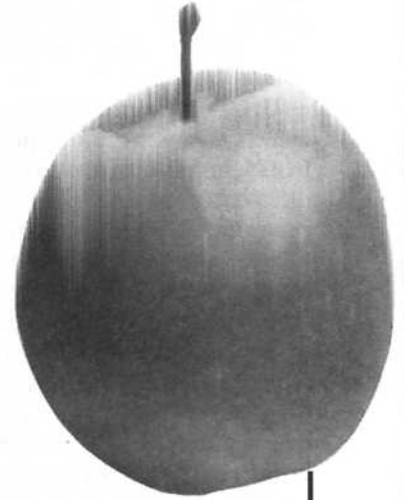


La généralisation des lois de la physique



1^{ère} partie

Le défi de la gravitation-inertie et les relations d'échelle

Comprendre signifie avant tout géométriser (René Thom)

Au cours des siècles, nos connaissances se sont considérablement accrues, et depuis la découverte de l'énergie nucléaire, il y a 50 ans, des progrès spectaculaires ont été accomplis. On parle maintenant de robots, d'intelligence artificielle ou de conquête du cosmos au nom d'une science apparemment triomphante. Cependant, la croyance populaire en une progression accélérée du développement technique n'est pas partagée par tous les spécialistes, et la foi en la science qui était celle des physiciens du début du siècle, est souvent remplacée par le doute. Il n'y a plus de théories suffisamment générales sur lesquelles s'appuyer (ou plutôt il y en a trop mais qui sont peu fécondes), et l'expérimentation à laquelle elles conduisent atteint un coût si exorbitant (pour les accélérateurs de particules par exemple) qu'il dépasse les possibilités financières d'un grand nombre de nations.

Après avoir connu un éclatant développement, la physique moderne est en crise, une crise inavouée de crainte de voir se tarir les crédits de recherche, mais qui n'en est pas moins durement ressentie. Un des problèmes qui contribue à entretenir cette crise est celui posé par les difficultés rencontrées pour étendre les théories unitaires à la gravitation, phénomène dont maintenant encore, nous ne savons pas grand chose et sur lequel nous n'avons aucune prise. Pourtant, dans les cinquante prochaines années, nos réserves énergétiques en combustibles fossiles seront épuisées et nous ne saurons plus quoi faire de nos déchets radioactifs. La maîtrise technologique de l'inertie-gravitation, qui, entre autres, nous permettrait d'évacuer nos polluants nucléaires en direction du soleil, serait fort utile à la survie de nos civilisations et à notre envol vers les étoiles.

Ce qui est exposé dans cet article, tant au plan théorique qu'expérimental, pourrait être le point de départ d'une telle maîtrise.

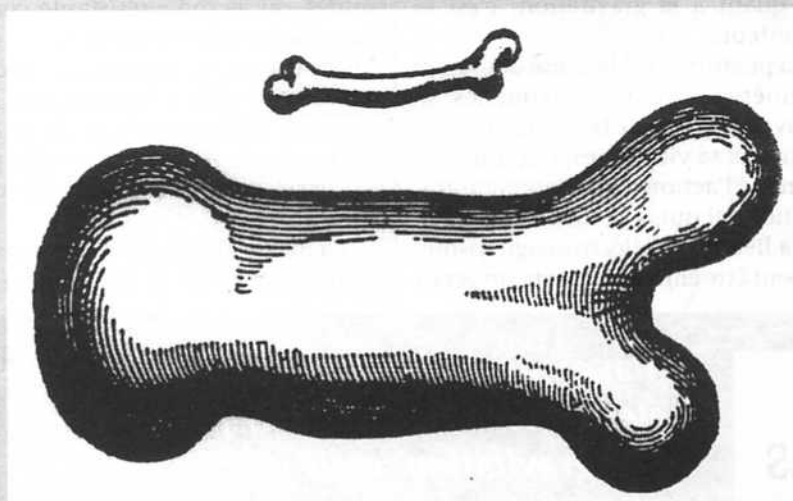
Bien avant la découverte de l'électron et des autres particules chargées, la définition des lois de l'électrodynamique au cours du siècle dernier a conduit en quelques dizaines d'années à la maîtrise de l'électricité. Par contre, s'il y a trois siècles que l'on connaît la loi d'interaction gravitationnelle et la loi de réaction inertielle, la gravitation et l'inertie, malgré la définition qu'en donne la relativité générale, demeurent encore actuellement rebelles à tout développement technologique. Notre impuissance à cet égard pose un problème des plus irritants. La définition d'une échelle propre aux forces d'origine électro-

RÉMI SAUMONT

magnétique, suggérée avant la lettre par certains des écrits de Galilée et de Newton (**Figure 1**), puis utilisée implicitement par la relativité restreinte d'Einstein (**Tableau 1**), permet d'établir en quels termes élémentaires on peut poser ce problème. Il s'agit d'un problème qui concerne les bases mêmes de la physique : c'est celui de la détermination dimensionnelle des grandeurs fondamentales.

Il sera montré dans cet article qu'une telle détermination est liée à la définition du ou des espaces de référence pris en compte.

Figure 1 - Les forces électriques croissent comme le carré de la longueur



Dessin d'un tibia de chat et d'un tibia de tigre réalisé par Galilée.

La résistance mécanique des matériaux, celle d'une colonne à l'écrasement, par exemple, est proportionnelle à une section des corps qu'ils constituent. Elle croît comme le carré de la dimension linéaire, alors que le poids de tels corps croît comme le cube de cette grandeur. Il s'ensuit que les objets, ou les édifices ont une taille limite au delà de laquelle ils risquent de s'effondrer sous leur propre poids. Les forces d'inertie croissent elles aussi comme la masse des corps, les objets mobiles seront donc d'autant plus fragiles, relativement, qu'ils seront plus volumineux. On peut illustrer ces faits, déjà remarqués par Galilée, par des exemples concernant la constitution des êtres vivants. Si on compare l'anatomie de deux animaux dont l'un, le chat, semble être une réduction à l'échelle de l'autre, le tigre, on constate que les os du second, un tibia par exemple, ont un aspect beaucoup plus massif que ceux du premier. Ils ont en cela une forme destinée à compenser leur défaut de solidité relative dû aux lois d'échelle. Ces lois montrent qu'aucune similitude dynamique exacte ne peut exister à l'égard de phénomènes mettant en jeu conjointement par exemple des forces de gravitation et des forces à caractère électromagnétique. La résistance des matériaux, en effet, dépend des forces de cohésion de la matière qui à l'échelle des liaisons interatomiques sont de nature électrique. Et ce sont les forces de ce type qui croissent comme le carré de la longueur.

On constate que la réduction « à l'échelle » de l'étendue d'un domaine de notre univers a pour résultat de modifier le caractère des phénomènes qui s'y déroulent de telle sorte que cette transformation (une similitude physique) que l'on voulait quantitative aboutit à une modification qualitative.

Les lois de la nature sont telles que, contrairement à l'espoir des modélisateurs, la similitude physique générale ne peut pas exister : le concept d'échelle par essence relatif (une similitude physique est indépendante de toute condition de repère) conduit paradoxalement à considérer la taille d'un domaine comme conditionnant la structure et la dynamique des phénomènes qui s'y déroulent. Ce fait tient à ce que, contrairement à ce qui est admis dans la définition du système dimensionnel usuel, des grandeurs fondamentales de même nature comme les différentes forces, par exemple, n'ont pas, ainsi que l'avaient déjà noté Galilée et Newton, la même dimension intrinsèque. Ces forces ne sont considérées comme ayant la même dimension que grâce à l'introduction dans les équations, de constantes dimensionnées (dites universelles).

Le problème fondamental de la physique est le suivant : est-il possible de continuer à penser que les phénomènes de la nature se déroulent dans un espace commun à nombre de dimensions et structures géométriques donnés ou au contraire deviendra-t-il nécessaire d'envisager l'existence d'espaces « imbriqués » à nombres de dimensions différents, c'est-à-dire d'espaces propres à chaque type d'interaction.

Dans le premier cas, la définition d'une théorie unitaire paraît maintenant nécessiter une auto-similitude qui ne peut exister que si l'espace pris en compte a une structure fractale, c'est la théorie développée par G. Ord¹ puis par L. Nottale et J. Schneider² qui ne s'applique pour l'instant qu'à la microphysique quantique. Dans le second, le problème de la définition géométrique des « interfaces » entre espaces doit être résolu. Dans ce cas, il est simple de déterminer les conditions d'une interactivité entre des phénomènes pourtant aussi différents que, par exemple, l'électromagnétisme et la gravitation car les problèmes d'hétérogénéité dimensionnelle intrinsèque peuvent être

évacués sur des géométries multidimensionnelles euclidiennes mathématiquement différentiables.

Les interactions fondamentales

Toute la dynamique de notre monde repose sur la manifestation des interactions fondamentales qui correspondent à ce qu'on appelait les forces.

Actuellement, on reconnaît de manière sûre quatre types d'interactions qui correspondent à quatre types de champs de force : les interactions gravitationnelle, électromagnétique, forte et faible.

Les deux premières, à particule d'échange de masse nulle, ont une portée infinie, et se manifestent à notre échelle, alors que les deux autres, qui mettent en jeu des forces nucléaires, ont un rayon d'action très limité, de telle sorte que nous n'en prenons pas conscience directement. Ces forces nucléaires sont entre elles fort différentes y compris en ce qui concerne leur portée, alors qu'il ne semble pas en être de même pour les forces gravitationnelle et électromagnétique qui toutes deux agissent à

l'échelle de l'univers.

L'intensité de l'action des forces électromagnétique et gravitationnelle décroît bien sûr avec l'éloignement de leur source, et, pour l'une comme pour l'autre, cette décroissance est proportionnelle au carré de la distance. Ce qui permet essentiellement de les distinguer, c'est que la première s'exerce sur des corps chargés électriquement, et ceci indépendamment de leur masse, alors que la seconde s'exerce en fonction de la masse et indépendamment de la charge électrique.

