à un référentiel, c'est à dire ne prennent une signification précise que si le référentiel n'est pas ambigu. C'est le cas de la position, de la vitesse et de l'accélération d'un côté, mais aussi de la pesanteur et des notions qui vont avec comme le poids ou la verticale.

Trajectoire, mouvement, ligne d'Univers

La notion de mouvement (ou ligne d'Univers) généralise celle de trajectoire. Étant choisi un référentiel, la trajectoire d'un point matériel est la suite, paramétrée par le temps, de ses positions relativement au référentiel. Le mouvement est aussi la suite paramétrée des lieux et instants (ou lieux-instants, ou *événements*) avec lesquels coïncide successivement le point matériel. La trajectoire, ou l'immobilité, est l'apparence du mouvement relativement à un référentiel choisi. Alors qu'un mouvement donné ne dépend pas d'un tel choix, c'est une « chose en soi ». Quand vu comme une suite de lieux-instants un synonyme de « mouvement » est « ligne d'Univers », car alors visualisée comme une ligne dans l'ensemble des lieux-instants (l'espace-temps).

Vu relativement à un référentiel un mouvement est, au sens mathématique, une application d'un paramètre (le temps par exemple) vers la position $t \mapsto X(t) \in R$ (avec R la variété modélisant l'ensemble des positions). Avec un système de coordonnées spatiales, on peut aussi noter en composantes $t \mapsto (x(t), y(t), z(t)) \in \mathbb{R}^3$. On note \dot{X} la vitesse en coordonnées (la dérivée première de la position par rapport au paramètre) et \ddot{X} l'accélération en coordonnées (la dérivée seconde de la position en fonction du paramètre); plus

généralement le point suscrit indique la dérivation par rapport au paramètre. Quand le paramètre est le temps, la première est la vitesse et la seconde l'accélération., les deux relativement au système de coordonnées choisi. Attention, au sens mathématique un mouvement n'est pas juste l'ensemble des événements parcourus, le paramètre est partie inclusive de la notion.

Par la suite on utilisera aussi la notion de mouvement, en termes d'événements de l'espace-temps, comme suite d'événements, avec $t \mapsto (t, x(t), y(t), z(t)) \in \mathbb{R}^4$, où le quadruplet représente un les coordonnées temps-espace d'un événement de M , M étant la variété modélisant l'espace-temps.

Un avantage de cette manière de voir le « mouvement » d'un point matériel est qu'il n'y a pas de différence qualitative entre ce qui est décrit communément comme immobile et « en mouvement ». En tant que suite d'événements paramétrée par le temps il s'agit dans les deux cas d'une ligne paramétrée (alors que l'immobilité s'oppose à la notion de trajectoire spatiale pensée comme ligne).

Accélération propre d'une ligne d'Univers

La notion d'accélération propre d'un mouvement, à un instant de ce mouvement, est ce que mesure ou mesurerait un accéléromètre idéal qui suivrait ce mouvement. Cette observable ne dépend que du mouvement lui-même, et non du choix d'un référentiel, ou d'un système de coordonnées. Elle est distincte de la notion d'accélération en coordonnées, qui se mesure comme la dérivée d'une vitesse dans un référentiel choisi, et dépend du référentiel.

Pesanteur comme champ de l'accélération propre des immobiles

La pesanteur est un champ de vecteurs, c'est à dire la donnée d'un vecteur en chaque lieu et instant. On peut exprimer cela comme une fonction qui à chaque événement associe une accélération, $E \mapsto \vec{p}$, qu'on notera aussi sans flèche suscrite, $E \mapsto p$.

Annexe B : Les vaisseaux-cylindre

L'idée d'utiliser la rotation d'un vaisseau spatial pour créer un espace de vie avec une pesanteur stable et significative est assez ancienne.

La forme particulière d'un cylindre tournant autour de son axe semble avoir été décrite la première fois par le physicien austro-hongrois Hermann Oberth, un des pionniers de l'astronautique (et dont H. von Braun fut un élève). On retrouve l'idée en littérature de science-fiction avec *Rendez-vous with Rama*, de l'anglais A.C. Clarke, un peu avant être décrit avec force détails par le physicien étatsunien Gerard O'Neill. Dans son pays l'idée est nommée « cylindre O'Neil », nonobstant les précédents auteurs. On retrouvera l'idée ensuite dans de nombreux ouvrages de science-fiction pour les vaisseaux adaptés à des voyages pluri-générationnels.