

## Aristote et Galilée. Justification de l'outil mathématique.

Repris, pour l'essentiel, de l'ouvrage de Yoav Ben-Dov *Invitation à la physique*, éditions du Seuil, collection Points-Sciences et de l'ouvrage de Jack Meadows *Les grands scientifiques*, éditions Maxi-Livres Profrance.

### 1. Les 3 grandes périodes de la physique.



#### Aristote (-384 - 322 av. JC).

Vieilles de 2500 ans, ses méthodes furent employées jusqu'au 16<sup>ème</sup> siècle. C'est l'ère de la "Physique ancienne" où les physiciens sont essentiellement des philosophes puis des moines. L'ouvrage φυσικα (physika, phénomènes naturels) d'Aristote est certainement à l'origine du mot "physique".

#### Galilée (1564 - 1642).

C'est le fondateur de la "Physique classique" (ou "expérimentale") que l'on enseigne au lycée et les 2 premières années post-bac. Il donne une description précise des phénomènes naturels grâce à la mesure. Les physiciens sont essentiellement des philosophes, des moines puis des ingénieurs (techniciens, souvent issus de la noblesse, qui avaient les moyens de financer leurs idées). Newton est le plus célèbre représentant de la physique classique.

#### Einstein (1879 - 1955).

C'est le fondateur le plus célèbre de la "Physique moderne" dont les méthodes sont utilisées à partir du 20<sup>ème</sup> siècle. Il explique la cause de la gravitation grâce à la théorie de la relativité (courbure de l'espace-temps). La physique se dirige vers une science des probabilités. Les physiciens sont essentiellement des ingénieurs à forte dominante mathématique et des chercheurs (apparition de cette profession à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle).

### 2. La physique des 3 grandes périodes.

#### Aristote.

*Pensée révolutionnaire développée par les grecs : les phénomènes naturels ne sont pas créés par les caprices des dieux. Il en découle que l'on peut donc les expliquer puis les prévoir (dans le temps ou l'espace). L'homme prend à présent une part active dans l'organisation de sa vie : tout n'est pas fatalité ! La Physique est la science qui examine et interprète les phénomènes de la nature inanimée.*

Aristote est un philosophe qui fondera l'école péripatéticienne (appelée également le *Lycée*). Il observe la nature et en vient à la conclusion <sup>(1)</sup> suivante : tout ce qui existe peut se décomposer en 4 catégories (qu'il appelle *éléments*) : 2 éléments légers (l'air et le feu) et 2 éléments lourds (l'eau et la terre) <sup>(2)</sup>. Ces 4 éléments bougent ou se transforment sous l'action de 2 types de mouvements : le mouvement naturel et le mouvement forcé.

**Mouvement naturel** : les 2 éléments légers tendent naturellement (si on les laisse faire) à regagner leur place naturelle stable (= lieu de leur origine) qui est le ciel, c'est - à - dire l'extrémité de l'univers. Cette ascension s'effectue plus ou moins rapidement selon leur degré de légèreté. Les 2 éléments lourds, quant à eux, tendent à retourner plus ou moins rapidement à leur lieu d'origine : le centre de la Terre, c'est - à - dire le centre de l'univers.

**Mouvement forcé** (appelé "violent") : il résulte de l'action de forces extérieures (dues à l'homme par ex) sur les 4 éléments. Cette action doit être plus ou moins forte pour contrecarrer efficacement le mouvement naturel.

<sup>1</sup> Qu'il a reprise du philosophe Grec Empédocle (≈ -500 ≈ -430 avant J.C.)

<sup>2</sup> Plus tard, au 18<sup>ème</sup> siècle, on rajoutera un cinquième élément (l'éther, qui n'a rien à voir avec l'antiseptique du même nom) afin d'expliquer certaines propriétés de la lumière. Remarquer que la pensée d'Aristote a encore cours aujourd'hui dans les cultures non technologiques (Orient par exemple).