L'électromagnétisme, c'est ce qui constitue notre univers familier et complice, c'est l'électricité,... et la chimie, l'informatique, les fusées, la télévision, le radar, la lumière, les rayons X,... c'est aussi le vecteur des phénomènes moteurs que met en jeu notre technologie y compris lorsqu'elle utilise l'énergie d'origine nucléaire ; quant à la gravitation, c'est la pesanteur.

La pesanteur est la cause d'une des premières épreuves auxquelles se trouve confronté le bébé qui vient de naître ; et sa vie durant, l'homme est soumis à l'action du phénomène gravitationnel qui, à la différence de ce qui a lieu pour l'électromagnétisme, ne peut être éliminée par aucun écran

(Figure 2). Nous nous en accommodons sans pouvoir la modifier en aucune façon.

La masse, le phénomène d'inertie et les forces fictives

Nous devons aussi nous accommoder de la manifestation des forces d'inertie qui apparaissent au cours de l'accélération (la variation de vitesse ou de direction) du mouvement des corps pesants. Là encore, aucun écran n'est efficace et nous ne savons pas non plus échapper à l'action de ce type de force. La force d'inertie (Figures 3 et 4), c'est, pour le commun des mortels, ce qui projette la tête de l'automobiliste dans le pare-brise de sa voiture lors d'un ralentissement brutal, ou, la force résistante contre laquelle le moteur du véhicule doit lutter au cours de chacune des accélérations. En ville, c'est une cause majeure de consommation de carburant ; plus la voiture est lourde (plus sa masse est grande) plus elle consomme.

La masse (au repos) d'un corps est (proportionnelle à) la quantité de

PRINCIPES MATHÉMATIQUES

DE LA

PHILOSOPHIE NATURELLE,

Par feu Madame la Marquise DU CHASTELLET.

TOME SECOND



A PARIS,

DESAIN & SAILLANT, rue S. Jean de Beauvais.
Chez LAMBERT, rue & à côté de la Comédie Française,
au Parnasse.

M. D. C. C. L. V. I.

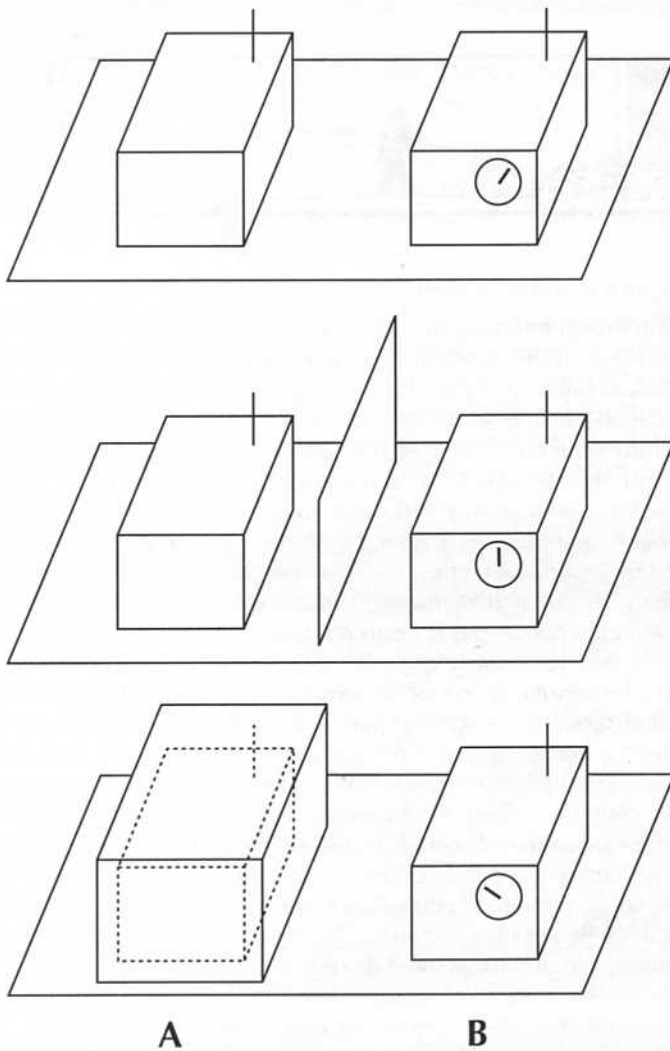
AVEC APPROBATION, ET PRIVILEGE DU ROI.

« J'ai expliqué jusqu'ici les phénomènes célestes et ceux de la mer par la force de la gravitation, mais je n'ai assigné nulle part la cause de cette gravitation. Cette force vient de quelque cause qui pénètre jusqu'au centre du Soleil et des planètes, sans rien perdre de son activité ; elle n'agit point selon la grandeur des superficies, (comme les causes mécaniques) mais selon la quantité de la matière ; et son action s'étend de toutes parts à des distances immenses, en décroissant toujours dans la raison doublée des distances. »

Isaac Newton

Principes mathématiques de la philosophie naturelle, Du système du monde, Livre Troisième, p.178.

Figure 2 - L'effet d'écran



L'effet d'écran se manifeste, par exemple, lorsqu'on écoute une émission de radio dans une voiture qui circule en ville. Le passage dans des rues étroites bordées de grands immeubles produit une atténuation notable du signal capté par l'antenne.

Un simple panneau en cuivre (métal conducteur de l'électricité), relié à la terre suffit à absorber une partie importante de l'énergie transmise par un émetteur A à un récepteur B. Et, si au lieu d'un écran plan, on utilise une boîte de cuivre enfermant l'émetteur, on constatera alors que le récepteur ne reçoit plus aucun signal. On a alors réalisé ce qu'on appelle une cage de Faraday.

L'effet d'écran est une caractéristique de l'électromagnétisme. Il est dû à ce que l'interaction électrique peut avoir soit la forme d'une attraction soit celle d'une répulsion. Un tel effet n'existe pas pour la gravitation qui ne met en jeu qu'un phénomène d'attraction.

matière qui le constitue. Elle a la dimension du produit d'un volume : L^3 (le cube d'une longueur) par une densité : D (appelée : masse volumique). En dehors de toute considération de frottement ou de résistance de l'air, plus un corps a une grande

masse, plus la force nécessaire pour lui faire acquérir, en un temps donné, une vitesse donnée, est grande. La force d'inertie qui apparaît ainsi, en s'opposant au mouvement lorsqu'on soumet un tel corps à une accélération, est directement propor-

tionnelle à la masse de ce corps, à sa masse d'inertie.

L'inertie de la masse se manifeste aussi par l'apparition d'une force centrifuge (Figures 5 et 6) qui est observée lorsque la trajectoire d'un corps en mouvement est déviée de la ligne droite. Elle s'exerce dans la direction opposée à celle de la déviation de ce mouvement (le corps tend à poursuivre son mouvement dans la direction initiale). Son intensité est égale à celle de la force centripète exercée pour dévier la trajectoire. Pour les occupants d'une voiture, c'est la force qui les presse vers l'extérieur des virages, et pour le motocycliste, c'est celle qui l'oblige à incliner sa machine vers l'intérieur des virages.

On qualifie les forces d'inertie de « fictives » parce qu'elles n'ont apparemment de réalité que pour un référentiel lié au corps accéléré. Dans *Physics*, livre édité par le « Physical Science Study Committee » américain, on trouve par exemple en 20-10 les affirmations suivantes : « les forces produisant les accélérations sont réelles, les forces d'inertie par contre ne sont pas réelles. Si elles l'étaient la résultante serait nulle ». Et à propos de la force centrifuge : « Dans un système où la description de Newton est valable, elle n'existe pas, tout simplement ».

De telles affirmations méritent d'être commentées ; en effet, dans un mouvement circulaire étudié à partir du référentiel convenablement choisi, seule la force centripète, intervenant pour donner au mouvement son caractère circulaire, serait une force réelle. L'éclatement d'un volant qui tourne trop vite est pourtant un phénomène bien réel et irréversible et qui aboutit à un état qui pourra être observé à partir de n'importe quel référentiel ; il en est de même en ce qui concerne la consommation du moteur de l'automobile, lequel, bien qu'ayant lutté contre une force qui n'existe pas, a vidé le réservoir de son carburant, ce que peut vérifier l'observateur au repos, lorsque la voiture est de nouveau immobile par rapport à lui.

Il faudrait donc expliquer ces constatations et il faudra aussi revoir la signification d'un certain nombre de notions classiques qu'un usage répété a transformé en vérités trop facilement admises.

A la différence des autres forces, l'inertie ne paraît pas, à première vue, correspondre à une interaction d'un

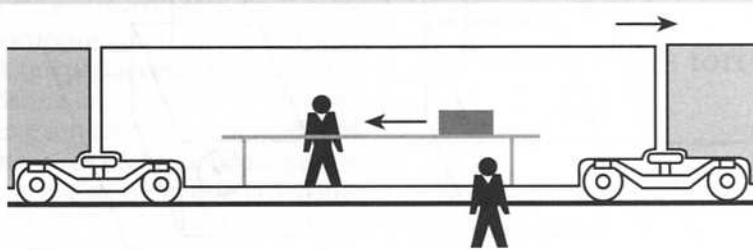
type particulier bien qu'Einstein ait insisté sur le fait que, localement, il est possible, au moyen d'une manipulation portant sur les axes de référence, de remplacer sa manifestation par une manifestation de pesantour ou inversement. C'est ce que l'on a appelé « le principe d'équivalence ».

Ce principe fait partie des fondements de la relativité générale, de telle sorte que cette théorie peut être considérée comme un système unifiant la gravitation et l'inertie en aboutissant à une géométrisation de la masse qui remplace ainsi la notion qu'en avait Newton (**Tableau 1**).

