

## Documents pour le cours 2013-2014 L2. Inertie et relativité I.

### ELEMENTS DE BIBLIOGRAPHIE SUR LE PRINCIPE D'INERTIE 1.

Balibar Françoise, Galilée, Newton, lus par Einstein, PUF, 1986.

Aristote, *Physique*, trad. Pellegrin, GF, 2000.

Aristote, *Traité du Ciel*, trad. Tricot, Vrin.

*La physique d'Aristote*, De Gandt, Souffrin, (dir.) Vrin 1991

Blay Michel, *La science du mouvement*, Belin 2002.

Clavelin Maurice, *La philosophie naturelle de Galilée*, Albin Michel 1996 (réédition).

Descartes, Les principes de la philosophie, G.F.III. (AT IX)

Les cahiers de Science et vie, Descartes, Décembre 2001.

Dugas R. (1950), *Histoire de la mécanique*, Gabay, 1996.

Duhem P. (1906), *La théorie physique, son objet, sa structure*, Vrin, 1981.

Feyerabend Paul (1975), *Contre la méthode*, seuil, 1979.

Galilée, *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles*, Introduction, traduction, notes et index par M.Clavelin, réed. Paris, PUF, 1995

Jullien V. et Charrak A, *Ce que dit Descartes touchant la chute des graves*, Septentrion, 2002.

Koyré A., *Etudes newtoniennes*, ed. française, Paris, Gallimard, 1968.

Koyré, *Etudes galiléennes*, Paris, Hermann, 1966.

Koyré, *Chute des corps et mouvement de la terre*, Vrin, 1973.

Lakatos Imre (1978), *Histoire et méthodologie des sciences*, trad. L. Giard, PUF 1994

Meyerson Emile, *Identité et réalité*, (1907 première ed.), Félix Alcan, 2<sup>ème</sup> édition, 1926.

Pour la science, n° spécial « La gravitation », janvier/avril 2003.

Usuels :

Taton René (dir.) (1981), *Histoire générale des sciences*, 4 vol. Quadrige, PUF, 1995

Brunschvig Jacques et Lloyd Geoffrey, *Le savoir grec*, Paris, Flammarion, 1996

Blay Michel et Halleux Robert, *La science classique*, Paris Flammarion, 1998

## **PLAN DU COURS PRINCIPE D'INERTIE ET RELATIVITE (I)**

### **Remarques sur la physique d'Aristote**

*Inertie, balistique.*

### **Intermédiaires, la théorie de l'Impetus**

Buridan (1300-v.1370),

Jean-Baptiste Benedetti (1530-1590)

Dominique Soto (1494-1560).

Arguments relativistes de Giordano Bruno (1548-1600)

### **Galilée**

Informations biographiques.

Les arguments pour le « Principe d'inertie »

Ampleur et limites du principe chez Galilée

*Trois leçons et commentaires généraux*

1. L'expérience cruciale, l'objection de J. Locher.
2. Gassendi et la galère de Marseille, la physique *a priori*.
3. La transformation de Galilée et l'équivalence des principes

### **Descartes**

Place du Monde et des Principes,

Le mouvement et le lieu

Sur la relativité du mouvement

Le principe d'inertie et les lois de la nature

### **Huygens, Roberval, Newton**

## CITATIONS DU COURS 1.

Aristote,

« Les corps simples, étant au nombre de quatre, se partagent en deux couples qui ont chacun leur lieu : le feu et l'air se portent vers la limite, la terre et l'eau, vers le centre. En outre, le feu et la terre sont les éléments extrêmes et les plus purs, tandis que l'eau et l'air sont intermédiaires et plus mêlés. Et les éléments de chaque couple sont contraires à ceux de l'autre couple : au feu est contraire l'eau, et à l'air, la terre, car ces éléments sont constitués de qualités contraires. Et cependant, absolument, parlant, les éléments, étant au nombre de quatre, ont chacun une seule qualité propre : pour la terre, c'est le sec plutôt que le froid, pour l'eau, c'est le froid plutôt que l'humide, pour l'air l'humide plutôt que le chaud, et pour le feu, le chaud plutôt que le sec. » *De la génération et de la corruption*, II, trad. Tricot, Vrin

« les mouvements et les repos sont contraires, par exemple, ceux vers le haut et ceux vers le bas ...or le feu est naturellement transporté selon un mouvement vers le haut, alors que la terre l'est vers le bas ; et assurément, leurs transports sont contraires. Mais le feu est transporté vers le haut par nature et vers le bas contre nature et assurément son transport par nature est contraire à son transport contre nature. Et il en est de même pour les immobilités. L'immobilité en haut, en effet est contraire au mouvement qui va de là vers le bas. Et pour la terre, cette immobilité est contre nature alors que ce mouvement est selon la nature. De sorte que, pour un même objet, l'immobilité contraire à la nature est contraire au mouvement selon la nature » (*Phyd.*, V, 230, b 11)

« Tout ce qui est en mouvement est nécessairement mû par quelque chose. Si donc il n'a pas en lui-même le principe de son mouvement –comme les êtres vivants il est évidemment mû par un autre ».  
*Physique* (VII, I)

« Un corps se meut naturellement vers le lieu où il repose sans violence, et il repose sans violence dans le lieu vers lequel il se meut naturellement. Il se meut par violence vers le lieu où il demeure en repos forcé, et il demeure en repos forcé dans le lieu vers lequel il se meut par violence » (*Traité du Ciel*, I, 8, 276 a23-26)

« Comme il est impossible qu'un mobile soit porté indéfiniment en ligne droite, il faut qu'il s'arrête quelque part et qu'il demeure au repos, non par violence, mais par nature » (*id.* III, 2)

« Tout ce qui est en mouvement est nécessairement mû par quelque chose. Si donc il n'a pas en lui-même le principe de son mouvement, il est évidemment mû par un autre » (*Physique* VII, 1)

