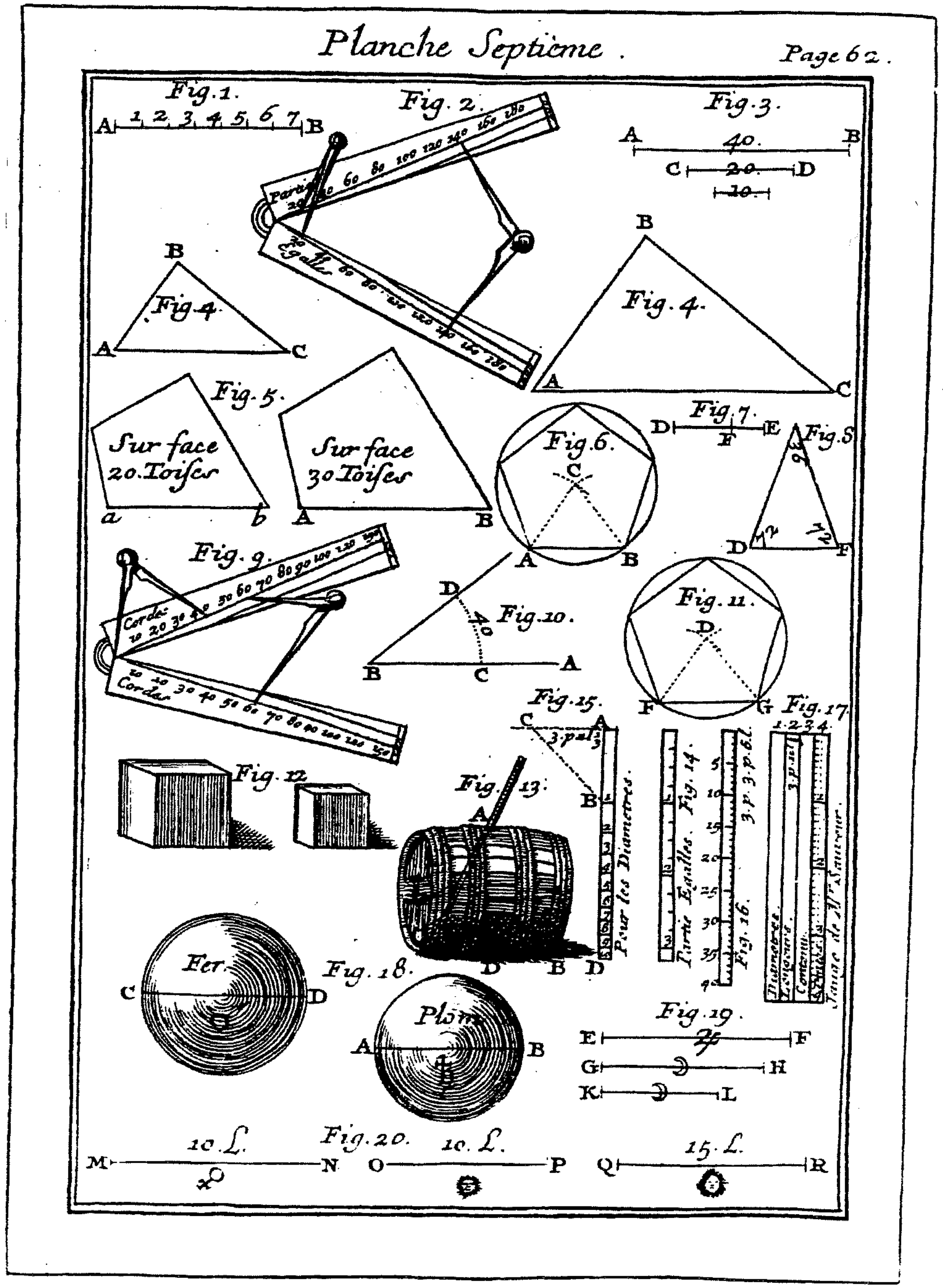


LE RÔLE DES INSTRUMENTS DANS L'ENSEIGNEMENT DE L'HISTOIRE DES SCIENCES

Carlos Mederos Martin

Fondation Orotava des Canaries de l'Histoire des Sciences

Traduit de l'espagnol par Roseline Cases (IREM de Toulouse)