La pesantour

Selon la loi de la gravitation de Newton, deux corps mis en présence s'attirent mutuellement. Cette force d'attraction, considérée comme une force centrale, est directement proportionnelle au produit des masses de chacun d'eux et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare (**Tableau 2**). Un corps de petite taille au voisinage d'un astre est donc attiré, et s'il n'est pas retenu par un support solide de celui-ci, il vient s'y écraser. En l'absence de tout support, et pour éviter une telle éventualité, il faut, par exemple, le « satelliser », c'est-à-dire qu'il faut que le corps (le satellite) tourne

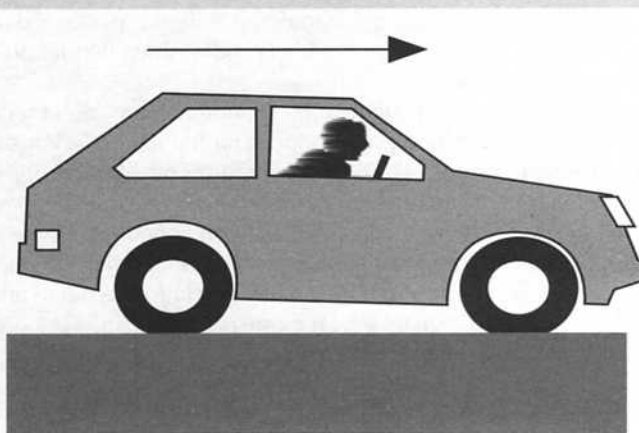
Figure 3 - La force d'inertie d'entraînement est une force fictive



Lorsqu'une automobile accélère, ses passagers ont le sentiment d'être projetés vers l'arrière, alors que, lorsqu'elle freine, ils se sentent projetés en avant. Ils attribuent ces faits à l'action d'une force d'inertie qui s'opposerait aux variations de vitesse qui leur sont imposées par le mouvement d'accélération du véhicule. L'accélération dont ils font l'objet par rapport à la voiture est appelée accélération d'entraînement. Supposons, maintenant, que le véhicule soit un wagon de chemin de fer dans lequel on aurait placé une longue table rigoureusement horizontale et parfaitement polie et sur laquelle un mobile pesant pourrait glisser sans frottement. Dans de telles conditions idéales, le démarrage du wagon et son accélération par rapport à la voie n'emmènerait pas le corps qui conserverait la même position pour un observateur resté sur le quai. Par contre un observateur placé dans le wagon constaterait que ce mobile démarre vers l'arrière du train et est alors l'objet d'un mouvement accéléré par rapport à la table sous l'effet d'une force dite d'inertie qui évidemment n'a aucune existence pour l'observateur du quai puisque le mobile n'a pas bougé par rapport à lui. C'est la raison pour laquelle, cette force dont on peut annuler l'existence par un changement de référentiel est qualifiée de fictive. En réalité, la distinction entre forces réelles et forces fictives, n'a pas le caractère de simplicité qui est celui de cette expérience. Le principe d'équivalence, utilisé par Einstein, montre en effet qu'une force de pesantour, considérée comme une force réelle, peut aussi être annulée par un changement de référentiel.

Figure 4 - La force d'inertie et l'énergie

L'accélération d'une automobile est directement proportionnelle à la force propulsive exercée par le moteur (en faisant bien sûr abstraction des pertes par glissement et frottement) et inversement proportionnelle à la masse entraînée. Le moteur de la voiture communique donc au véhicule une certaine énergie cinétique qui se retrouve dissipée par les freins au cours du ralentissement qui suit. Au cours d'un trajet urbain la majeure partie de l'énergie fournie par le moteur est perdue de cette manière. Il serait possible d'utiliser un système ralentisseur, une dynamo chargeant une batterie d'accumulateurs par exemple, qui permettrait de récupérer l'énergie acquise au cours de chacune des accélérations ; dans la mesure où il n'y aurait que des ralentissements suivant les accélérations et à l'exclusion de tout arrêt, on constaterait alors, en tenant compte des pertes d'énergie produites par les frottements divers et le mauvais rendement des dispositifs intermédiaires, qu'on aboutit à un bilan énergétique nul. Tout se passerait, à cet égard, comme si aucune force d'inertie ne s'était manifestée. Ce fait serait encore plus évident si l'on prenait comme exemple un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur électrique.



La force exercée par un aimant décroît comme la puissance trois de la distance

A partir de la théorie moderne de l'électromagnétisme, le calcul montre en effet que le champ exercé à distance par un dipôle magnétique (ou électrique) donné décroît comme la puissance trois de cette distance. Les pôles Nord et Sud d'un aimant ne peuvent être dissociés de telle sorte que ce dernier doit être considéré comme un dipôle et c'est ainsi que Newton, grâce à son grand talent d'expérimentateur, a découvert cette propriété : « La force de gravité est d'un autre genre que la force magnétique. Car l'attraction magnétique n'est point comme la quantité de matière attirée. Certains corps sont plus attirés par l'aimant, d'autres moins : et plusieurs ne le sont point du tout. La force magnétique d'un même corps peut être augmentée ou diminuée, elle est quelquefois beaucoup plus grande par rapport à la quantité de matière que la force de gravité, elle ne décroît point en s'éloignant de l'aimant en raison doublée de la distance, mais presque en raison triplée, autant que je l'ai pu déterminer par des expériences assez grossières. »

« librement » autour de l'astre de manière à ce que la force centrifuge mise en jeu puisse compenser la force de gravitation.

S'il s'agit d'une capsule habitée, ses passagers constatent que les objets non arrimés qu'elle contient se

mettent à « flotter en l'air », et qu'il en est ainsi pour eux-mêmes. On dit alors qu'ils sont en « apesanteur ». Ce terme ne correspond pas à la réalité ; la pesanteur continue à s'exercer, et ce n'est que son effet qui est contrebalancé par la force centrifuge

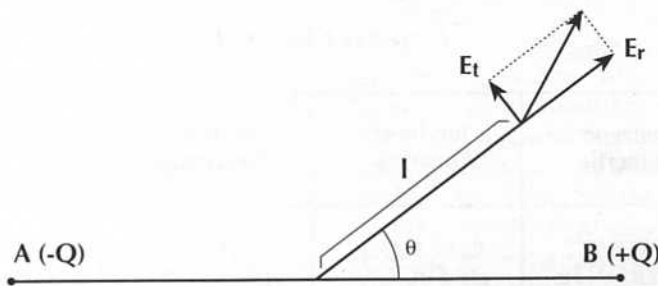
en donnant aux passagers l'impression d'un mouvement libre.

On a une situation de cet ordre lorsqu'on étudie la chute d'un corps au voisinage proche d'un astre comme la Terre. En l'absence de résistance de l'air, le corps est dit en chute libre, il n'est soumis à aucune force de contrainte mécanique interne, bien qu'il fasse l'objet d'une accélération importante (9,81 m/s/s). De même que dans l'expérience de satellisation, l'action de la force d'inertie révélée par l'accélération est répartie en tous les points matériels de la structure tridimensionnelle du corps de manière à correspondre en chaque point à celle produite par le champ de pesanteur locale.

On attribue à ce champ une structure uniforme identique à celle du champ d'inertie. L'accélération ainsi communiquée au corps d'épreuve (dont on néglige l'intervention dans la production du champ) est une constante fonction de son intensité. Elle pourrait être de 1000 g et plus (1000 fois l'accélération du champ de pesanteur terrestre) elle ne serait pas, en principe, ressentie au sein du mobile.

En réalité, il n'en est pas exactement ainsi, la notion de champ de pesanteur, comme l'a analysée Marie-Antoinette Tonnelat dans son livre : *Théorie électromagnétique et Relativité*³ n'est qu'une approximation à caractère local ; du fait de la géométrie de la source (supposée sphérique), les lignes de force du champ ne sont pas rigoureusement parallèles et équidistantes et ceci d'autant moins que l'intensité du champ décroît comme le carré de la distance séparant le corps d'épreuve du centre de cette source. L'accélération n'est pas rigoureusement constante, et croît à mesure que le corps tombe. Le champ moteur (la pesanteur de l'astre) n'est pas alors exactement superposable au champ d'inertie dépendant du

Éléments de la théorie du dipôle et relations d'échelle



Champ créé par un dipôle constitué de deux charges électriques $-Q$ et $+Q$ séparées par une distance AB . E_t et E_r étant les composantes tangentielle et radiale, on a, par exemple, pour cette dernière :

$$E_r = \frac{P}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{2\cos(\theta)}{r^3} \text{ où } P \text{ est le moment électrique dipolaire } P = Q \cdot \overline{AB}$$

Dans ces conditions, l'intensité du champ décroît comme la puissance trois de la distance, mais ceci uniquement si le dipôle est considéré comme ayant des caractéristiques fixes. Il n'en sera pas de même dans les conditions de similitude générale, car alors, l'échelle pour la dimension linéaire λ s'applique bien à l qu'à AB . On aura alors q étant l'échelle pour la charge et ϵ l'échelle pour le champ :

$$\epsilon = \frac{q\lambda}{\lambda^3} = q\lambda^{-2}$$

Ainsi, comme pour une masse (charge) isolée, le champ dipolaire décroît à distance comme le carré de la dimension linéaire du domaine physique considéré.

Le champ est défini par une relation de la forme $F = Q \cdot E$

En termes de similitude on a : $\phi = q \epsilon$ où ϕ est l'échelle de force

On a donc : $q = \phi \epsilon^{-1}$ et $\epsilon = \phi \epsilon^{-1} \lambda^{-2}$ soit $\phi = \epsilon^2 \lambda^2$

On voit que pour $\epsilon = 1$ la force d'origine électrique croît comme le carré de la longueur.

mouvement ainsi accéléré.

Qu'en est-il, maintenant du phénomène d'inertie, pris en soi ?

En quoi la force d'inertie peut-elle être distinguée des autres forces ?

Ce qui distingue la force d'inertie, ce n'est pas son caractère fictif, car, selon le principe d'équivalence, elle le partage avec la gravitation.

Imaginons donc, un instant, que les phénomènes d'inertie n'existent plus, pour aucun référentiel. Dans un tel cas, en l'absence de frottement, la moindre force suffirait à communiquer « instantanément » une « vitesse » infinie à tout corps quel qu'il soit... Le temps lui-même n'existerait

probablement plus et les notions précédentes n'auraient plus de sens. Cette supposition extrême montre, que le caractère essentiel du phénomène d'inertie c'est sa nature temporelle (Figure 7).