« De plus les projectiles se meuvent encore, alors que ce qui les a mis en branle ne les touche plus, soit du fait d'un échange réciproque comme disent certains (*Timée*), soit du fait que l'air qui a été mis en branle produit un mouvement plus rapide que le transport de l'objet mis en branle qui porte cet objet dans son lieu propre. Mais dans le vide rien de cela ne peut être, et il n'y aura pas de transport, à moins que le projectile ne soit véhiculé par quelque chose» *Physique*, IV, 8, 215 a. 14-19

« Mais à propos des choses transportées, il est bon de soulever d'abord une certaine difficulté. Si, en effet, tout mû est mû par quelque chose, parmi toutes les choses qui ne se meuvent pas elles-

mêmes, comment certaines sont-elles mues continûment alors qu'elles ne sont pas touchées par ce qui les meut, par exemples les projectiles ? Si ce qui meut meut en même temps quelque chose d'autre, par exemple l'air qui meut en étant mû, il est de la même manière impossible qu'il soit mû, si la première chose ne le touche ni ne le meut, mais il est nécessaire que tous soient mus et cessent de l'être en même temps quand le premier moteur s'arrête, même si le moteur, comme l'aimant, rend ce qu'il meut susceptible de mouvoir d'autres choses. Il est onc nécessaire de dire que ce qui meut en premier donne la capacité de mouvoir à l'air ou à l'eau ou à autre chose de ce genre qui peuvent naturellement mouvoir et être mues. Mais ce n'est pas en même temps que cet intermédiaire cesse de mouvoir et d'être mû, mais il cesse d'être mû en même temps que ce qui le meut cesse de le mouvoir, alors qu'il est encore moteur. C'est pourquoi aussi il meut autre chose de contigu et à propos de ce dernier, le raisonnement est le même. Il cesse cependant quand la puissance de mouvoir devient sans cesse plus petite pour la chose contiguë. Il cesse finalement quand le premier terme ne rend plus le suivant moteur, mais seulement mû. Mais il est nécessaire que ces choses, le moteur le mû et le mouvement en totalité cessent en même temps. » *Physique*, VIII, 10, 266b

Averroès .

Si la terre était mue, il y adviendrait ce qui advient lorsqu'on projette des pierres à partir d'un navire en mouvement ; elles tombent à l'eau en divers lieux, de telle manière qu'il est arrivé de multiple fois qu'elle tombe au-delà, ou près du navire selon sa vitesse. (Aristotelis Omnia quae extant opera [...] cum Averrois commentariis, Venetiis, Apud Iunctas, 1562-1574, V, c. 164r. Trad. par moi)

Piccolomini

Si tel était le cas, aucune des choses pesantes que l'on jetterait en l'air ne pourrait retomber à l'endroit où serait resté celui qui l'aurait jetée...ainsi advient-il à celui qui navigue sur un fleuve, une chose pesante jetée directement au dessus de sa tête, on la voit s'en aller loin derrière lui et tomber dans l'eau. (A. Piccolomini, Parte prima della filosofia naturale, Venetia, Daniel Zanetti, 1576, c. 77r)

C. Clavius

Par la même méthode on obtiendrait qu'une pierre ou qu'une flèche jetée vers le haut avec une grande force ne retombe pas dans le même lieu comme nous voyons que cela se passe dans un navire qui se déplace très rapidement. (Cité par Gassendi dans la Lettre latine n° 134 108b traduite par S.Taussig, p. 196)

### **Critiques à Aristote- Impetus**

Koyré (Etudes galiléennes, p.22)

« la physique aristotélicienne forme, on le voit bien une théorie admirable, admirablement cohérente, et qui n'a, à vrai dire (outre celui d'être fausse), qu'un seul et unique défaut : celui d'être contredite par la pratique journalière, par la pratique du jet. Mais un théoricien digne de ce nom ne se laisse pas arrêter par une objection du sens commun. Lorsqu'il trouve un fait qui ne s'accorde pas avec sa théorie, il le nie, et lorsqu'il ne peut pas le nier, il l'explique [...] Sa théorie du jet consiste en effet, à expliquer le mouvement apparemment sans moteur, du projectile, par la réaction du milieu ambiant »

« La théorie d'Aristote consiste à expliquer la continuation du mouvement par un processus tourbillonnaire dans le milieu entourant le mobile, qui agit sur ce dernier en l'entraînant et en le poussant. Le « truc » théorique est dans l'invention d'un milieu particulièrement apte à se mouvoir ».

Exposé de Buonamico, qui fut le maître de Galilée :

« La cause de ce mouvement que l'on appelle projection est beaucoup plus difficile à découvrir et à son sujet il existe depuis l'antiquité, des opinions très diverses . Ainsi Platon attribuait la cause de ce mouvement à l'*antipéristase*. Mais Platon ne nous explique pas suffisamment comment on doit le comprendre. Aristote n'y ajoute pas grand chose. Ce terme est ambigu et désigne à proprement parlé, le circuit ou la révolution des contraires [...] Ce terme s'applique au mouvement seul où l'ambiant produit le mouvement dans le mobile qu'il pousse et, où, en même temps, il tire son origine de celui-ci, ainsi que le voulait Platon [...] Ainsi donc, lors de la projection, les parties du milieu environnant se succèdent dans le lieu des parties postérieures du mobile ; ainsi A, s'il meut B, arrive dans son lieu, et si B pousse C, il en occupe le lieu. Et ainsi de suite... [cette version est rejetée par Aristote] qui décida que, par le mouvant, une force est imprimée à l'air, ou au milieu, en vertu de sa nature qui est double, ni grave seulement, ni légère ; à cause de quoi, justement, l'air peut recevoir l'*impetus* dans n'importe quel sens. Comme cependant, l'*impetus* n'est jamais conforme à sa nature –bien que un mouvement horizontal s'y oppose moins que le mouvement qui se ferait simplement vers le haut, ou vers le bas, car l'air n'est pas seulement léger, mais aussi lourd, il y résiste et là où il est quelque peu séparé du premier moteur, il perd peu à peu la force qui lui est imprimée par celui-ci ; cette force se dissipe et finalement s'épuise et ainsi le projectile, n'éprouvant plus de violence, retourne à sa condition antérieure et, se conformant à celle-ci, s'empresse de revenir dans le lieu d'où la force l'avait fait partir, de même que le fer, lorsqu'il est séparé du feu, retourne à sa frigidité propre. » (Cité par Koyré, *id.* p.30)