1. Introduction

En 1630, Galilée publie *son Dialogue sur les deux plus grands systèmes du monde ptoléméen et copernicien*. Le Troisième Jour, il dit, se référant à la Théorie Héliocentrique :

> *Je ne peux pas manquer d'admirer le trait de génie de ceux qui l'ont reçue et acceptée comme vérité... Je ne peux trouver de limites à mon admiration en voyant comment, chez Aristarque et chez Copernic, la raison a pu faire autant violence contre les sens, pour que, au désavantage de ceux-ci, elle se soit rendue maîtresse de leurs crédulités.*

En effet, Aristarque de Samos fut un astronome de l'École d'Alexandrie qui, au III[ème] siècle avant J. C., se proposa de mesurer la distance entre la Terre et le Soleil. Pour cela, il profita du fait que, dans les quarts lunaires, le Soleil, la Terre, et la Lune se trouvent aux sommets d'un triangle rectangle avec la Lune au sommet de l'angle droit, telle que le segment Terre-Lune soit le plus petit côté et le segment Terre-Soleil l'hypoténuse. Aristarque mesura dans cette position l'angle Soleil-Terre-Lune (avec pour sommet la Terre), obtenant une valeur de 87° (cet angle est en réalité de 89°50'). Ensuite il observa un triangle rectangle tel que l'un de ses angles aigus mesure 87°, semblable au précédent, vérifiant que l'hypoténuse est vingt fois plus grande que le plus petit coté, et c'est pourquoi, étant donné que les triangles semblables ont leurs cotés proportionnels, Aristarque conclut que la distance Terre-Soleil est vingt fois plus grande que la distance Terre-Lune (en réalité, elle est 370 fois plus grande). De plus, il observa que les mesures apparentes du Soleil et de la Lune sont approximativement égales, donc, si le Soleil est beaucoup plus loin que la Lune, il doit être beaucoup plus grand que celle-ci, et même plus grand que la Terre (il avait obtenu le rapport entre les mesures de la Terre et de la Lune grâce à d'autres considérations astronomiques ; peut-être en observant l'ombre de la Terre sur la Lune pendant une éclipse). Dans ces conditions, Aristarque pensa qu'il n'était pas raisonnable de supposer qu'un si grand Soleil tourne autour de la Terre plus petite que lui. Ainsi jaillit le premier modèle héliocentrique de l'Univers.

Dans ce qui précède, nous pouvons distinguer, d'une part, un changement dans la conception cosmologique de l'Univers ; d'autre part, un recours aux figures géométriques, à la similitude, aux proportions... Mais, qu'y a-t-il au milieu ? Au milieu, on trouve la mesure d'un angle, un seul angle qui, avec la géométrie, permit de changer la Cosmologie ; et, évidemment, cet angle fut mesuré avec un certain *instrument.*