Ne peut-on pas alors, considérer ce phénomène comme un processus de contre réaction ou de rétroaction négative (au sens des électromécaniciens) à tout phénomène d'accélération, quelle que soit sa cause ? La définition qu'en donne le récent dictionnaire de physique de F. Le Lionnais et E. Lévy pourrait le faire penser : « inertie : capacité d'un corps matériel à modérer les modifications de vitesse que lui imposent les actions mécaniques auxquelles il peut être soumis ».

Dans ce cas, la structure de répartition spatiale des forces inertielle élémentaires devrait, pour un référen-

tiel lié au mobile, correspondre en tous les points à celle du phénomène initiateur, comme pour la pesanteur en champ uniforme, et ceci de manière à ce qu'il n'y ait pas à faire intervenir de processus de transmission de l'action en retour au sein du corps accéléré, ce qui conduirait alors à la définition de temps élémentaires différents. En particulier, lorsque le phénomène moteur (ou résistant) est de nature électromagnétique, la répartition des forces élémentaires d'inertie devrait, au sein du corps ainsi accéléré, correspondre à celle des forces motrices (ou résistantes) élémentaires. Il ne devrait ainsi apparaître au sein du mobile aucune force de contrainte mécanique dépendant du mouvement.

L'expérience montre qu'au contraire, lorsque l'accélération du mouvement d'un corps étendu dans l'es-

Tableau 1 - Principaux systèmes dimensionnels et leurs relations de similitude

| Base dimensionnelle Echelles de ... | | Systèmes traditionnels | Systèmes à base réduite | | | |
|--|---------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| | | CGS, MKS, etc | Electromagnétisme et Inertie | Inertie et Pesanteur | Inertie et Gravitation | Electromagnétisme Inertie Gravitation |
| | | | RELATIVITE RESTREINTE | RELATIONS DE FROUDE | SYSTEME ASTRONOMIQUE | RELATIVITE GENERALE |
| | | Longueur Masse Temps | Longueur Masse volumique | Longueur Masse volumique | Longueur Masse volumique | Longueur |
| Longueur | λ | λ | λ | λ | λ | λ |
| Force | φ | $\mu\lambda\tau^{-2}$ | $\delta\lambda^2$ | $\delta\lambda^3$ | $\delta^2\lambda^4$ | 1 |
| Temps | τ | τ | λ | $\lambda^{1/2}$ | $\delta^{-1/2}$ | λ |
| Masse | μ | μ | $\delta\lambda^3$ | $\delta\lambda^3$ | $\delta\lambda^3$ | λ |
| Masse volumique | δ | $\mu\lambda^{-3}$ | δ | δ | δ | λ^{-2} |
| Vitesse | β | $\lambda\tau^{-1}$ | 1 | $\lambda^{1/2}$ | $\delta^{1/2}\lambda$ | 1 |
| Accélération | γ | $\lambda\tau^{-2}$ | λ^{-1} | 1 | $\delta\lambda$ | λ^{-1} |
| Impulsion | χ | $\mu\lambda\tau^{-1}$ | $\delta\lambda^3$ | $\delta\lambda^{7/2}$ | $\delta^{3/2}\lambda^4$ | λ |
| Energie | ε | $\mu\lambda^2\tau^{-2}$ | $\delta\lambda^3$ | $\delta\lambda^4$ | $\delta^2\lambda^5$ | λ |

pace est provoquée par l'intervention de forces électromagnétiques, et ceci de quelque manière que ce soit, il apparaît toujours au sein du mobile des efforts de tension mécanique. S'il en était autrement, on aurait réalisé par ces moyens électromagnétiques, l'équivalent d'un générateur de champ gravifique, et il serait inutile de poursuivre cette étude.

Il n'y a apparemment rien de commun, en effet, entre une force de pesanteur accélérant un corps en chute libre et la force de même intensité plaquant sur le dossier de son siège le pilote d'un avion à réaction au cours d'un catapultage ; ce pilote subit des forces de contraintes internes propagées, susceptibles, si l'accélération augmente trop, de provoquer une altération irréversible de la structure de son corps, car la force qui le propulse ne s'applique directement qu'aux molécules de son dos en contact avec le siège.

Dans le premier cas la force motrice est appliquée selon un volume à trois dimensions, et son action n'a pas de manifestation locale observable (un accéléromètre lié au mobile n'indique rien), alors que dans le second, cette force n'est appliquée que selon une section, une surface, et son action sollicite les forces de cohésion de la matière, car cette action n'est pas homogène spatialement à celle de la force d'inertie qui demeure elle homogène à l'espace tridimensionnel (un accéléromètre situé sur le tableau de bord donne la valeur de l'accélération à laquelle l'avion est soumis).

Le phénomène d'inertie répond donc à des critères dimensionnels indépendants de ceux caractérisant les forces motrices ou résistantes, et il ne doit pas être considéré comme un simple phénomène de rétroaction à la manifestation de ces forces qui, en quelque sorte, ne font, en accord avec le principe de Mach, qu'en démasquer l'existence.

Mais qu'entend-on exactement par l'expression « critères dimensionnels » ? Qu'est-ce que les notions de « dimension » et « d'homogénéité dimensionnelle » ?

La notion de dimension et la similitude physique

La notion de dimension physique a été définie par Fourier au début du XIX^{ème} siècle, afin de rendre homogènes les équations rendant compte des lois, et ainsi d'éviter, par exemple, que l'on additionne des mètres et des kilogrammes, ou que l'on établisse une égalité entre des volts et des calories, c'est-à-dire entre des grandeurs qui ne se mesurent pas de la même manière.

Les grandeurs sont ainsi définies par leur « formule de dimension » dans le cadre de ce qu'on appelle un système dimensionnel. Les deux membres d'une égalité entre des grandeurs ou des groupes de grandeurs (des produits de puissances de grandeurs) doivent avoir la même dimension. On dit, par exemple, que la force d'inertie F a la dimension du

produit d'une masse M par une accélération G et que l'accélération elle-même a la dimension du quotient d'une longueur L par le carré d'un temps T , c'est-à-dire, ce qui est équivalent, celle du produit d'une longueur par la puissance moins deux d'un temps : on a donc :

$$F = M L T^{-2}$$

c'est la relation fondamentale de la dynamique. On ramène la représentation dimensionnelle des différentes grandeurs à celle d'un nombre plus restreint de grandeurs dites fondamentales qui constituent alors ce qu'on appelle la base du système d'unités utilisé. Son choix, c'est-à-dire le nombre de grandeurs primaires employées, dépend du nombre et de la nature des relations physiques que l'on prend en compte (elles doivent être indépendantes) (**Tableau 1**).

La relation de la dynamique de Newton, qui vient d'être citée, donne la dimension d'une force. Elle comporte quatre grandeurs, et permet de définir ainsi une base dimensionnelle égale à trois (trois grandeurs indépendantes : par exemple : masse, longueur, temps) ; en effet, lorsque trois des quatre grandeurs considérées sont choisies arbitrairement, la quatrième est déterminée par la loi. Et, dans le cas général, cette règle répond à tous les cas de figure ; en effet, si on remplace la masse par son équivalent dimensionnel : $D L^3$, l'expression de la force devient : $F = D L^3 L T^{-2} = D L^4 T^{-2}$ et comporte encore quatre grandeurs, la base dimensionnelle demeure inchangée.

Par contre, la réduction de la base de trois à deux (deux grandeurs choisies arbitrairement) nécessite la prise en compte d'une autre relation indépendante de la première, et dans laquelle ne figurera aucune grandeur autre que les précédentes.

Ces exemples montrent que la base dimensionnelle d'un système d'unités est donnée par la différence entre le nombre des grandeurs entrant dans les équations fondamentales et le nombre de ces dernières.

Cependant, les choses ne sont pas toujours aussi simples qu'on pourrait le penser au vu des définitions précédentes, et il arrive qu'on fasse une distinction entre différents groupes de grandeurs de même nature parce que ces grandeurs ne varient pas de la même manière en fonction d'une même variation des autres grandeurs.

Tableau 2 - Les relations d'échelle pour les forces agissant à grande distance

| Phénomènes | Echelle de Force | | | |
|-------------------|------------------|--|--|-------------------------------------|
| Gravitation | φ_g | $= \frac{\mu_i \cdot \mu_i}{\lambda^2}$ | $= \frac{\delta \lambda^3 \cdot \delta \lambda^3}{\lambda^2}$ | $= \delta^2 \lambda^4$ |
| Inertie | φ_i | $= \frac{\mu_i}{\tau^2}$ | $= \frac{\delta \lambda^3 \cdot \lambda}{\tau^2}$ | $= \frac{\delta \lambda^4}{\tau^2}$ |
| Electromagnétisme | φ_e | $= \frac{\mu_e \cdot \mu_e}{\delta \lambda^2}$ | $= \frac{\delta \lambda^2 \cdot \delta \lambda^2}{\delta \lambda^2}$ | $= \delta \lambda^2$ |
| Pesanteur | φ_p | $= \mu_i$ | $=$ | $= \delta \lambda^3$ |

λ = Echelle de longueur

δ = Echelle de masse volumique (densité)

μ_i = Echelle de masse d'inertie

μ_e = Echelle de masse électrique (charge)

C'est la raison pour laquelle l'analyse dimensionnelle doit toujours être complétée et justifiée par la définition des conditions de similitude physique du domaine auquel on l'applique.