Buonamico dans un long exposé des théories du jet, avant lui explique :

« Si maintenant on leur demande (par exemple à Saint Thomas d'Aquin) pourquoi l'air, dans le jet, ne se meut pas indéfiniment , ils répondent que ce mouvement est communiqué par la pierre aux parties les plus proches et, par celles-ci, aux parties contiguës. Et que ce mouvement, ainsi que le dit Aristote lui-même n'est pas un, car le mobile ne reste pas simplement un ; en outre ce mouvement n'est naturel ni à la pierre, ni à l'air, mais leur vient du dehors, aussi se propage-t-il vers la circonférence comme nous le voyons lorsqu'une pierre est jetée dans l'eau ; elle provoque au début des cercles plus petits, mais plus rapides ; ceci en raison de la proportion plus grande qui existe alors entre le mouvement et le mobile : en effet l'espace est franchi d'autant plus rapidement qu'il est moindre ; ensuite la pierre forme des cercles plus grands, mais plus lents, parce que l'espace augmente, et la proportion du mouvant au mobile diminue. Il en est de même de la pierre jetée en l'air ; aussi le mouvement devient-il plus lent et, finalement, il s'épuise » (cité in Koyré, p.32).

Buridan, (1300-v.1370) *Questiones super octo physicorum libros aristotelis*.

« Tandis que le moteur meut le mobile, il lui imprime un certain *impetus*, une certaine puissance capable de mouvoir dans la direction même où le moteur meut le mobile, que ce soit vers le haut, vers le bas ou de côté, ou circulairement. Plus grande est la vitesse avec laquelle le moteur meut le mobile, plus puissant est l'*impetus* qu'il imprime en lui. C'est cet *impetus* qui meut la pierre après que celui qui la lance a cessé de la mouvoir ; mais par la résistance de l'air et aussi par la pesanteur

qui incline la pierre à se mouvoir en un sens contraire à celui vers lequel l'*impetus* a puissance de mouvoir, cet *impetus* s'affaiblit continuellement ; dès lors le mouvement de la pierre se ralentit sans cesse : cet *impetus* finit par être vaincu et détruit à tel point que la gravité l'emporte sur lui et désormais meut la pierre vers son lieu naturel » (Cité par Clavelin, *La philosophie naturelle de Galilée*, p.104)

« Il faut imaginer que par l'effet de son moteur principal, c'est-à-dire, de sa gravité, un grave acquiert non seulement du mouvement, mais encore un certain *impetus*, et cela grâce au mouvement même qui le meut avec sa gravité naturelle permanente...Ainsi, au début le grave est-il mû par sa seule gravité naturelle et, pour cette raison se meut lentement ; puis il est mû en même temps par la gravité et par cet *impetus* acquis, et pour cette raison, se meut plus vite ; et comme le mouvement devient plus rapide, de son côté, l'*impetus* devient plus grand, si bien que le grave ...se meut de plus en plus rapidement et accélère ainsi continuellement son mouvement jusqu'à la fin » (in Clavelin p.107)

« l'*impetus* est une certaine réalité permanente distincte du mouvement local selon lequel se meut le projectile, c'est une qualité dont la nature est de mouvoir le corps auquel elle a été imprimée » (cité in Clavelin, p. 107)

#### Copernic (1473-1542)

« Que le mouvement des corps célestes est uniforme et circulaire, perpétuel, ou composé de mouvements circulaires. Nous allons rappeler maintenant que le mouvement des corps est circulaire. En effet, la mobilité propre de la sphère est de tourner en rond ; par cet acte même, tandis qu'elle se meut uniformément en elle-même, elle exprime sa forme, celle du corps le plus simple où l'on ne peut trouver ni commencement, ni fin, ni distinguer l'un de l'autre » (*De revolutionibus orbium celestium*, Livre I, traduction Alexandre Koyré, Blanchard, Paris, 1970)

« Le mouvement de la terre est le mouvement naturel parce que sphérique et géométrique, d'un tout qui, en tant que tel, maintient les parties en rapport entre elles car elles lui sont homogènes. Les parties ont tendance à se rassembler vers ce tout, quel que soit, par ailleurs, le mouvement de ce dernier. Cependant, cette stabilité est possible parce que le tout possède un mouvement naturel, le mouvement circulaire. Il faut remarquer que c'est le mouvement sphérique qui est conçu par Copernic comme le mouvement global d'un tout. (Szczeciniarz p.126)

#### Copernic répond à Ptolémée

« pourquoi [ce qu'il craint pour la terre] ne le craint-il pas encore plus en ce qui concerne le monde, dont le mouvement doit être d'autant plus rapide que le ciel est plus grand que la terre ? Le ciel est-il devenu si grand parce que ce mouvement, par une véhémence indicible, l'éloigne du centre, et doit-il tomber s'il s'arrête ? » (in Koyré, p.169)

« Mais que dirons-nous touchant les nuages et les autres choses flottant dans l'air, ainsi que celles qui tombent, ou inversement, tendent vers le haut ? Tout simplement que, non seulement la terre avec l'élément aqueux qui lui est joint, se meut ainsi, mais encore une partie non négligeable de l'air, et toutes les choses qui, de la même manière, ont un rapport avec la terre.[...] Quant aux choses qui

tombent et qui s'élèvent, nous avouerons que leur mouvement doit être double par rapport au monde et, généralement, composé de rectiligne et de circulaire » (*id.* p.170)

Koyré

« étendant à la terre une idée admise pour les cieux, il affirme le caractère naturel du mouvement circulaire de celle-ci. Or, étant naturel, ce mouvement d'une part ne peut pas produire les effets désastreux dont parle Ptolémée, d'autre part, étant naturel à la terre, il anime, naturellement, tous les corps de la nature et de provenance terrestre, même si ils ne sont pas en contact immédiat avec elle ; ils lui sont physiquement reliés (comme des parties au tout) » (Koyré, *Etudes galiléennes*, p.168).