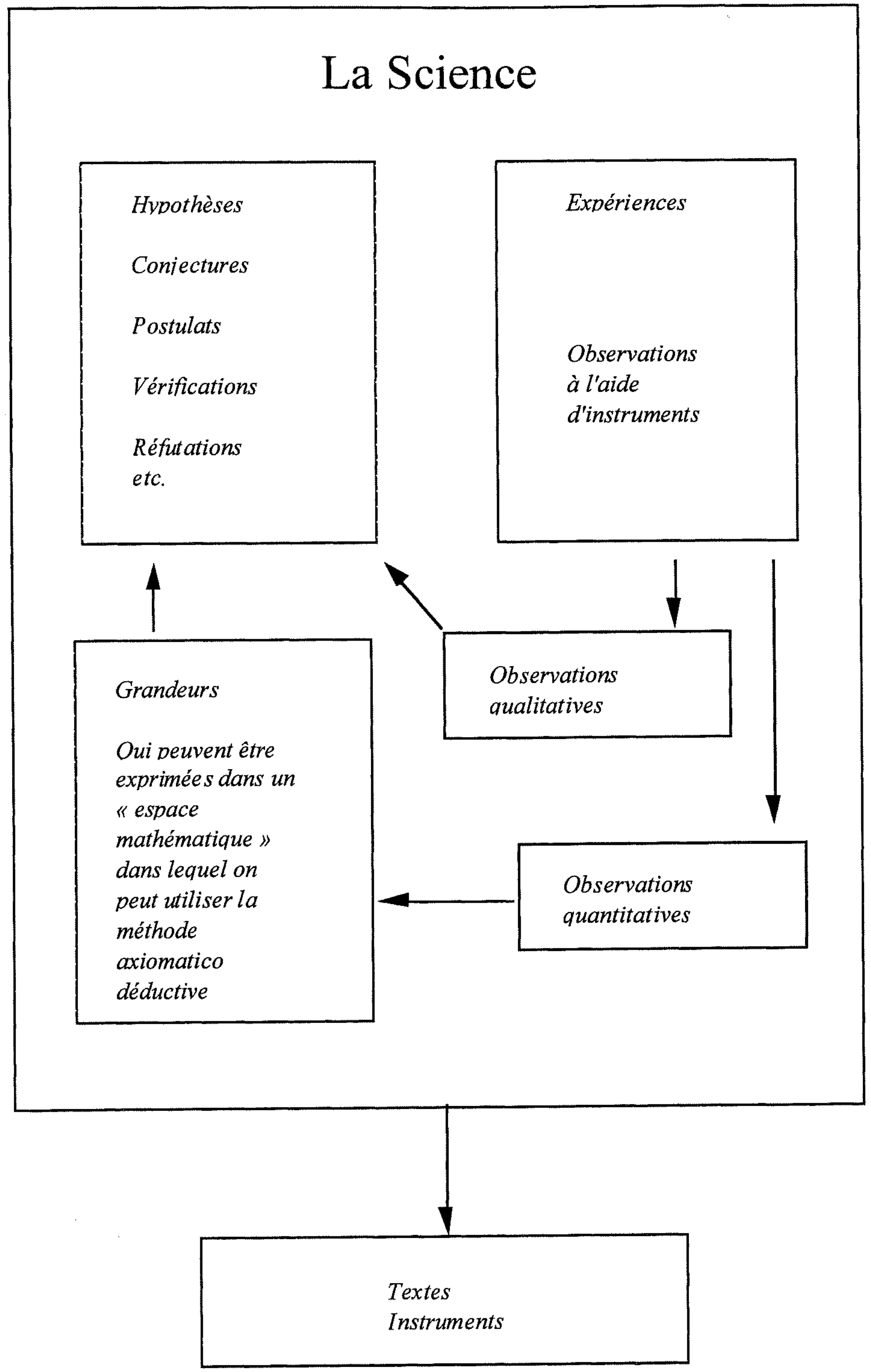
Par conséquent, une des façons possibles de parcourir l'Histoire des Sciences consiste à le faire à travers l'étude des *instruments scientifiques*. En effet, nous pouvons considérer la science comme un *organisme* dont le fonctionnement laisse, au cours du temps, une trace formée par deux *productions* fondamentales : les *textes écrits* et les *instruments*. Ces productions assez adaptées à leur *manipulation* et dont l'étude peut être menée de différents points de vue, ont de ce fait une grande applicabilité à la didactique. Le schéma de la page suivante que nous pouvons considérer, jusqu'à un certain point, comme trivial, prétend faire un résumé du fonctionnement du *système* scientifique.