Ainsi, un élément lourd posé sur un plan glacé horizontal ne peut se mouvoir vers le centre de la Terre (la glace l'en empêche) : il reste donc immobile et inchangé tant qu'aucune force (mouvement forcé) ne vient le déplacer.

Aristote est le physicien du sens commun. Ses théories permettent d'expliquer de manière directe les phénomènes observés : une bille de plomb tombe plus vite qu'une bille de mousse car sa tendance à rejoindre sa place naturelle est plus forte que la bille de mousse qui possède un peu plus d'élément "air" que la bille de plomb, ce qui la retient un peu plus vers le haut. Les travaux de psychologie expérimentale confirment que le monde physique des hommes non scolarisés est proche des idées d'Aristote.

### Galilée.

Les problèmes techniques, jusqu'au 16<sup>ème</sup> siècle, étaient essentiellement *statiques* (construction de villes avec des routes bien droites, constructions d'édifices bien verticaux etc.) si bien que tout ce qui était lié aux vitesses de déplacement (*dynamique*) était sans importance, donc ignoré.

Suite au système de corporations et de compagnonnages (un maître enseigne à l'élève) le 16<sup>ème</sup> siècle devient une période où l'on commence à bien maîtriser le mouvement (un mouvement simple est transformé en plusieurs mouvements plus complexes) et à améliorer les vitesses de production. Avec ces mouvements (et donc les vitesses) on commence à parler de *frottements*, sortes de forces mécaniques qui retiennent les objets dans leur déplacement. Afin d'améliorer la transmission des mouvements, il devient nécessaire de chiffrer (on dit *quantifier* en physique) les vitesses de déplacement et les frottements.

Un gros problème apparaît alors avec les méthodes d'explications d'Aristote : on ne peut pas prévoir avec précision les phénomènes : on ne peut pas *quantifier* <sup>(3)</sup>. Par exemple on est incapable de prévoir la durée d'une chute. Afin de quantifier les mouvements, Galilée a alors l'idée de reprendre les travaux de Pythagore <sup>(4)</sup> (les nombres pour la mesure) et d'Archimède (la géométrie pour la mécanique), tombés dans l'oubli au moyen-âge <sup>(5)</sup>. Galilée en déduit qu'on peut donner un nombre aux vitesses de déplacement (les *quantifier*). Il invente le concept de base de la mécanique : l'*accélération*.

La technologie du 16<sup>ème</sup> siècle permet à Galilée de réaliser ses idées : il profite alors de l'apparition du chronomètre pour quantifier la durée de chute d'un corps <sup>(6)</sup>. Il s'aperçoit alors qu'Aristote était dans l'erreur : une bille de mousse tombe à la même vitesse qu'une bille de plomb dès qu'on élimine les frottements. La tendance qu'a la bille de plomb de rejoindre le centre de la terre est la même que la bille de mousse : cette "tendance" n'est donc pas une propriété de la matière puisqu'elle dépend des conditions extérieures (la densité du milieu traversé). En outre on s'aperçoit, toujours en éliminant les frottements, qu'un objet posé sur un plan horizontal se déplace à vitesse constante dès qu'aucune force ne vient le contrarier (l'immobilisme n'est qu'un cas particulier de la vitesse constamment égale à 0). Galilée construit ensuite sa lunette astronomique pour quantifier la durée de déplacement des astres <sup>(7)</sup>.

Les travaux de Galilée se fondent sur les instruments, sur la mesure et donc sur les mathématiques : cela ouvre plus généralement la voie aux expérimentations scientifiques <sup>(8)</sup>.

Aristote a eu le mérite de dire que l'on pouvait expliquer les choses en les argumentant à l'aide de propositions qui découlaient les unes des autres (on dit des *démonstrations*). Il était un véritable scientifique, mais sa théorie reposait sur des postulats issus de l'observation directe (sans instruments). L'analyse précise des phénomènes (à l'aide d'instruments) prouva que les perceptions de l'homme étaient sujettes à l'erreur, aux déductions fausses. La seule observation de l'homme est insuffisante pour expliquer la nature.