Lorsque, dans un domaine physique où intervient un phénomène caractérisé par une relation entre grandeurs, on fait varier une de ces grandeurs, on lui fait subir un changement d'échelle. Une échelle pour une grandeur est le rapport existant entre la valeur que prend la grandeur et celle qu'elle avait précédemment. Les

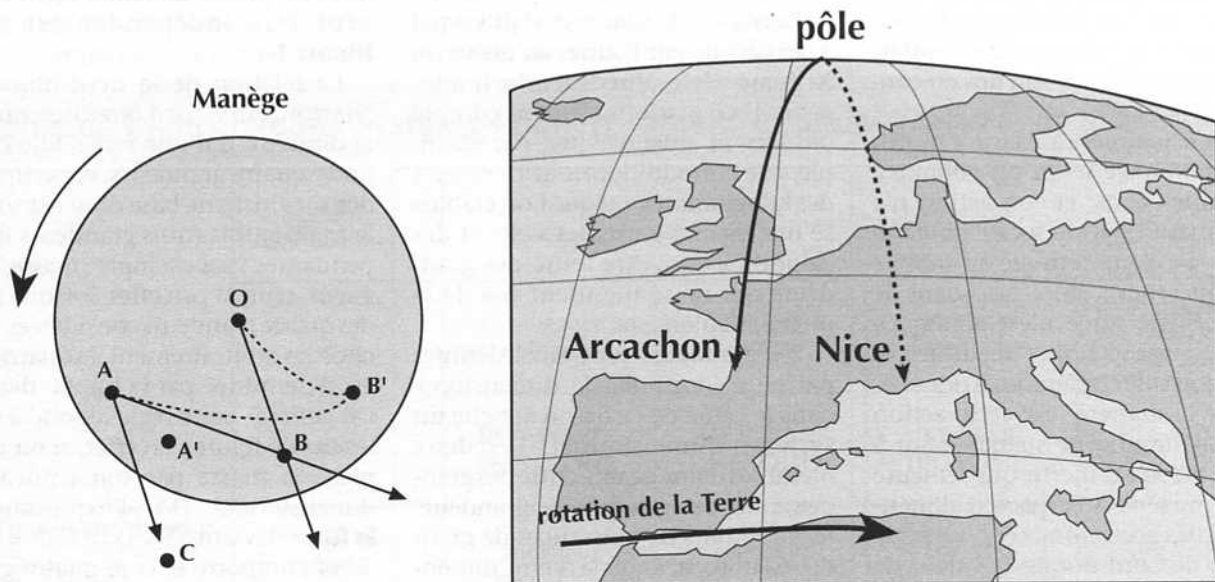
autres grandeurs subissent alors généralement aussi un changement d'échelle déterminé par la loi physique à la définition de laquelle elles participent.

A chaque relation physique entre grandeurs (exprimant une loi) correspond donc une relation entre échelles, entre rapports de grandeurs, une relation de similitude physique. Une telle équation n'a pas à tenir compte des constantes, fussent-elles dimensionnées ; il en résulte que son énoncé est indépendant de toute condition de repère, de telle sorte qu'elle

a un caractère de généralité que ne possède pas la relation dont elle rend compte.

On peut cependant lui imposer des conditions restrictives utilisées dans le but d'en simplifier l'application. C'est ce qui est fait pour la pesanteur. En effet, à l'égard du phénomène de gravitation considéré de cette manière, un changement d'échelle pour une grandeur telle que la dimension linéaire du mobile, par exemple, ne représente qu'une partie des changements d'échelle de longueur qu'impliquerait l'application

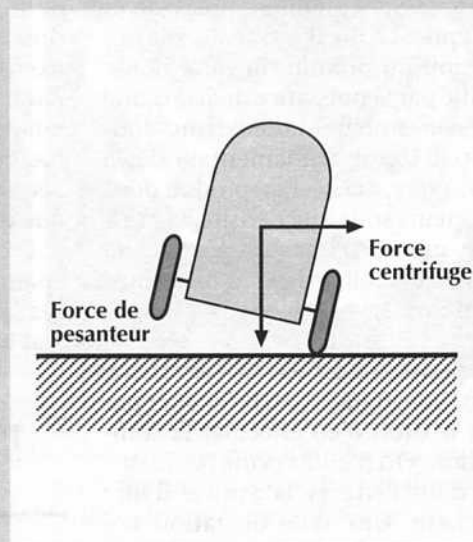
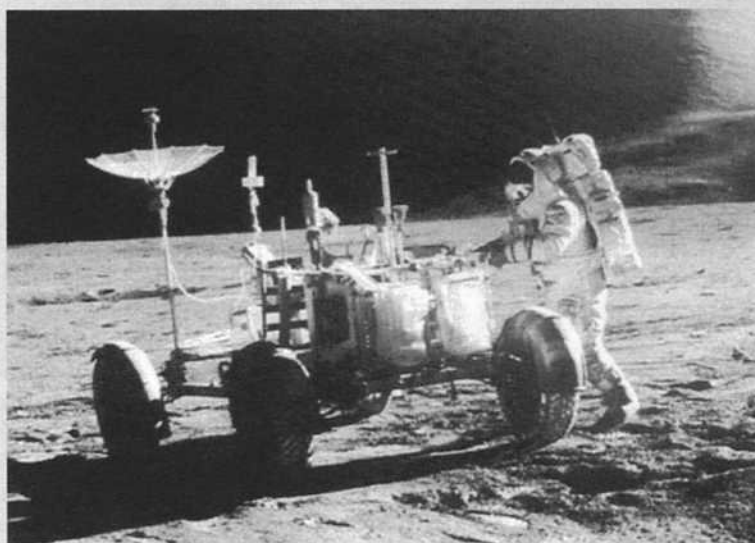
Figure 5 - Un exemple de force fictive : la force de Coriolis



Le sujet A placé sur un manège en rotation et immobile par rapport à lui n'éprouve aucune difficulté pour lancer une balle au sujet C qui regarde le manège tourner et qui peut, en première approximation, être considéré comme un référentiel d'inertie. Il lui sera beaucoup plus difficile de la lancer correctement au sujet B placé comme lui sur le manège, car durant le trajet parcouru par la balle, celui-ci sera venu en B'. Si A a lancé la balle dans la direction AB, il aura l'impression qu'elle suit un trajet dévié vers la droite qui lui fait manquer son but et ceci sous l'influence de ce qu'il interprétera comme une force : la force de Coriolis, alors que pour l'observateur C la balle a suivi un trajet rectiligne. La rotation du manège fait donc apparaître pour les observateurs entraînés par son mouvement deux forces fictives : cette force de Coriolis correspondant à ce qu'on appelle l'accélération complémentaire, et, bien entendu la force centrifuge. Afin de bien caractériser la nature particulière de la première de ces forces et la distinguer de la seconde, il suffira au sujet A de renouveler l'expérience en se plaçant au centre O du manège. Il aura de nouveau l'impression qu'une force dévie la trajectoire de sa balle vers la droite en lui faisant manquer son but, alors qu'à l'évidence, la force centrifuge ne peut être mise en cause.

Le manège peut être vu dans son ensemble par l'observateur A, qui peut ainsi se rendre compte facilement de la raison de son interprétation. Il n'en est pas de même si on considère que la terre est un grand manège dont la rotation doit elle aussi provoquer, pour un observateur qui lui est lié, l'apparition d'une accélération complémentaire. Une fusée, lancée du pôle Nord en direction de Nice et effectuant son trajet sans correction de trajectoire à une vitesse moyenne de 5000 km/h le terminera au sud d'Arcachon. Durant son voyage, en effet, la terre a tourné d'Ouest en Est. Si la fusée avait embarqué des passagers, ces derniers auraient eu l'impression qu'elle avait été en permanence déviée vers la droite sous l'effet d'une force qui n'a pas d'existence si on rapporte le mouvement à des axes de Copernic, c'est-à-dire à des axes définis à partir du soleil par la direction de trois étoiles.

Figure 6 - Inertie et pesanteur



Lorsqu'une automobile effectue un virage, sa caisse s'incline vers l'extérieur et les roues intérieures tendent à se soulever de telle sorte que pour une vitesse donnée il existe un rayon de braquage minimum en dessous duquel la force centrifuge fait verser la voiture. C'est donc la force de pesanteur qui, en entrant en compétition avec la force d'inertie, permet de virer sans dommages. Ces deux forces sont proportionnelles à la masse du véhicule ; pour une position donnée de son centre de gravité, le rapport de leur intensité conditionne sa maniabilité sur terrain plat. Les astronautes qui ont exploré la surface de la lune ont utilisé un véhicule à quatre roues comparable à une automobile. Un des problèmes posé par la circulation de ce véhicule a été celui des virages. En effet, la force de pesanteur sur la lune est plus faible que sur la terre alors que le phénomène d'inertie y conserve ses caractéristiques et les astronautes ont du prendre garde à ne pas effectuer de virages d'un trop petit rayon, virages qui n'auraient pourtant posé aucun problème sur terre. Si la masse d'inertie est équivalente à la masse de gravitation, la force d'inertie, elle, ne varie pas de la même manière que la force de pesanteur en fonction de la taille du domaine dans lequel ces forces s'exercent. Si l'on s'en tient au principe de Mach, les phénomènes d'inertie résultent de l'intervention de l'ensemble des masses de tout l'univers.

stricte de la loi de Newton. Considérons les choses en l'état à un instant donné : on a deux corps qui s'attirent mutuellement, la Terre et le mobile dit en état de chute et la force d'attraction qui s'exerce entre eux a une valeur qui dépend de la distance qui sépare leur centre de masse respectif.

Dans le cas d'une similitude sans restriction, tout changement d'échelle de longueur devrait porter à la fois sur le mobile, sur l'astre et sur la distance qui les sépare. Il est évident qu'alors, la variation de force en fonction de la variation de longueur serait différente de ce qu'elle est lorsqu'on n'envisage que la pesanteur. Dans ce dernier cas, on considère que l'astre est hors similitude, de même que la distance à laquelle le mobile se trouve par rapport à son centre, et la force motrice d'attraction ne dépend que de la masse d'inertie du corps accéléré. Dimensionnellement, elle croît comme le cube (la puissance trois) de la longueur (la dimension linéaire du corps), c'est-à-dire comme un volu-

me de l'espace tridimensionnel. C'est en cela que l'on peut dire que l'expression dimensionnelle de cette force est, en fonction de l'approximation effectuée, localement homogène à l'espace à trois dimensions (alors qu'elle serait en réalité homogène à un espace à quatre dimensions) ; et c'est en cela aussi que celle de la force fictive d'inertie, qui se manifeste pour le référentiel lié au corps est elle aussi homogène à l'espace tridimensionnel (mais dans ce cas, il ne s'agit pas d'une approximation).