En bref, ce schéma peut être interprété comme le fonctionnement d'un organisme, *La Science*, qui tout au long de l'Histoire laisse une traînée de *résidus exquis* grâce auxquels nous pourrons suivre sa *trajectoire vitale*.

Dans ce qui suit, nous nous limiterons à l'une de ces productions et à ses possibles applications didactiques : les instruments.

En premier lieu, nous voulons souligner que nous parlons d'instruments *au sens large*, c'est-à-dire, que nous considérons comme instrument un quelconque artifice capable de générer un certain type de connaissance ; ainsi, un accélérateur de particules est un instrument, mais un simple piquet planté dans le sol (un gnomon) ou une table numérique le sont aussi. De toutes façons, au vu de nos propos didactiques, un aspect que nous considérerons comme important est la *simplicité* ; ou mieux encore, la relation entre simplicité et quantité de connaissances produites.

En second lieu, on observe que les instruments peuvent être considérés comme un raffinement de nos sens, lesquels acquièrent par leur intermédiaire, une plus grande capacité de pénétration dans la Nature, augmentant notre pouvoir d'observation et facilitant les processus d'induction, l'établissement de conjectures, d'hypothèses, etc., et, fondamentalement, l'obtention de *mesures de grandeur* qui peuvent être représentées dans un *espace mathématique abstrait* dans lequel on peut appliquer les méthodes *axiomatico-déductives* propres à la Mathématique, ce qui nous permet, dans beaucoup de cas, de vérifier, de réfuter ou de changer les affirmations établies antérieurement. Ainsi, l'instrument se transforme en



une clef qui ferme (qui ouvre ?) ce cercle éternel qui consiste à faire et défaire (comme Pénélope) que nous appelons Science.

Cela dit, comment pouvons-nous matérialiser ces considérations dans le cadre de l'enseignement de l'Histoire des Sciences dans le Secondaire ? Pour répondre à cette question nous aurons recours, de nouveau, aux paroles de Galilée. Le Premier Jour du livre *Considérations et démonstrations mathématiques sur deux nouvelles sciences*, publié en 1638, Salviati (porte parole de l'Académie) dit, en direction de Sagredo et Simplicio :