Galilée montre alors l'exemple aux nouveaux "philosophes de la nature" (les futurs physiciens) : on doit quantifier les phénomènes si on veut correctement les interpréter. Cela ne passe plus par l'observation directe mais par l'observation via les instruments de mesure. Beaucoup de phénomène ne sont plus intuitifs...la physique devient plus compliquée, il faut créer des instruments et des "protocoles de mesure" pour ne pas dire n'importe quoi. Il devient finalement nécessaire de "scolariser" les gens pour les débarrasser de leur pensée naturellement "Aristoticienne".

<sup>3</sup> On peut seulement *qualifier*, dire "ça va plus vite, ça va moins vite"...sans donner de chiffre.

<sup>4</sup> Philosophe Grec ( $\approx -570 \approx -480$  avant J.C.). Ses théories s'opposent à celles d'Aristote.

<sup>5</sup> Pythagore avait observé que la longueur d'une corde de guitare donnait la hauteur d'une note, et donc qu'un son (perception d'un bruit de la nature) était lié à un nombre (la longueur de la corde). Il en a conclu, avec d'autres observations, que la nature pouvait être décrite par des nombres.

<sup>6</sup> Expérience du plan incliné en 1604 : l'inclinaison d'un plan sur lequel roule une bille permet expérimentalement d'augmenter la durée d'une chute, et donc d'augmenter la précision des mesures au chronomètre. En 1609 il développe la lunette astronomique

<sup>7</sup> Ses problèmes avec l'Eglise en découlent !

<sup>8</sup> Certains parlent alors de "torture de la nature" et s'opposent violemment à l'expérimentation scientifique qui consiste à créer des *objets de laboratoire*. L'objet de laboratoire représente de manière épurée l'objet naturel qu'il est censé représenter.

Les programmes scolaires très chargés ne prennent pas encore en compte notre "Aristotélisme spontané" responsable de concepts erronés. Beaucoup d'étudiants ont ainsi beaucoup de mal à appréhender la physique classique, d'autant plus que pour sortir de ce système de pensée cela demande beaucoup d'efforts !

La physique des lycées se fonde sur cette science non intuitive mais suffisante pour décrire avec exactitude le monde à notre échelle.

Puisque la quantification des phénomènes est finalement articulée autour des nombres, les mathématiques qui imposent les règles d'utilisation de ces nombres se voient propulsées au devant de la scène : les physiciens doivent être, avant tout, des mathématiciens. Les données expérimentales recueillies permettent alors aux physiciens-mathématiciens d'établir des lois d'évolution des grandeurs chiffrées (*équations*) et donc de prévoir avec précision l'évolution d'un phénomène.

## Einstein.

A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, les instruments de mesure sont devenus très précis. On sort du cadre de l'échelle humaine propre à la méthode Galiléenne. On commence à observer l'infiniment grand (découvertes des planètes) et l'infiniment petit (radioactivité). On s'aperçoit que la nature devient trop complexe pour que le cerveau de l'homme puisse la comprendre.

Einstein démontre alors que le temps n'est pas dissocié de l'espace : la mesure du temps dépend de l'observateur qui mesure. Pour un observateur, deux horloges atomiques indiqueront des temps différents si elles se déplacent l'une par rapport à l'autre : la simultanéité de 2 événements n'a alors plus de sens.