En fait, le phénomène de pesanteur correspond à une réduction artificielle de la base dimensionnelle considérée par référence à celle définie à partir de la relation fondamentale de la dynamique. En effet, l'équation qui en rend compte attribue à la force la dimension du produit d'une masse M (celle du corps accéléré) par une constante K égale à l'accélération déterminée par les données du champ. Ce facteur est ce qu'on appelle alors, une constante dimension-

née spécifique car il est déterminé par la nature de la source de champ, et il a une échelle égale à l'unité dans la relation de similitude qui permet de définir comment varient les diverses grandeurs intervenant dans le système étudié. Mais, en considérant les choses de cette manière, on n'a pas une représentation exacte de la réalité, et lorsqu'on utilise un repère lié au mobile, c'est artificiellement que l'on réduit le phénomène gravitationnel au phénomène d'inertie, ce qui est une approximation d'autant moins justifiée que l'ensemble du domaine physique concerné est de plus grande taille.

Les phénomènes de gravitation et d'inertie ne sont pas dimensionnellement équivalents ; leur différence est mise en évidence lorsqu'on compare l'équation dimensionnelle des forces qui résultent de leur manifestation (et ceci bien entendu en faisant abstraction de l'artifice que constitue l'introduction dans l'une des équations d'une constante dimen-

sionnée arbitraire dite constante universelle, c'est-à-dire d'une constante à laquelle on attribue *ex nihilo* la dimension permettant d'établir l'homogénéité). La première de ces forces a, d'après la loi d'attraction, la dimension du produit du carré d'une densité par la puissance quatre d'une longueur, alors que la deuxième, donnée par la loi fondamentale de la dynamique, a celle d'un produit dont les facteurs sont une densité, la puissance quatre d'une longueur et la puissance moins deux d'un temps (**Tableau 2**).

Les expressions de ces forces ne sont pas homogènes l'une à l'autre, et, en toute rigueur, on ne devrait pas avoir le droit d'en effectuer la composition. On n'additionne pas la surface d'un carré et la vitesse d'une bicyclette. Une telle opération n'a pas de sens. On ne peut même pas additionner deux grandeurs qui sont des puissances différentes d'une même grandeur primaire, par exemple la surface d'un carré et le volume d'un cube.

Et pourtant, on a effectué des opérations de ce genre, en physique, depuis trois siècles et plus, grâce à l'utilisation courante de constantes dimensionnées dites universelles, des constantes qui ne dépendent que du système d'unités choisi.

Jusqu'à notre époque, ça n'a pas si mal marché. Et les approximations et les ajustements, qui ont permis d'agir ainsi, ont conduit à des conquêtes technologiques nombreuses et appréciables. Seulement maintenant, il semble que nous soyons arrivés aux limites de ce que peut donner une science aussi « approximative ». Cette limite correspond à notre impuissance à maîtriser la force d'inertie et celle de gravitation, car si l'homogénéité de ces deux grandeurs a été établie « sur le papier » par l'utilisation de la constante dite de gravitation, cela ne suffit pas à rendre géométriquement homogènes dans la nature les phénomènes qu'elles sont censées représenter. La complexité mathématique de la relativité générale est là pour en témoigner.

L'organisation de la nature est telle qu'il semble que chacun des phénomènes « macroscopiques » — gravitation, inertie, électromagnétisme — possède, sur le plan spatial, une structure dimensionnelle propre (intrinsèque), et que, dans le cadre général d'un domaine euclidien tridimen-

sionnel, ou même dans celui d'un espace temps quadridimensionnel, aucune réduction simple de l'un à l'autre n'est possible. Nous venons de le constater pour le couple gravitation inertie. Qu'en est-il pour l'électromagnétisme ? Pour en décider, il faudrait disposer, comme pour la gravitation, d'une loi d'interaction permettant de définir sans ambiguïté l'équation dimensionnelle intrinsèque de la force électrique.

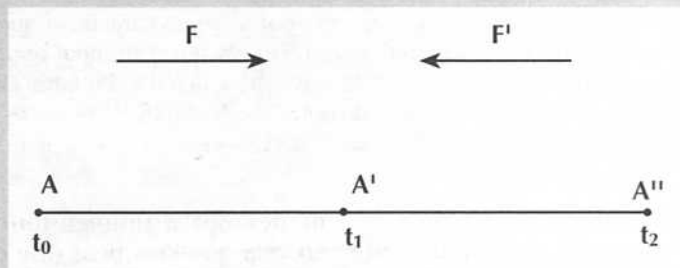
C'est à partir de la relation du champ avec la structure de ses sources qu'une telle équation peut être établie.

L'électromagnétisme et la relativité

Pour l'électromagnétisme, représenté par des équations linéaires, la structure du champ (contrairement à

ce qui a lieu pour la gravitation générale) est indépendante de celle de ses sources. C'est la raison pour laquelle on ne considère que des charges ponctuelles dans la loi d'interaction électrique de Coulomb. Il résulte de cette propriété que la théorie du champ électromagnétique de Maxwell a été, avant la lettre, une théorie relativiste. C'est en partant de ce fait et en tenant compte de l'effet d'écran (un effet de polarisation) joué par la matière dans l'interaction, qu'il est possible de déterminer l'équation fondamentale donnant la dimension de la force d'origine électromagnétique. Le compte rendu et la justification de cette opération figure dans un de mes livres publié aux Editions Européennes⁴ Il y est montré que la force d'origine électromagnétique a la dimension du produit d'une masse volumique (une densité) par le carré d'une longueur, c'est-à-dire une surface ou une section.

Figure 7 - La force d'inertie pourrait être la manifestation d'une interaction temporelle

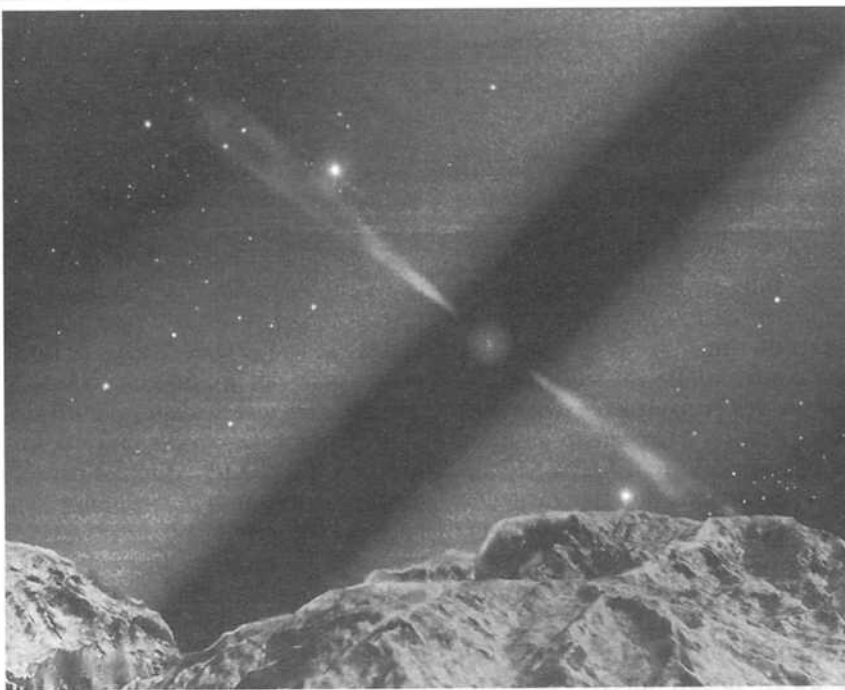


Un mobile pesant A est soumis au temps t_0 à l'action d'une force accélératrice F d'intensité constante, au temps t_1 il est en A'.

La force qui l'a propulsé est égale au produit de sa masse d'inertie par l'accélération dont il a fait l'objet, laquelle est elle-même égale au quotient de la distance séparant A et A' par le carré du temps $t_1 - t_0$. Tout se passe comme s'il existait une interaction entre le mobile en A au temps t_0 et le même mobile en A' au temps t_1 , une attraction entre A et A' inversement proportionnelle au carré du temps qui les sépare et qui s'oppose au mouvement d'accélération en tendant à ramener A' à sa position initiale A. La charge temporelle d'inertie de chacun des mobiles A et A' serait alors égale au produit de la racine carrée de leur densité par le carré de leur dimension linéaire.

Si le mobile en A' au temps t_1 est maintenant soumis à une force F' de même intensité constante que F mais dirigée en sens contraire, sa vitesse est uniformément ralentie et il parvient en A'' au temps t_2 tel que, par exemple, $t_2 - t_1 = t_1 - t_0$. Dans cette deuxième phase, la force F' aura alors à lutter, contre une répulsion existant entre A' et A'' qui aura le même caractère temporel que précédemment.

Que l'inertie puisse être ramenée à une interaction de type attractif-répulsif est un fait très intéressant, car il permet d'envisager l'existence d'un effet d'écran, de la même manière qu'il existe un effet de ce genre en électromagnétisme.



A gauche, vue d'artiste d'un trou noir proche du cœur de la galaxie NGC 4261. A droite, Phobos. On a cru voir dans la découverte des trous noirs, qui résultent de l'effondrement gravitationnel d'étoiles géantes, la confirmation d'une prédiction à mettre au crédit exclusif de la relativité générale. En fait, leur existence découle des deux équations dimensionnelles élémentaires donnant respectivement l'expression de la force d'origine électromagnétique et celle de la force de gravitation générale. Ces deux équations montrent qu'en fonction de la longueur, l'intensité de la force de gravitation augmente beaucoup plus vite que celle de la force électromagnétique. En effet, la première force croît comme la puissance quatre de la longueur, alors que la deuxième ne croît que comme la puissance deux. Même si, à l'échelle de la Terre, les forces électromagnétiques sont prépondérantes, il est évident que pour des astres beaucoup plus grands, les forces de gravitation l'emporteront et deviendront tellement puissantes que la structure de la matière elle-même ne résistera pas à leur action. En réalité, la prépondérance de l'électromagnétisme n'est évidente que pour des corps célestes d'une taille égale ou inférieure à celle des satellites de Mars, par exemple, Deimos et Phobos, dont la forme est celle de grosses pommes de terre. Pour des corps célestes de plus grande taille, Mars, la Lune ou la Terre, le seuil de plasticité est atteint et ces astres sont modelés en forme de sphère par l'action de la gravitation.