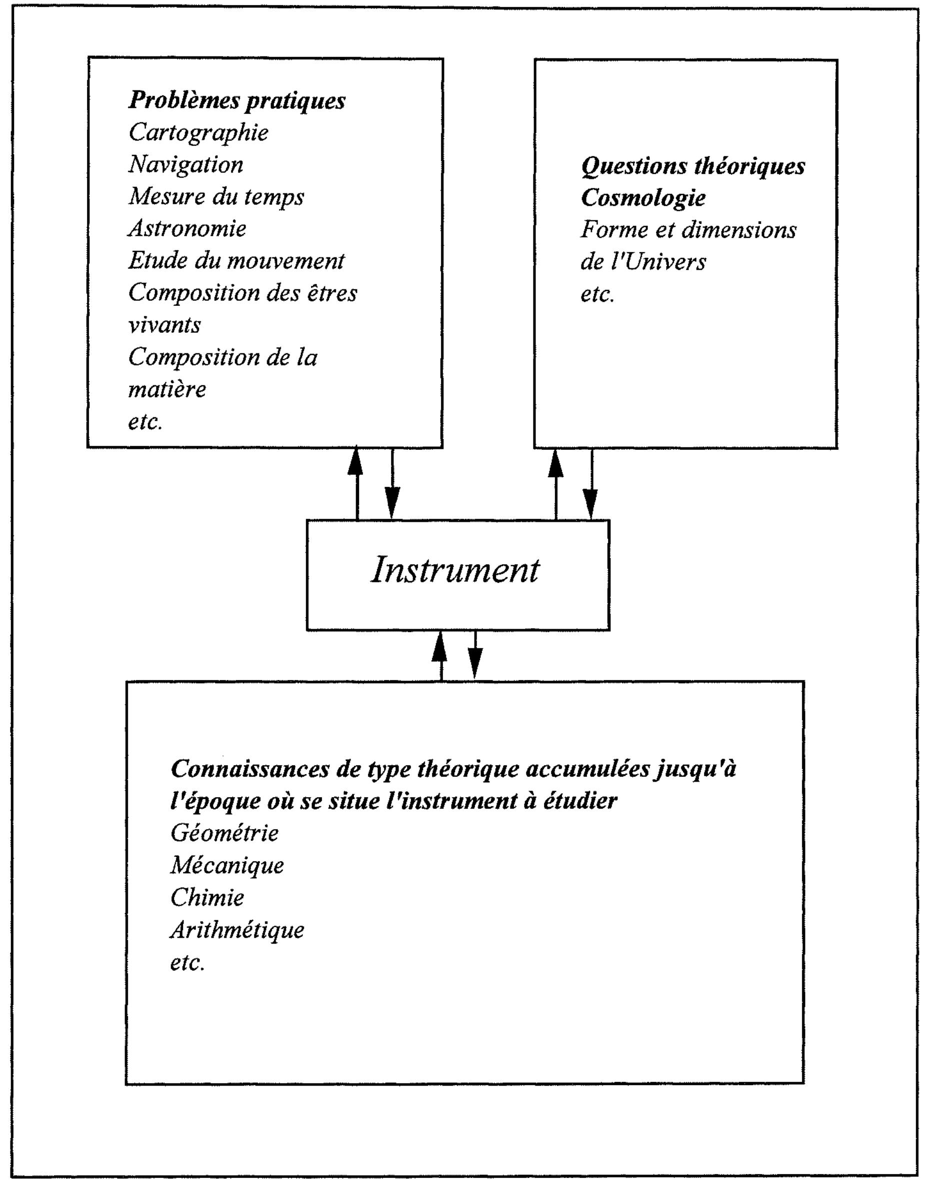
> *Quel large champ de réflexion me paraît ouvrir aux esprits spéculatifs la fréquentation assidue de votre fameux arsenal, seigneurs Vénitiens, et particulièrement le quartier des travaux mécaniques. Toutes sortes d'instruments et de machines y sont en effet constamment mis en œuvre par un grand nombre d'artisans dont certains, tant par les observations que leurs prédécesseurs leur ont léguées que par celles qu'ils font sans cesse eux-mêmes, allient nécessairement la plus grande habileté au jugement le plus pénétrant*[1].

Le sens de ce texte peut être interprété comme la reconnaissance, par Galilée, de ce que l'activité scientifique qui jaillit à la Renaissance est en relation avec l'abandon des préjugés élitistes grecs à l'encontre des arts pratiques, ainsi que la croissance de l'intérêt pour les problèmes mécaniques en liaison avec la production artisanale, ce qui fait émerger des théories scientifiques à partir des découvertes empiriques accumulées par la tradition des ateliers artisanaux. De la même manière, si nous voulons que nos élèves du Secondaire acquièrent des connaissances en Histoire des Sciences de façon significative, nous aussi devons abandonner nos *préjugés élitistes grecs* (et nous pourrions ajouter académiques) et essayer de rivaliser avec les artisans, en construisant, même sous forme simplifiée, quelqu'instrument duquel nous puissions tirer des connaissances *empiriques*.