D'un autre côté la Physique quantique (qui décrit les phénomènes observés à l'échelle atomique) émerge : on s'aperçoit alors que même les instruments de mesure, aussi précis soient-ils, ne sont pas...fiables !!! Et cela n'est plus dû à une limite technologique mais à une limite théorique<sup>(9)</sup>....On démontre, par exemple, qu'un électron qui se déplace à 100 km/s  $\pm$  10 m/s (mesure précise à 0,01% près) ne peut être localisé qu'à 72  $\mu$ m près au maximum<sup>(10)</sup> ( c'est-à-dire environ 1 million de fois la taille d'un atome, 1 milliard de fois la taille de l'électron lui-même<sup>(11)</sup>) quelle que soit la précision de l'appareil de mesure

La physique quantique se dirige finalement vers une science des probabilités<sup>(12)</sup> : on ne dit plus "la vitesse de cet objet est de 100 km/h" mais "il y a 998 chances sur 1000 pour que la vitesse de cet objet soit comprise entre 99,99 km/h et 100,01 km/h". La physique devient très compliquée, elle fait intervenir des équipes de chercheurs et non plus des chercheurs isolés. On s'aperçoit que l'homme ne peut plus interpréter tous les phénomènes, même par les mathématiques. Cette incompréhension est d'autant plus marquée que les objets observés s'éloignent de l'échelle humaine.

*La "clarté" et la "vérité" sont des concepts complémentaires auxquels on ne peut accéder simultanément*  
(Niels Bohr)

Pour une grande partie des physiciens (dont le chef de file est Niels Bohr), il faut renoncer à comprendre la nature exacte des phénomènes et se contenter de les modéliser mathématiquement grâce à l'expérimentation, seule accessible à la compréhension humaine.

---

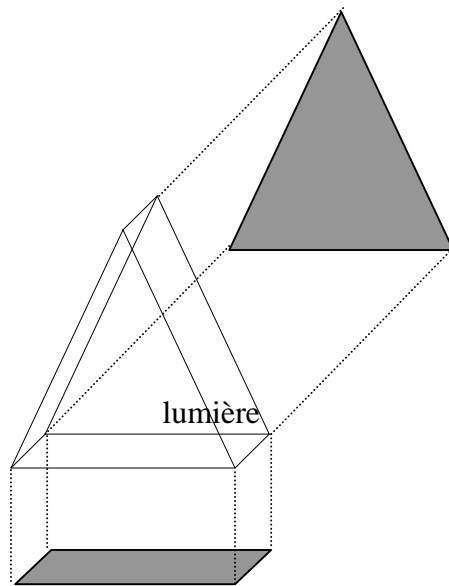
<sup>9</sup> Le fameux "principe d'incertitude" d'Heisenberg indique que  $\Delta m v_x \times \Delta x \geq h$  avec  $h =$  constante de Planck  $\approx 6,626\ 075\ 5 \cdot 10^{-34}$  J·s,  $m =$  masse du corps considéré,  $v_x =$  vitesse du corps selon l'axe des  $x$  et  $\Delta x =$  incertitude sur la position du corps selon l'axe des  $x$ .

<sup>10</sup>  $m \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg pour un électron d'où  $\Delta m v_x = m \Delta v_x$  donc  $\Delta x \geq h / (m \cdot \Delta v_x) \approx 72\ \mu\text{m}$ .

<sup>11</sup> C'est comme si un homme (taille  $\approx 2$ m) ne pouvait être localisé à mieux de 2 millions de km près...

<sup>12</sup> Au grand dam d'Einstein d'ailleurs, qui n'avait pas prévu un tel développement de sa pensée et pour lequel "Dieu ne joue pas aux dés".

Exemple : la lumière que l'on assimile à un toit.



L'expérience 1 (éclairage de face) nous apprend que la lumière est un triangle (corpuscule par exemple).