Jean-Baptiste Benedetti (1540-1590)

« Telle est la grandeur et l'autorité d'Aristote qu'il est difficile et dangereux d'écrire quelque chose contre ce qu'il a enseigné ; pour moi particulièrement, à qui la sagesse de cet homme a toujours paru admirable. Néanmoins, poussé par le souci de la vérité, par l'amour de laquelle, s'il vivait, il aurait été lui-même enflammé, ...je n'hésite pas à dire, dans l'intérêt commun, en quoi, le fondement inébranlable de la philosophie mathématique me force à me séparer de lui » (Koyré, p.53) (*ref.* à Archimède)

Sa conception de *l'impetus*

« Tout corps grave, qu'il se meuve naturellement ou violemment, reçoit en lui-même un *impetus*, une impression de mouvement, de telle sorte que, séparé de la vertu mouvante, il continue à se mouvoir de lui-même, pendant un certain laps de temps. lors donc que le corps se meut d'un mouvement naturel, sa vitesse augmentera sans cesse ; en effet, *l'impetus* et *l'impressio* qui existent en lui croissent sans cesse car il est constamment uni à la vertu mouvante » (Koyré, p.48)

« Or cet impetus décroît continuellement et, petit à petit, l'inclination de la gravité s'y glisse, laquelle, se composant avec l'impression faite par la force ne permet pas que la ligne *ab* reste droite pendant longtemps ; bien vite elle devient courbe parce que le corps est mû par deux vertus, dont l'une est la violence imprimée, et l'autre, la nature. Ceci contrairement à l'opinion de Tartaglia qui nie qu'un corps quelconque puisse être mû simultanément par des mouvements naturel et violents » (cité in Koyré p.50.)

Giordano Bruno (1548-1600). *La cena de la Ceneri*

Lorsque [le navire] descend le fleuve : si quelqu'un qui se trouve sur la rive, vient à jeter une pierre tout droit vers le navire, il manquera son but, et cela en proportion de la vitesse du navire. Mais que quelqu'un soit placé sur le mât de ce navire, et que celui-ci [vogue]aussi vite qu'on voudra, son jet ne sera pas faussé d'un point. De sorte que la pierre ou toute autre chose grave jetée du mât vers un point situé au pied u mât ou en quelqu'autre partie de la cale ou du corps du navire, y viendra en ligne droite. De même si quelqu'un qui se trouve dans le navire jette en ligne droite une pierre vers le sommet du mât, ou vers la hune, cette pierre reviendra en bas par la même ligne, de quelque manière que le navire se meuve, pourvu qu'il n'éprouve pas d'oscillations. (G. Bruno, *La cena de le cenerii*, III, 5. Opere Italiane, éd. Wagner, Lipsiae, 1830, p.169 sq. Largement utilisé et analysé par Koyré in *Etudes Galiléennes*, p. 170 sq.)

Or donc, que l'on s'imagine deux hommes : l'un dans le navire qui court, et l'autre en dehors de celui-ci, ayant chacun une pierre qu'ils laissent tomber : la pierre du premier, sans perdre un point, ni dévier de sa ligne verticale, viendra au lieu fixé à l'avance ; et celle du second se trouvera transportée en arrière. Ce qui ne vient de rien d'autre que de ce que la pierre qui part de la main de celui qui est porté par le navire, et par conséquent, se meut selon le mouvement de celui-ci, possède une certaine vertu *impresse*, que ne possède pas l'autre. De cette diversité, nous ne pourrions donner aucune raison sinon celle que les choses, qui sont attachées au navire par un lien ou par une telle appartenance, se meuvent avec celui-ci ; et que la pierre qui se meut avec le navire, porte avec elle la vertu du moteur, tandis que l'autre n'y a pas de participation » (in Koyré, *id.* p.175)

Koyré commente p.181 :

« On reste confondu devant la hardiesse, et le radicalisme, de la pensée de Bruno, qui opère une transformation –révolution véritable- de l'image du monde et de la réalité physique. Infinité de l'univers, unité de la nature, géométrisation de l'espace, négation du lieu, relativité du mouvement : nous sommes tout près de Newton.... »

Kepler (1571-1630). In *commentaria de Motibus Martis*

« Tout corps matériel est en lui-même et par nature, immobile et destiné au repos, dans quelque lieu qu'il soit. Car le repos, de même que les ténèbres, est une espèce de privation qui n'exige pas de création, mais appartient aux choses créées comme une certaine trace du néant ; le mouvement, en revanche est quelque chose de positif comme la lumière ». (cité in Koyré, *id.* p.191-192)

« Il faut répondre que non seulement la terre, entre temps s'en va, mais encore, avec elle, les chaînes magnétiques et invisibles, par lesquelles la pierre est rattachée aux parties sous-jacentes et avoisinantes de la terre, et par lesquelles elle est tirée vers la terre par la voie la plus courte, c'est-à-dire par la perpendiculaire. Or, le mouvement d'ensemble de la terre et de toutes les chaînes n'est d'aucune aide dans ce cas, ni d'aucun empêchement dans l'autre. En effet, la violence du mouvement qui projette le boulet tombe à l'intérieur du complexe de toutes les chaînes qui sont tellement fortes que le vent contraire le plus fort ne peut rien contre elles ; à plus forte raison donc, l'aura calme qui tourne avec la terre » (in Koyré p.197) »

« La terre se meut de l'Occident en orient, et avec elle toute la masse d'air qui l'entoure, et tout grave, qu'il soit posé par terre ou suspendu dans l'air. En effet, pourquoi pas le grave suspendu dans l'air ? Qu'est-ce qui l'en empêche ? » (in Koyré, p.191)

## **GALILEE**

Condamnation 22 juin 1633

« Moi, Galiléo, fils de feu Vincenzo Galilei de Florence, âgé de soixante dix ans, ici traduit pour y être jugé, agenouillé devant les très éminents et révérends cardinaux inquisiteurs généraux contre toute hérésie dans la chrétienté, ayant devant les yeux et touchant de ma main les Saints Évangiles, jure que j'ai toujours tenu pour vrai, et tiens encore pour vrai, et avec l'aide de Dieu tiendrai pour vrai dans le futur, tout ce que la Sainte Église Catholique et Apostolique affirme, présente et enseigne.