C'est pourquoi, nous proposons d'essayer de construire la connaissance scientifique des élèves en parcourant cette trace d'instruments que la science a laissés au cours de l'histoire, nous arrêtant particulièrement sur quelques points choisis ; c'est-à-dire, nous arrêtant sur quelques instruments dont la relation entre la simplicité et la quantité de connaissances produites, évoquée précédemment, soit satisfaisante ; et, de plus, répartis tout au long de la période historique à étudier. Chacun de ces instruments sélectionnés sera la *connexion épistémologique* entre une question pratique déterminée, insérée dans une époque déterminée et avec tous les conditionnements politiques, économiques, religieux, cosmologiques, etc., qui lui sont inhérents d'une part et, d'autre part, quelque type de connaissance théorique comme la Géométrie, la Mécanique, la Chimie, etc. Ainsi, l'instrument se transforme en un noyau autour duquel se concentre l'activité didactique, laquelle pourra être abordée à partir de différentes disciplines, c'est-à-dire, d'une façon *interdisciplinaire* et dirigée vers une *diversité* d'élèves, puisqu'entrent en jeu des activités distinctes adaptables à différentes capacités intellectuelles : utilisation, construction, dessin, explication du fonctionnement, fondements théoriques, etc. Ces derniers propos peuvent être résumés dans le schéma suivant :

---

[1] Nous reprenons la traduction de Maurice Clavelin, Armand Colin, 1970, note trad.



On expose à la suite, quelques exemples de l'usage didactique d'instruments afin d'éclairer ce qui a été précédemment exposé.

2. Quelques façons d'envisager l'usage didactique des instruments

Dans leur application didactique, les instruments peuvent être considérés de multiples points de vue. Nous exposons ici quelques exemples sur diverses façons d'envisager leur usage en classe, que nous considérons spécialement intéressants.

Un instrument peut être considéré comme suit.

1. Un *générateur* de *nouvelles connaissances* sur le comportement de la Nature avec lesquelles nous pouvons résoudre des problèmes.

Supposons que nous étudions la science du XVII^{ème} siècle. L'un des thèmes les plus significatifs de cette époque est l'étude du mouvement des corps. En effet, pendant les XVI^{ème} et XVII^{ème} siècles sont remises en question les conceptions aristotéliciennes sur le mouvement et de nouvelles idées jaillissent à ce sujet comme, par exemple, la cristallisation de la Loi de l'Inertie ; ce qui conduit à de nouvelles façons de poser les problèmes, ce qui, avec l'irruption de la Mathématique comme langage de la Nature, assied les bases de la Science Moderne.

Nous pouvons rencontrer tout cela, entre autres, dans l'œuvre de Galilée qui, dans la troisième journée de son livre cité précédemment, *Considérations et démonstrations mathématiques sur deux nouvelles sciences*, établit des définitions de mouvement uniforme et uniformément accéléré qui correspondent à l'essence de ces deux types de mouvement. Cette correspondance, dit Galilée :

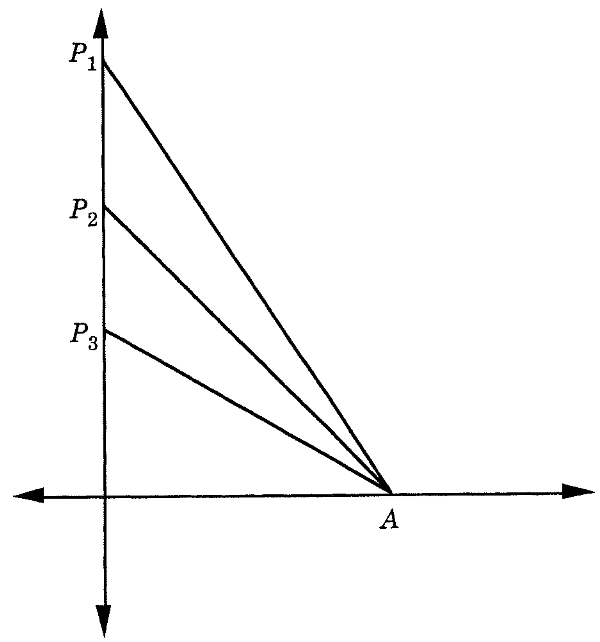
> *... nous croyons fermement, après de longs efforts, y être parvenu ; notre conviction s'appuie avant tout sur la correspondance et l'accord rigoureux qui semblent exister entre les propriétés que nous avons successivement démontrées, et les résultats de l'expérience. Enfin, dans cette étude du mouvement naturellement accéléré, nous avons été conduit, comme par la main en observant la règle que suit habituellement la nature dans toutes ses autres opérations où elle a coutume d'agir en employant les moyens les plus ordinaires, les plus simples, les plus faciles*[2].