L'expérience 2 (éclairage qui vient du dessus) nous apprend que la lumière n'est pas un triangle mais un rectangle (onde par exemple)

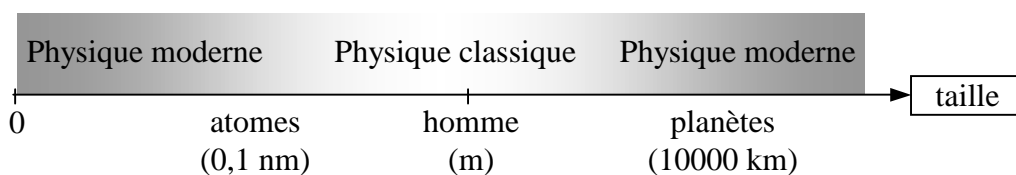
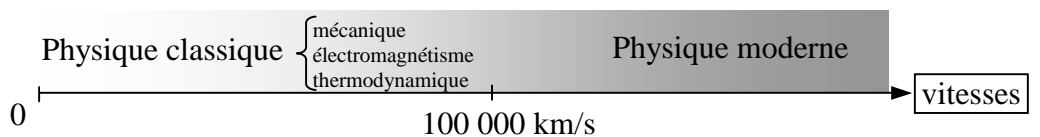
**Question** : quelle est la vraie nature de la lumière ? **Réponse** : elle est à la fois triangle et rectangle. C'est difficile à imaginer...et on doit y renoncer ! C'est la théorie de la dualité onde-corpuscule de la lumière.

Cette affirmation est cependant apparemment réfutée aujourd'hui : **(Complément de notre collègue Jean Paul ROUX)** : *La lecture de Feynman : Lumière et matière : une étrange histoire en particulier m'a convaincu que ce point de vue de dualité onde-corpuscule de la lumière est dépassé (et surtout franco-français). La lumière est constituée par des particules dont la position se calcule en termes de probabilités. Dans certains cas ces calculs peuvent être simplifiés, on retombe sur des trajectoires classiques de particules.*

Citation de Feynman :

Je ne saurais trop insister sur cet aspect de la lumière : la lumière est faite de particules. Il est très important — particulièrement pour ceux d'entre vous qui ont été à l'école, et à qui on a appris que la lumière se comporte comme une onde — de savoir que la lumière se comporte comme des particules. "la lumière", disait-on, "doit être considérée soit comme une onde, soit comme un ensemble de particules...selon les conditions expérimentales. C'est ce qu'on a appelé *la dualité onde-corpuscule*. On a pu dire, de façon plaisante, qu'à cette époque la lumière était une onde les lundis, mercredis et vendredis, et un ensemble de particules les mardis, jeudis et samedis. Restait le dimanche pour réfléchir à la question..."

**Pour finir, à méditer** : lycéen, Einstein a échoué son examen d'entrée à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (pour devenir ingénieur électricien). Il l'a réussi un an plus tard après une année d'études intensives. Conclusion : il ne suffit pas d'être intelligent pour réussir, il faut également travailler.!!!



## Exercices corrigés

1.

Situez les dates des 3 grandes périodes de la physique avec le nom des scientifiques qui y est rattaché.

**Rép :**

Physique ancienne -4<sup>ème</sup> siècle au 16<sup>ème</sup> siècle dont le représentant est Aristote.

Physique expérimentale du 16<sup>ème</sup> siècle au 20<sup>ème</sup> siècle dont le représentant est Galilée.

Physique moderne à partir du 20<sup>ème</sup> siècle (fin du 19<sup>ème</sup> pour être plus exact) dont le représentant est Einstein.

2.

Citez les apports des 3 grands physiciens.

**Rép :**

Aristote pense que la nature obéit à des lois et n'est pas soumise aux caprices des dieux.

Galilée introduit le concept d'*expérience* où l'instrumentation prend le pas sur la perception sensorielle trop sujette à l'erreur.

Einstein (ou plutôt les physiciens modernes) pensent que les instruments de mesure ne sont plus forcément fiables (relation d'incertitude...)

3.

Un journaliste a affirmé la chose suivante :

*Aristote, Philosophe grec, résume parfaitement la pensée grecque de son époque en expliquant l'origine du monde :  
"Au commencement, le père des dieux Zeus féconda la déesse Terre Gê pour engendrer notre monde".*

Que pensez-vous de l'affirmation du journaliste ?