Cependant, alors que j'avais été condamné par injonction du Saint Office d'abandonner complètement la croyance fautive que le Soleil est au centre du monde et ne se déplace pas, et que la Terre n'est pas au centre du monde et se déplace, et de ne pas défendre ni enseigner cette doctrine erronée de quelque manière que ce soit, par oral ou par écrit; et après avoir été averti que cette doctrine n'est pas conforme à ce que disent les Saintes Écritures, j'ai écrit et publié un livre dans lequel je traite de cette doctrine condamnée et la présente par des arguments très pressants, sans la réfuter en aucune manière; ce pour quoi j'ai été tenu pour hautement suspect d'hérésie, pour avoir professé et cru que le Soleil est le centre du monde, et est sans mouvement, et que la terre n'est pas le centre, et se meut. [...] »

#### Deuxième journée du *Dialogue*

« Le mouvement est mouvement et agit comme mouvement en tant seulement qu'il est en rapport avec les choses qui en sont privées ; mais en ce qui concerne celles qui y participent toutes également , il est sans effet » (Ed. nat. p.141, trad. Koyré)

« si l'instinct naturel du globe terrestre est de tourner sur lui-même en 24 heures, chacune de ses parties doit avoir également une inclination intrinsèque et naturelle, non pas à demeurer immobile, mais à suivre la même course » (Ed. nat. p.168 ; traduction française Fréreau, De Gandt, Seuil 1992, p.238).

« Car la pure et simple vérité, c'est que les effets de ces tirs (vers l'est et vers l'ouest) seront exactement les mêmes, que le globe terrestre soit en mouvement ou en repos ; il en ira de même avec toutes les autres expériences, celles qu'on a présentées, celles qu'on pourrait présenter » (E.N. 209, *op.cit.* p.201)

« Quand le navire est immobile observez soigneusement comme les petites bêtes qui volent vont à la même vitesse dans toutes les directions de la cabine, on voit les poissons nager indifféremment de tous côtés, les gouttes qui tombent entrent toutes dans le vase placé en dessous ; si vous lancez quelque chose à votre ami, vous n'aurez pas besoin de jeter plus fort dans une direction que dans l'autre quand les distances sont égales, si vous sautez à pieds joints comme on dit, vous franchirez des espaces égaux dans toutes les directions. Quand vous aurez soigneusement observé cela [...] faites aller le navire à la vitesse que vous voulez ; pourvu que le mouvement soit uniforme, sans balancement dans un sens ou l'autre, vous ne remarquerez pas le moindre changement dans tous les effets qu'on vient d'indiquer ; aucun ne vous permettra de vous rendre compte si le navire est en marche ou immobile [...] Si tous ces effets se correspondent, cela vient de ce que le mouvement du navire est commun à tout ce qu'il contient aussi bien qu'à l'air ». (E.N. 213, *op.cit.* p.204-205)

« Je me suis montré doublement meilleur philosophe qu'eux, car ils se sont trompés en affirmant le contraire de ce qui se passe réellement, mais à cela ils ont ajouté un mensonge en disant avoir observé cet effet par l'expérience, tandis que moi, j'ai fait l'expérience et même avant cela, le simple raisonnement m'avait déjà fermement convaincu, que l'effet devait se produire comme en effet il se produit et il ne m'a pas été difficile de découvrir les raisons de leur erreur...ils ne se sont pas aperçu que ...quand le navire est en mouvement, la pierre ne part plus du repos puisqu'aussi bien le mât, que l'homme au sommet, ainsi que sa main et la pierre, se meuvent à la même vitesse que le vaisseau tout entier. Et il m'arrive encore d'avoir affaire à des esprits si obtus qu'on ne réussit pas à

leur mettre dans la tête que, même si celui qui est sur le mât ne bouge pas le bras, la pierre ne part pas du repos.... »<sup>1</sup> (Galilée, *Opere*, VI, pp. 545-46).

Dialogo, 2d journée.

Simplicio : « Il y a par ailleurs l'expérience si caractéristique de la pierre qu'on lance du haut du mât du navire : quand le navire est en repos, elle tombe au pied du mât ; quand le navire est en route, elle tombe à une distance du pied égale à celle dont le navire a avancé pendant le temps de chute de la pierre ; et cela fait un bon nombre de coudées quand la course du navire est rapide » ...

Salviati : « Très bien, avez-vous jamais fait l'expérience du navire ? »

Simplicio : « Je ne l'ai pas faite, mais je crois que les auteurs qui la présentent en ont fait soigneusement l'observation ; de plus, on connaît si clairement la cause de la différence entre les deux cas qu'il n'y a pas lieu d'en douter ».

Salviati : « Que les auteurs puissent la présenter sans l'avoir faite, vous en êtes vous-même un bon témoin : c'est sans l'avoir faite que vous la tenez pour certaine, vous en remettant à leur bonne foi ...sans qu'on arrive jamais à trouver quelqu'un qui l'ait faite. Que n'importe qui la fasse et il trouvera en effet que l'expérience montre le contraire de ce qui est écrit : la pierre tombe au même endroit du navire, que celui-ci soit à l'arrêt ou avance à n'importe quelle vitesse... »

« Quant à moi, sans expérience, je suis certain que l'effet sera bien celui que je vous dis car cela doit se passer nécessairement ainsi...Je suis si bon accoucheur des cerveaux que je vous forcerai à l'avouer »

Troisième journée des *Discours* :

« Nous apportons, sur le sujet le plus ancien, une science absolument nouvelle...une science aussi vaste qu'éminente, dont mes propres travaux marqueront le commencement et dont des esprits plus perspicaces que le mien exploreront les parties les plus cachées » (III, p.125)

« Il faut remarquer que tout degré de vitesse qui se trouve être dans un mobile est imprimé en lui de façon indélébile du seul fait de sa nature, pourvu seulement que soit supprimées les causes extérieures d'accélération et de ralentissement, ce qui n'a lieu que sur le plan horizontal ». (*Discours*, troisième journée, traduction de Maurice Clavelin, p.178

Quatrième journée du *Discours* :