Nous situons donc, dans ce contexte, l'exemple suivant, dont la finalité est d'illustrer l'usage des *instruments scientifiques* dans la construction de la connaissance et dans la résolution de problèmes, du point de vue de l'Histoire des Sciences.

Le problème

Si, des points P_1, P_2, P_3, on laisse tomber un corps jusqu'au point A, suivant des plans inclinés, lequel des trois trajets se fera en le temps le plus court ?

[2] Op. cité.



Pour résoudre ce problème, nous avons besoin d'une méthode pour mesurer ou comparer les temps que met un corps tombant le long de chacun des plans inclinés ; ce qui à l'époque ou nous sommes situés, représente un problème technique compliqué, sachant que la construction d'horloges précises n'est pas encore très développée.

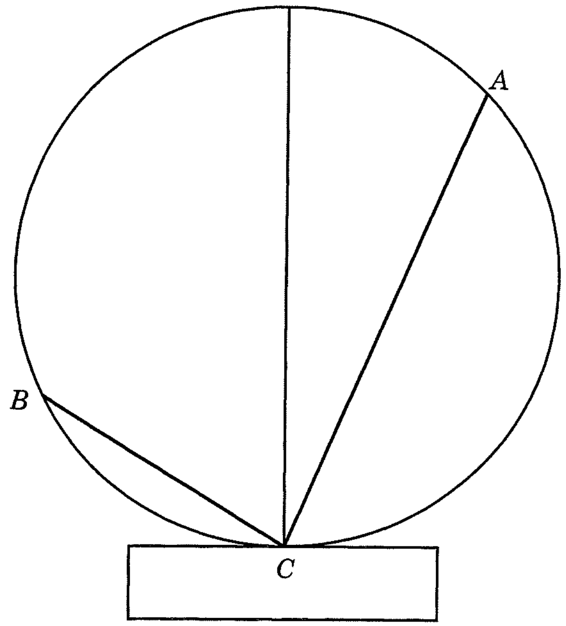
L'instrument

Nous considérerons une circonférence située dans un plan vertical en laquelle on a construit plusieurs (dans ce cas deux) plans inclinés formant des cordes qui concourent au point le plus bas d'un diamètre vertical, mais avec des inclinaisons différentes, et par lesquels on peut laisser tomber simultanément deux objets égaux ; comme, par exemple, deux boules de cristal (pour éviter, dans la mesure du possible, le frottement). On présente un schéma de l'instrument sur la figure de la page suivante.

Avec cet instrument, nous pouvons vérifier *empiriquement* que les temps de chute le long de toutes les cordes considérées sont égaux, c'est-à-dire que cet instrument *produit* de nouvelles connaissances :

> *Les temps de chute le long des cordes qui concourent au point le plus bas d'un diamètre vertical sont tous égaux,*

ou autrement dit, de telles cordes sont *tautochrones* (du grec : le même temps).