Cette donnée confirme, en la précisant, l'affirmation de Newton concernant les « causes mécaniques » : « la gravitation provient de quelque cause qui pénètre jusqu'au centre du soleil et des planètes, sans rien perdre de son activité. Elle n'agit pas suivant la grandeur des superficies comme les causes mécaniques, mais comme la quantité de matière ». (Principes mathématiques de la philosophie naturelle, livre troisième, proposition 42, Scholie général).

Galilée avait déjà noté auparavant un tel fait, à propos de la résistance des matériaux (**Figure 1**), et depuis cette époque, on trouve dans les écrits de divers physiciens, de brèves allusions à ce comportement des forces d'origine électromagnétique.

Eddington écrit, par exemple, dans son livre *Espace, temps et gravitation* (chapitre 4) : « C'est essentiellement le sol ou notre chaise qui cause la sensation de poids en empêchant notre chute... Ce que nous sentons, c'est le bombardement des semelles de nos chaussures par les molécules du sol, les impulsions qui en résultent montent en nous, et se répandent ensuite dans tout notre corps ».

Effectivement, nous ne prenons

jamais conscience directement, ni des effets gravitationnels, ni des effets d'inertie, qui ne se manifestent que par le truchement de l'électromagnétisme, que ce soit par les actions de contact décrites par Eddington (des actions de répulsion électrique), ou par les interactions champ matière dont un des aspects est constitué par les observations auxquelles nous nous livrons en utilisant la lumière, par exemple.

L'équation fondamentale de l'électromagnétisme $F = D L^2$ que j'ai ainsi définie a donc un grand intérêt, car elle permet de comprendre comment l'électromagnétisme s'articule avec l'inertie et la gravitation.

On constate, qu'en associant l'équation de similitude qui traduit cette équation, avec celle qui découle de la relation de la dynamique pour l'inertie, on obtient, en égalant l'échelle de force électromagnétique à celle de force d'inertie, un système qui correspond aux données de la relativité restreinte. Il est indépendant de toute condition de référentiel et sa résolution conduit à identifier, d'une part, les échelles de temps

et de longueur, et d'autre part, celles de masse, de quantité de mouvement et d'énergie. Par rapport à la mécanique dite classique (pré-relativiste) il correspond à une réduction de la base dimensionnelle de trois à deux unités primaires : la longueur et la masse volumique (**Tableau 1**).

La validité de la relativité restreinte a été amplement vérifiée depuis 80 ans et cette théorie est maintenant la base de tout enseignement supérieur de physique. Il s'ensuit que, contrairement à ce qu'on pensait, l'équation fondamentale de la dynamique est valide, elle aussi ; ce qui ne l'est pas et qui rend la mécanique de Newton inexacte, c'est l'utilisation qu'on a fait de cette équation, en l'intégrant dans un système de relations où figurent des constantes universelles.

En effet, aussi bien pour cette équation que pour les lois d'attraction, et dans la mesure où il existe une équivalence entre le temps et la longueur, les lois correspondant à de soi-disant actions instantanées à distance deviennent des lois qui rendent compte d'actions propagées telles que les conçoit la physique moderne.

Il résulte de ceci qu'on peut se demander si la loi d'attraction de Newton, elle-même, n'a pas fait l'objet d'un injuste discrédit.

En associant la relation de similitude qui en rend compte aux deux relations de similitude utilisées précédemment, on aboutit à un système de relations de similitude correspondant, sur le plan dimensionnel, à une réduction de la base de deux à un. On prend ainsi pour seule unité fondamentale la longueur ; on aboutit donc à une géométrisation complète et on a la surprise de constater que le système de similitudes obtenu répond aux conditions de la relativité générale : en effet, il est indépendant des conditions de référentiel ; comme précédemment, l'échelle de temps y est identifiée à celle de longueur, celle de masse demeure égale aux échelles d'impulsion et d'énergie, mais surtout, l'échelle de force perd sa signification puisqu'elle devient égale à un (**Tableau 1**).

Ces résultats, a priori étonnants, amènent à revenir sur la notion de similitude. A l'origine, le principe de similitude était inspiré de la géométrie élémentaire, et n'était valable que dans un espace euclidien. Son extension à la mécanique, puis à la physique, a conduit à généraliser sa signification en le faisant correspondre à la notion mathématique de groupe. Utilisé sous la forme définie plus haut, il n'implique aucune condition spatiale particulière hormis la suivante qui intéresse particulièrement notre propos : il ne peut être établi une similitude entre des systèmes physiques à géométrie euclidienne que si les espaces qu'ils définissent ont le même nombre de dimensions. Cette condition pourrait être résumée de la manière familière suivante : il n'y a pas de similitude possible entre des systèmes constitués, par exemple, respectivement par un triangle et un tétraèdre.

Si aucune similitude n'existe entre des systèmes physiques, ces systèmes ne peuvent définir un espace commun que dans la mesure où celui-ci peut entrer dans le cadre des géométries non euclidiennes (Elie Cartan, *Œuvres complètes*⁵).

L'expression de la masse volumique (densité) dans le système de relations correspondant à la relativité générale a la dimension de l'inverse du carré d'une longueur. Dans un milieu qui serait continu, et à partir

de n'importe quel point de ce milieu, la densité de « substance » grave doit décroître comme le carré de la distance. Une telle propriété est évidemment incompatible avec une géométrie euclidienne.

Par contre, dans un milieu condensé en des corps graves distincts, cette expression de la densité signifie que, par approximation, sa valeur « moyenne » dans de tels corps devrait être d'autant plus faible que leur taille est plus grande et ceci en raison inverse du carré de leur dimension linéaire.

Autrement dit, leur masse ne croît pas qu'en raison directe de cette dimension, et non pas en fonction de son cube comme elle le ferait s'ils pouvaient avoir la même densité. De même que la relativité restreinte, la relativité générale a fait l'objet de vérifications expérimentales : avance du périhélie de Mercure, déviation des rayons lumineux par la masse du Soleil, conséquences de l'effet Mosbauer, etc. ; cependant, malgré sa cohérence mathématique, et contrairement à la relativité restreinte, elle n'a donné lieu à aucun développement technologique. Nous ne savons toujours pas maîtriser l'inertie ou la gravitation.

La relativité restreinte, par contre, qui se contente de faire une synthèse entre l'électromagnétisme et l'inertie, a un caractère beaucoup plus pragmatique — elle a conduit, par exemple au développement de l'énergie nucléaire — et la portée de son aspect dimensionnel ne se limite pas, comme on le pense trop souvent, au domaine des grandes vitesses, qui ne serait que celui du monde atomique et particulier ou du monde astronomique.

En effet, beaucoup de faits expérimentaux, qui corroborent l'analyse qui vient d'être faite, montrent que, même à notre échelle, il existe une relation temps longueur vérifiable expérimentalement, une identification dimensionnelle de ces deux grandeurs qui conduit par exemple à donner à l'échelle d'accélération la valeur de l'inverse de l'échelle de longueur (**Tableau 1**) : toutes choses étant égales par ailleurs, plus un mobile est petit, plus les accélérations qu'il peut atteindre ont une valeur élevée, ce qu'avait déjà noté Galilée, et ce que confirme l'expérience dans la mesure où elle est effectuée dans des domaines de petite

taille ou le rôle de la pesanteur est négligeable (voir : Rémi Saumont⁶).

Si, grâce à l'introduction de constantes universelles, on n'a utilisé en physique pré-relativiste que des systèmes dans lesquels temps et longueur sont des grandeurs indépendantes, c'est que, lorsqu'on considère isolément le couple gravitation inertie, les calculs dimensionnels montrent que, pour la pesanteur, c'est l'échelle d'accélération qui est égale à un, celle de vitesse étant égale à la racine carrée de celle de longueur, alors que, pour la gravitation générale, l'échelle de vitesse devient égale à l'échelle de longueur multipliée par la racine carrée de celle de masse volumique (**Tableau 1**).

Ce sont ces faits qui conduisent à admettre qu'il ne peut pas y avoir de similitude physique rigoureuse dans un domaine euclidien où coexistent des phénomènes électromagnétiques, inertiels et gravitationnels.

Dans la mesure où on admet que ces phénomènes se déroulent dans un espace commun (selon un même nombre de dimensions), ce dernier doit répondre aux critères d'un espace non euclidien ; aucune vitesse ne saurait y dépasser la vitesse de la lumière qui devient elle-même une grandeur qui dépend du potentiel de gravitation.

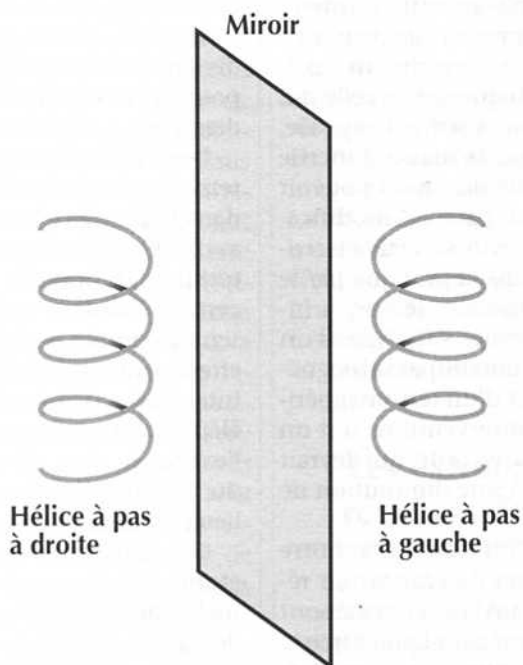
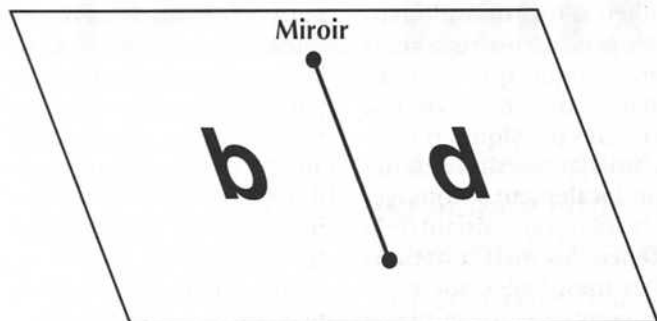
L'espace physique

La relativité générale peut être considérée comme un mode de représentation intrinsèque des phénomènes correspondant à une géométrie de Riemann quadridimensionnelle.