« J'imagine qu'un mobile a été lancé sur un plan horizontal d'où l'on a écarté tout obstacle ; il est déjà certain, d'après ce qu'on a dit ailleurs plus longuement, que son mouvement se poursuivra uniformément et éternellement sur ce même plan pourvu qu'on le prolonge à l'infini. Supposons en revanche, qu'il soit limité et situé à une certaine hauteur : le mobile que j'imagine doué de gravité, parvenu à l'extrémité du plan horizontal et continuant sa course, ajoutera à son précédent mouvement uniforme et indélébile, la tendance vers le bas que lui confère sa gravité : le résultat sera

---

<sup>1</sup> La traduction française est celle de P. Hamou et M. Spranzi, *Galilée, écrits coperniciens*, Paris, Poche, 2004, p. 299.

ce mouvement composé d'un mouvement horizontal uniforme et d'un mouvement naturellement accéléré vers le bas que j'appelle projection ». Traduction de Maurice Clavelin, p.205

Koyré commente

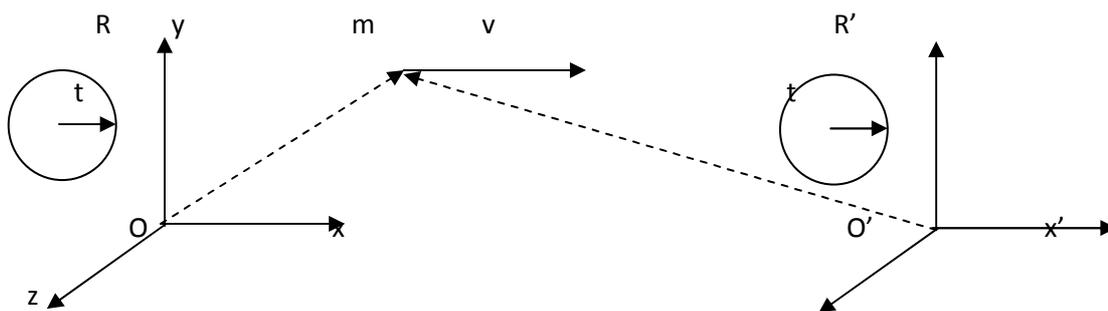
« L'impossibilité, pour Galilée, de formuler le principe d'inertie s'explique, d'une part, par son refus de renoncer entièrement à l'idée de cosmos, c'est à dire à l'idée d'un monde bien ordonné, et d'admettre franchement l'infinité de l'espace ; et, d'autre part, par son incapacité de concevoir le corps physique comme privé du caractère constitutif de la gravité » (*Etudes galiléennes*, p.258).

« Sans faire aucune mention de l'expérience, il conclut que le mouvement de la balle par rapport au navire ne change pas avec le mouvement de ce dernier... Il déclare avec fierté, Non et je n'ai pas besoin de la faire, et je peux affirmer sans aucune expérience qu'il en est ainsi, car il ne peut en être autrement ». La bonne physique est faite a priori. La théorie précède le fait. L'expérience est inutile parce qu'avant toute expérience nous possédons déjà la connaissance que nous cherchons ». A. Koyré, *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, p. 210-211

« Le passage que nous venons de citer [contre la nécessité de l'expérience] nous paraît être d'une importance capitale : il commande à notre avis, toute l'interprétation de l'œuvre galiléenne. Et donc de la science en général ». *Etudes galiléennes*, p. 226.

« Galilée a, de toute évidence raison : pour quiconque a compris le concept de mouvement de la physique moderne, cette expérience est parfaitement inutile. Mais pour les autres ? Pour ceux, justement, qui n'ont pas encore compris et qu'il faut amener à comprendre ? Pour ceux-là, l'expérience peut jouer un rôle décisif. (« Gassendi, le savant », in *Pierre Gassendi, Sa vie et son Œuvre*, Paris, Albin-Michel, 1955, p. 65)

La transformation de Galilée.



$$OO' = v.t \quad O'm = O'O + Om$$

$$x \quad x' = x - vt$$

$$y \quad y' = y$$

$$z \quad z' = z$$

$$t \quad t' = t$$

Ceci forme la transformation de Galilée.

Ce principe garantit la loi d'addition des vitesses. Si un corps est animé d'une vitesse  $w$  (de direction  $x$ ) dans le premier système, il est animé d'une vitesse  $w-v$  dans le second.

Gassendi

Préface au *de motu impresso a motore translato*, recueil paru à Paris en 1650

« M. Gassendi ayant été toujours si curieux de chercher à justifier par les expériences la vérité des spéculations que la philosophie lui propose, et se trouvant à Marseille en l'an 1641 fit voir sur une galère qui sortit exprès en mer par l'ordre de ce prince, plus illustre par l'amour et la connaissance qu'il a des bonnes choses que par la grandeur de sa naissance, qu'une pierre laschée du plus haut du mast, tandis que la galère vogue avec toute la vitesse possible, ne tombe pas ailleurs qu'elle ne feroit si la même galère étoit arrêtée et immobile ; si bien que soit qu'elle aille ou qu'elle n'aille pas, la pierre tombe tousiours le long du mast à son pié et de mesme costé. Cette expérience foite en présence de Monseigneur le Comte d'Allais et d'un grand nombre de personnes qui y assitoient, semble tenir quelque chose du paradoxe à beaucoup qui ne l'avoient point vue ; ce qui fut cause que M. Gassendi composa un traité *De motu impresso a motore translato* que nous vismes de lui la mesme année en forme de lettre escrite à M. du Puy ».

« ...Tu connais les expériences variées que tu as réalisées en Provence à l'automne dernier, je veux parler des objets que tu as jetés ou laissé tomber, tantôt de ton carrosse, tantôt de ton cheval, tantôt de ta très rapide galère lancée entre Marseille et le château d'If. Non content que ce soit à ton instigation que la plupart des gens aient fait ces expériences tu les as en plus toi-même précédés et, de même que tu avais remarquablement perçu le phénomène, de même as-tu donné de remarquables explications au fait que tous les mouvements des objets, que nous les lancions ou que nous les laissions tomber, se font apparemment de la même façon ; peu important que le corps dont nous nous occupons soit au repos ou qu'il se déplace. Quant-à moi, j'ai tout aussitôt décrit cela à nos amis dans cette ville et parce qu'il y en eut certains dont je n'ai qu'à grand peine emporté l'adhésion, je leur ai écrit une lettre plus détaillée ; et mon exposé de la question leur a arraché de l'étonnement.