**Rép :**

Le journaliste raconte n'importe quoi : Aristote est un homme de science qui a justement combattu cette idée de divinité dans l'explication des phénomènes naturels.

4.

Aristote a affirmé la chose suivante : *"on devrait se fier davantage aux données de la perception sensorielle qu'aux théories, sauf si l'on montre que ces dernières correspondent à l'observation".*

En quoi cette affirmation est-elle scientifique ?

En quoi cette affirmation nous montre clairement la limite des théories d'Aristote ?

**Rép :**

Cette affirmation est scientifique car elle suppose qu'il y a des lois auxquelles obéissent les phénomènes naturels (les données de la perception sensorielle permettent d'établir ces lois).

Aristote se fonde essentiellement sur la perception sensorielle qui est malheureusement sujette à l'erreur !

5.

Un des 3 grands physiciens vu dans le cours a affirmé la chose suivante :

*"Les espaces parcourus dans un mouvement naturel sont proportionnels au carré des durées".*

De quel physicien peut-il s'agir ?

**Rép :**

Il ne peut s'agir d'Aristote car ici il y a eu forcément des expérimentations avec des mesures pour établir la loi. On parle de "mouvement naturel" : il s'agit donc de Galilée.

6.

Galilée a découvert la loi d'oscillation des pendules :

*"La durée des oscillations d'un pendule varie simplement en fonction de la longueur de la ficelle qui retient la boule".*

Est-ce que la loi est quantifiée ?

Est-ce que l'énoncé de cette loi aurait pu être fait par Aristote ?

**Rép :**

La loi n'est pas quantifiée (on ne sait pas *comment* varie la durée des oscillations).

Oui car il s'agit ici d'une observation...encore qu'ici il s'agit de mouvement, ce qui n'était pas souvent étudié par les gens de l'époque.

**7.**

1. *Quel est l'apport de la physique classique sur la précédente période ?*

2. *Quel(s) problème(s) technique(s) a favorisé l'émergence de la physique classique ?*

3. Isaac Newton a établi en 1667 la loi de gravitation universelle :  $F = G \cdot \frac{M_1 \cdot M_2}{R^2}$  avec F la force d'attraction qui s'exerce sur une masse  $M_1$  due à la présence de la masse  $M_2$  éloignée de R. On a  $G \approx 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ . *En quoi la relation précédente est-elle caractéristique de la période de la physique classique ?*

4. *En quoi le phénomène de solidification de l'eau à basse température ( $T \leq 0^\circ \text{C}$  sous pression atmosphérique normale) permet de mettre en doute la classification des éléments d'Aristote ?*

5. Werner Heisenberg a établi en 1927 le principe d'incertitude :  $\Delta x \cdot \Delta v \geq \frac{h}{m}$  avec  $\Delta x$  = incertitude sur la position d'un objet de masse m,  $\Delta v$  = incertitude sur la vitesse de l'objet et  $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ . *En quoi cette relation est-elle caractéristique de la période de la physique moderne ?*

**Rép :**

1. La physique classique ne se fie plus aux perceptions de l'homme, elle se fie aux instruments de mesure.

2. La physique ancienne était statique, les problèmes techniques dus aux mouvements (frottements etc.) liés à la maîtrise technique (Les *Compagnons*, les *Corporations*) ont permis la réalisation d'appareils de mesure donc la mesure des mouvements, caractéristique de la période expérimentale (classique).

3. Il s'agit ici d'une loi quantifiée élaborée à partir de mesures précises (le caractère de  $R^2$  n'est pas intuitif, G est donnée avec précision). En outre c'est une loi de mouvement.

4. L'élément "eau" d'Aristote devient élément "Terre" ce qui implique une classification des éléments qui varie avec les conditions extérieures (climatiques)...ce n'est donc pas une classification immuable.

5. Cette loi est vraie quelle que soit la précision des appareils de mesure : l'homme n'a plus accès à la "vérité" même avec des appareils très performants.