Le mode de représentation intrinsèque utilise les méthodes de la géométrie différentielle ; dans un espace caractérisé de cette manière, les courbes (ou la torsion pour un espace plus général) sont nécessairement définies de proche en proche ; les propriétés spatiales peuvent donc être décrites « de l'intérieur » et l'espace ainsi construit, se suffit en quelque sorte à lui-même.

Il existe, bien sûr, un autre moyen pour rendre compte de ces propriétés, que l'on décrit ainsi « de l'extérieur », c'est celui qu'on emploie couramment, par exemple, en géométrie élémentaire pour représenter une sphère au moyen des trois axes de coordonnées de l'espace tridimen-

Figure 8 - Le retournement en miroir et la relativité



Considérons un plan (un espace à deux dimensions). Un b ne peut pas y être transformé en d par un mouvement quelconque à moins d'être sorti de ce plan et retourné dans une troisième dimension. Le d est l'énantiomorphe bidimensionnel du b , il est son image spéculaire, c'est-à-dire son image dans un miroir, lequel, pour deux dimensions est une ligne droite. Dans notre espace tridimensionnel, un exemple de figures énantiomorphes est donné par nos mains (d'où l'expression de figures chirales) ou par deux hélices dont l'une tourne à droite et l'autre à gauche. L'une est l'image de l'autre dans un miroir plan. Aucun déplacement ne peut nous permettre de retourner une hélice droite en hélice gauche. Ce serait une propriété d'un espace à nombre supérieur de dimensions que de permettre un tel retournement. L'espace-temps de la relativité est un mode de représentation permettant le repérage selon quatre axes d'un point événement, et qui, par conséquent, par une transformation dites « impropre » (inversion des trois axes d'espace sans modification de l'axe de temps) doit permettre une telle transformation, appelée transformation de parité.

sionnel euclidien, c'est la méthode dite extrinsèque.

La sphère est un espace de Riemann à deux dimensions qui à l'exemple des autres espaces de Riemann bidimensionnels ne nécessite qu'un espace euclidien à trois dimensions pour être réalisé de cette manière.

Cependant, contrairement à ce que pourrait penser un esprit non averti, il faut généralement, lorsque n est supérieur à deux, plus de $n+1$ dimensions pour plonger un espace de Riemann à n dimensions dans un espace euclidien. Les règles du mode de représentation euclidien extrinsèque

des espaces de Riemann sont données par le théorème de Schlaefli⁷ dont Janet et Elie Cartan ont fourni une démonstration en 1926-1927⁸; le nombre de dimensions nécessaires est donné par la formule : $n(n+1)/2$. Un espace de Riemann général à quatre dimensions peut donc être considéré comme plongé localement dans un espace euclidien à dix dimensions.

C'est alors que se pose le problème de la signification physique de ces divers développements mathématiques. L'espace quadridimensionnel pseudo-euclidien de Minkovski utilisé en relativité restreinte permet théo-

riquement, par une transformation dite impropre, le changement de parité, c'est-à-dire le retournement en miroir d'une vis qui tourne à droite en vis qui tourne à gauche (**Figure 8**).

Pourtant, jamais personne n'a vu, à notre échelle, et en quelque sorte sous un coup de baguette magique, un tire-bouchon qui tourne à droite transformé « en bloc », par un simple déplacement d'ensemble, en tire-bouchon qui tourne à gauche. Il semble donc que de telles opérations ne peuvent se produire qu'à l'échelle des particules élémentaires (non conservation de la parité) et que l'électro-

magnétisme, qui conditionne la composition du tire-bouchon en assurant la cohésion des atomes qui le constituent, a ainsi, à notre échelle, un champ d'action vraiment limité à trois dimensions d'espace.

En fait, c'est la résolution du système physique qu'il forme avec l'inertie qui contraint à envisager l'existence d'une dimension supplémentaire alors que, a fortiori, et pour ce nouveau nombre de dimensions, la prise en compte de la gravitation ne peut se satisfaire d'un espace euclidien quadridimensionnel.

Il apparaît donc qu'inertie et gravitation sont probablement des phénomènes multidimensionnels (à plus de trois dimensions), mais que ce caractère quadri ou pentadimensionnel ne peut se manifester à nous explicitement puisque l'intermédiaire qui permet d'en prendre connaissance, l'électromagnétisme est, lui, strictement limité à trois dimensions.

La physique actuelle est orientée vers une hypothèse multidimensionnelle à la suite du « coup de tonnerre » qu'a été la vérification expérimentale de la véracité de la relativité par Eddington lors de l'éclipse de Soleil de 1919.

Depuis Kaluza et son espace à cinq dimensions, les théories physiques à cinq, six et même dix, douze dimensions et plus, se sont succédées. Cependant, elles n'envisagent une extension à plus de trois dimensions d'espace que sur des distances très courtes et dans tous les cas notablement inférieures à la taille d'un atome et aucune, pour l'instant, ne s'est véritablement imposée comme a pu le faire la relativité générale.

L'impossibilité du retournement du tire-bouchon joue, en quelque sorte, le rôle d'une barrière psychologique auprès des physiciens, et les empêche d'envisager, pour l'inertie et la gravitation, l'existence d'un véritable hyperspace qui aurait une existence physique qui ne serait plus limitée au seul domaine infra-atomique.

La physique en est à un point à partir duquel il serait tentant de faire un tel choix ; ce choix ne serait en effet qu'une extension des conceptions relativistes.

Le principal problème posé par une hypothèse de ce genre concerne donc les mécanismes de l'articulation entre l'électromagnétisme tridimensionnel et l'inertie-gravitation

multidimensionnelle. J'ai traité cette question dans mon livre⁴.

Il paraît concevable de penser à partir du théorème du viriel que le mouvement entretenu des charges au sein de la matière est susceptible de perturber en permanence l'équilibre d'un milieu diffus multidimensionnel homogène et isotrope mais sous tension statique qui contiendrait celui dans lequel nous vivons. L'existence d'êtres physiques n'intéressant que trois dimensions en détruirait donc localement l'homogénéité et l'isotropie en entraînant de la sorte l'existence des manifestations réactionnelles mesurables que nous interprétons comme étant la masse d'inertie et les interactions gravitationnelles.

Une théorie physique n'a d'intérêt que dans la mesure où elle conduit à des confirmations expérimentales.

Comme conséquence de celle qui vient d'être sommairement exposée, des variations de la masse d'inertie d'un corps donné devraient pouvoir être provoquées par des modifications importantes de son état électrique interne : dans la pratique par le passage d'un courant électrique intense, par exemple, s'il s'agit d'un conducteur (ou encore par sa magnétisation s'il s'agit d'un ferromagnétique). De telles interventions ont un caractère de mise en ordre qui devrait donc conduire à une diminution de masse.

Cependant, on sait qu'à notre échelle, les forces de gravitation régnant au sein d'un corps donné sont considérablement plus faibles que la moindre des actions à caractère électrique qui s'y déroulent ce qui explique la constance de la masse (rappelons-nous Lavoisier).

Au demeurant, compte tenu de la valeur de la constante de couplage, il serait donc nécessaire d'utiliser des courants de très grande intensité, des centaines d'ampères par millimètre carré pour ne pouvoir provoquer que des variations minimales de la masse d'inertie (de l'ordre du microgramme peut-être).

Autant dire que l'expérience paraissait tout à fait irréalisable.

Aussi la dite théorie, ébauchée il y a de cela plus de 30 ans, avait-elle rejoint une étagère de mon placard des manuscrits non publiés. Les revues scientifiques sont suffisamment encombrées par des élucubrations, savantes peut-être, mais souvent re-

dondantes ou sans intérêt pratique.

Pourtant, en dépit de cette profession de foi, il y a quelques années, l'idée m'est venue de reconsidérer le problème en développant ma théorie dans un livre et ceci comme corollaire aux expériences de pesée que j'avais entreprises afin de mettre expérimentalement en évidence et de mesurer la force longitudinale d'Ampère apparaissant au sein d'un conducteur parcouru par un courant électrique amené par des plongeurs à mercure. Il apparaissait en effet que l'un des phénomènes d'allègement parasite très gênant qui se manifestait au cours de ces expériences, avait les caractères d'un allègement vrai.

Ce qui m'a fait tout d'abord douter de la nature de ce phénomène, et pour les raisons énoncées plus haut, c'est son importance, de l'ordre du dixième de milligramme par Ampère pour un fil de cuivre de 0,7 mm de diamètre.

Je me contenterai pour l'instant de renvoyer le lecteur à l'article paru dans le numéro 55 de *Fusion* (mars-avril 1995) portant sur la force longitudinale d'Ampère ; il y est exposé certains résultats qui, s'ils sont présentés comme parasites, pourraient effectivement, après réflexion, être interprétés comme fournissant un élément de preuve expérimentale de l'existence d'un effet gravitationnel du courant électrique dans les milieux conducteurs.

Ces faits paraissent donc a priori étonnants. Bien entendu leur éventuelle signification gravitationnelle devra être confirmée par d'autres expériences pour pouvoir être définitivement retenue. ■

Bibliographie

1. Ord G., *J. of Phys.*, 1983, 16 1689.
2. Nottale L. et Schneider J., *J. of Math. Phys.*, 1984, 25 1296.
3. Tonnelat M-A., *Théorie électromagnétique et relativité*, Masson, 1959
4. Saumont R., *Analyse dimensionnelle et similitude en physique fondamentale*, Editions Européennes 11 bis Av. de la Providence, 92160 Antony, 1989.
5. Cartan E., *Cœuvres complètes*, Editions du C N R S, 1984.
6. Saumont R., *C. R. Acad. Sci.*, 1969, 268 1785-1788
7. Schläfli L., *Ann. di Mat.* 1871-1873 5 170-193
8. Janet P., *Ann. Soc. Pol. Mat.*, 1926, 5 38-73 ; Cartan E., *Ann. Soc. Pol. Mat.*, 1927, 6 1-7.