J'ai montré que ce qui aurait plutôt du les étonner, c'est qu'une pierre lancée vers le haut depuis un carrosse, un cheval ou un bateau en mouvement ne retombe pas dans la main même ou que, laissée tomber depuis le haut d'un mât, elle ne tombe pas au pied du mât. Je remanie donc maintenant selon leur désir les deux principales lettres de cette série et j'accepte volontiers qu'elles soient publiées... (Lettre à Valois du 1 juin 1641)

« Il est clair que la source de la perpétuité est l'uniformité, et de la cessation, l'inégalité ; car seulement ce qui ne s'accroît, ni ne s'affaiblit, peut perdurer ; et rien ne peut, par la force de la nature, ni augmenter, ni diminuer indéfiniment. Ainsi donc, si quelqu'un, dans ces choses composites, recherche un mouvement qui soit naturel, au maximum, il est clair que ce sera le mouvement des cieux, parce qu'il est, avant tous les autres, uniforme et perpétuel, grâce à la forme circulaire choisie par le créateur : celui-ci n'ayant ni commencement ni fin, il peut être uniforme et perpétuel » (*De motu*, trad. Koyré, EG., p.307)

« Il se peut que, s'il s'agissait du mouvement de la terre –si on la supposait mobile sur son axe- cela paraîtrait moins surprenant- car on pourrait dire que la pierre se meut uniformément parce qu'elle se conforme spontanément au mouvement uniforme du tout, qu'elle y soit liée ou qu'elle en soit

séparée. Mais sans doute est-ce étonnant (lorsqu'il s'agit du mouvement) imprimé par la course du navire, ou d'une autre chose, ou de la main seule ; car la pierre ne possède pas de relation semblable à ces choses, ou à leurs mouvements. D'où il est juste de conclure que le mouvement horizontal, de quelque cause qu'il provienne, est, de par sa nature, perpétuel, à moins qu'une cause n'intervienne qui détourne le mobile et trouble le mouvement ». *De motu*, chap. X, in Koyré EG. p.309

« Tout mouvement se fait par impulsion et lorsque je dis impulsion, je ne veux aucunement faire exception pour l'attraction ; car attirer n'est rien d'autre que pousser vers soi par un instrument incurvé » (*De motu*, in Koyré, 311)

## Descartes

« Dieu est immuable et agit toujours de même façon » Le Monde, Chapitre VII.

*Le Monde*, on a trois principales règles :

« La première est que chaque partie de la matière, en particulier, continue toujours d'être dans le même état, pendant que la rencontre des autres ne la contraint point de changer. C'est à dire, si elle a quelque grosseur, elle ne deviendra jamais plus petite, sinon que les autres la divisent ; si elle est ronde ou carrée, elle ne changera jamais cette figure sans que les autres l'y contraignent ; si elle est arrêtée en quelque lieu, elle n'en partira jamais que les autres l'en chassent ; et si elle a une fois commencé à se mouvoir, elle continuera toujours avec une égale force jusques à ce que les autres l'arrêtent ou la retardent » (A.T.XI, p.38)

« Je suppose pour seconde règle : que quand un corps en pousse un autre, il ne saurait lui donner aucun mouvement, qu'il n'en perde en même temps autant du sien ; ni lui en ôter que le sien ne s'augmente d'autant. Cette règle, jointe avec la précédente, se rapporte fort bien à toutes les expériences, dans lesquelles nous voyons qu'un corps commence ou cesse de se mouvoir, parce qu'il est poussé ou arrêté par quelque autre ». (A.T.XI, p.41)

“J'ajouterai pour la troisième: que lorsqu'un corps se meut, encore que son mouvement se fasse le plus souvent en ligne courbe et qu'il ne s'en puisse jamais faire aucun qui ne soit en quelque façon circulaire, ainsi qu'il a été dit ci-dessus, toutefois, chacune de ses parties en particulier, tend toujours à continuer le sien en ligne droit. Et ainsi, leur action, c'est à dire l'inclination qu'elles ont à se mouvoir, est différent de leur mouvement » (A.T. XI, p.43-44)

*Les Principes de la Philosophie*,

Pr. II, Article 36 : « Que Dieu est la première cause du mouvement, et qu'il en conserve toujours une égale quantité dans l'Univers. »

« Il n'y a point d'autre cause (du mouvement) que Dieu, qui, de sa toute puissance a créé la matière avec le mouvement et le repos, et qui conserve maintenant en l'univers, par son concours ordinaire, autant de mouvement et de repos qu'il en a mis en le créant »

*Pr. II, Article 37* : « la première loi de la nature : que chaque chose en l'état qu'elle est, pendant que rien ne le change »

« ...que si (une partie de la matière) est en repos, elle ne commence point à se mouvoir de soi-même. Mais lorsqu'elle a commencé une fois à se mouvoir, nous n'avons aucune raison de penser qu'elle doive cesser de se mouvoir de même force, pendant qu'elle ne rencontre rien qui retarde ou qui arrête son mouvement. De façon que, si un corps a commencé une fois de se mouvoir, nous devons conclure qu'il continue par après de se mouvoir, et que jamais il ne s'arrête de soi-même ».

*Pr. II, Article 39* : « La seconde loi de la nature : que tout corps qui se meut, tend à continuer son mouvement en ligne droite »

« ...chaque partie de la matière, en son particulier, ne tend jamais à continuer de se mouvoir suivant des lignes courbes, mais suivant des lignes droites ... Cette règle, comme la précédente, dépend de ce que Dieu est immuable, et qu'il conserve le mouvement en la matière par une opération très simple... » (suit ici l'analyse de la fronde et la *tendance* au mouvement selon la tangente ; l'analyse de la fronde et de la tangente est présente chez Galilée, cf. *Dialogue*, deuxième journée, E.N. p.218-219)

*Pr. II, Article 40* : « La troisième : que si un corps qui se meut en rencontre un autre plus fort que soi, il ne perd rien de son mouvement, et s'il en rencontre un plus faible qu'il puisse mouvoir, il en perd autant qu'il lui en donne »

Lettre à Huygens du 18 ou 19 février 1643 :

« Sur quoi je considère que la nature du mouvement est telle que, lorsqu'un corps a commencé à se mouvoir, cela suffit pour faire qu'il continue toujours après avec une même vitesse et en ligne droite, jusqu'à ce qu'il soit arrêté ou détourné par quelque autre cause ». (A.T. III, p.619).

*Le Monde*, VII, (A.T. XI, p.44).

« Or est-il que de tous les mouvements il n'y a que le droit qui soit entièrement simple, et dont toute la nature soit comprise en un instant. Car pour le concevoir, il suffit de penser qu'un corps est en action pour se mouvoir d'un certain côté, ce qui se trouve en chacun des instants qui peuvent être déterminés pendant le temps qu'il se meut. Au lieu que, pour concevoir le mouvement circulaire, ou quelque autre que ce puisse être, il faut au moins considérer deux de ses instants, ou plutôt deux de ses parties, et le rapport qu'il est entre elles ».

Il poursuit :

« remarquez que je ne dis pas, pour cela, que le mouvement droit se puisse faire en un instant, mais seulement que tout ce qui est requis pour le produire se trouve dans les corps en chaque instant qui puisse être déterminé pendant qu'ils se meuvent, et non pas tout ce qui est requis pour produire le circulaire ». (*id.* p.45)

## **Roberval (1602-1675). Comptes rendus de l'Académie Royale des Sciences, année 1669.**

“Il n'est pas nécessaire d'attribuer une vertu particulière à ce centre, qui n'est qu'un point ; mais il suffit d'entendre que toutes les parties du corps sont portées à s'unir ensemble pour ne faire qu'un seul corps ; car de là, il en résultera un centre de gravité vers lequel toutes ces parties seront dirigées, avec plus ou moins de force, suivant leur propre nature : Et c'est cette force en quoy consiste la pesanteur ”

Il distingue alors trois modèles explicatifs ou plutôt “opinions” :

“... la pesanteur réside dans le seul corps pesant” ; la pesanteur est “commune et réciproque entre ce corps pesant, et celui vers lequel il est porté” ; la pesanteur est “produite par l'effort d'un tiers qui pousse le corps pesant”.

“Pour conclusion je feray toujours mon possible pour imiter Archimède, qui en cette occasion de la pesanteur pose pour principe et pour postulat, le fait constant, et ancré dans tous les siècles passés, jusqu'à présent, qu'il y a des corps pesants, qui ont les conditions dont il parle au commencement de son traité sur le sujet, et sur ce fondement j'établirai comme il a fait mes raisonnements pour la mécanique sans me mettre en peine de savoir à fond les principes et les causes de la pesanteur me réservant à suivre la vérité, si elle veut bien se montrer un jour clairement et distinctement à mon esprit.”

Seconde opinion :

“On peut concevoir par ce mouvement celui des corps pesants vers le centre, c'est-à-dire qu'ils ont une disposition ou une vertu à se mouvoir vers les autres corps qui leur est naturelle et adhérente, et qui ne se perd point quoy qu'on les tienne en repos par violence du moins lorsqu'ils n'en sont pas trop éloignés des autres corps, nous appelions ce mouvement, mouvement de jonction ou d'aggregation dont on voit beaucoup d'autres exemples en la nature [...].”

Quant à la troisième et dernière “opinion”, elle fait intervenir pour expliquer la pesanteur,

“quelque corps très subtil qui se meut d'un mouvement très vaste et qui s'insinue facilement entre les parties des autres corps plus grossiers, de sorte qu'en les pressant, il les pousse vers le bas ou vers le haut: et par ce moyen ils font la pesanteur ou la légèreté”.

## **Christian Huygens**

« Si la gravité n'existait pas et qu'aucune résistance d'air ne s'opposait au mouvement des corps, chacun d'eux continuerait son mouvement avec une vitesse uniforme en suivant une ligne droite » (*Œuvres complètes*, XVIII, 22 volumes, p.124)

## **Spinoza**

Abrégé de mécanique, Corollaire, première partie.

« Il suit de là qu'un corps en mouvement se meut jusqu'à ce qu'il soit déterminé par un autre à s'arrêter, et qu'un corps en repos reste aussi en repos jusqu'à ce qu'il soit déterminé au mouvement par un autre (...) Quand je suppose, en effet qu'un corps, soit par exemple A, est en repos et que je

n'ai pas égard à d'autres corps en mouvement (...) Si, au contraire, A est supposé en mouvement, chaque fois que nous aurons égard seulement à A... » (Vrin, p.148-149, Gebhardt,II, p98).

Remarque: l'énoncé de la ligne droite est absent.

## Newton

*Philosophiae naturalis Principia mathematica* (Londres 1687, reed. 1713, 1727)

Définition de la quantité de matière :

« La quantité de matière se mesure par la densité et le volume pris ensemble [...]Je désigne la quantité de matière par les mots de corps ou de masse ».

Définition de la quantité de mouvement :

« La quantité de mouvement est le produit de la masse par la vitesse ».

Définition de la *force interne* de la matière :

« La force interne de la matière (*vis insita*) est le pouvoir de résistance, par lequel chaque corps persévère, autant qu'il est en lui de le faire, dans son état actuel de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite »

Définition de la *force imprimée* :

« La force imprimée (*vis impressa*) est une action exercée sur le corps, qui a pour effet de changer son état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite ».

Première loi de la mécanique:

“Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme à moins que des forces imprimées ne le contraignent à changer son état” (Loi I, traduction de l'édition de 1727 par la marquise du Chastelet).

Corollaire V :

« Les mouvements des corps inclus dans un espace donné sont les mêmes, entre eux, que cet espace soit au repos, ou qu'il se meuve uniformément en ligne droite sans mouvement circulaire »