Les connaissances théoriques associées

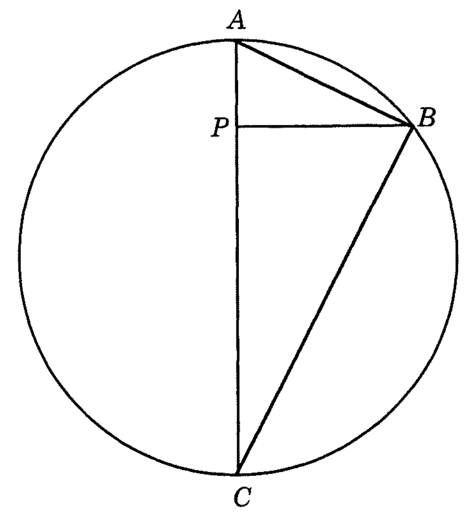
Mais, comme nous l'avons signalé dans le schéma, chaque instrument est associé à des fondements théoriques de type mécanique, géométrique, arithmétique, etc., accumulés au cours de l'histoire, jusqu'à l'époque dans laquelle nous nous situons. Dans le cas de notre instrument, nous pouvons *démontrer* la propriété obtenue empiriquement en utilisant les théorèmes 2 et 3 sur le mouvement naturellement accéléré contenus dans la troisième Journée de *Considérations et Démonstrations sur Deux Nouvelles Sciences* de Galilée et le *Théorème de la cathète* que nous pouvons trouver énoncé et démontré dans Les Éléments d'Euclide.

Théorème 2 : Si un mobile tombe, à partir du repos, avec un mouvement accéléré, les distances qu'il parcourt en un temps quelconque sont entre elles comme les carrés des temps.

Théorème 3 : Si deux mobiles identiques se déplacent, partant du repos, sur un plan incliné pour l'un, le long d'un plan vertical pour l'autre, les deux ayant la même hauteur, les temps de leurs mouvements seront entre eux comme les longueurs du plan incliné et de la verticale.

Théorème de la cathète : La cathète est moyenne proportionnelle entre l'hypoténuse et sa projection sur l'hypoténuse.

En utilisant les résultats précédents, nous pouvons réaliser la démonstration suivante :



Montrer que $t_A(AC) = t_B(BC)$.

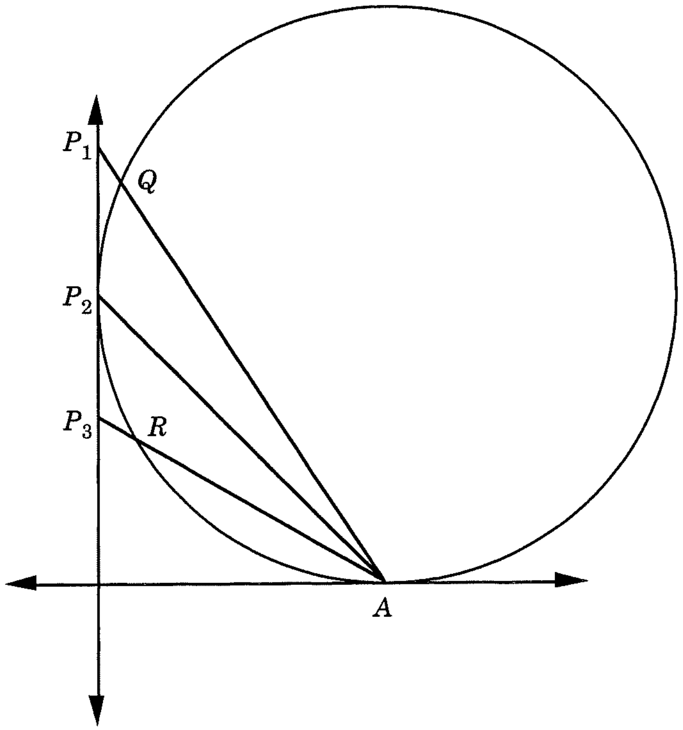
En effet, le théorème 3 permet d'écrire : $\dfrac{t_B(BC)}{t_P(PC)} = \dfrac{BC}{PC} = \dfrac{\sqrt{AC.PC}}{PC} = \sqrt{\dfrac{AC}{PC}}$ et le théorème 2 implique $\dfrac{t_A(AC)}{t_P(PC)} = \sqrt{\dfrac{AC}{PC}}$.

Ces égalités donnent $\dfrac{t_B(BC)}{t_P(PC)} = \dfrac{t_A(AC)}{t_P(PC)}$, d'où : $t_A(AC) = t_B(BC)$.

Pour terminer, nous utiliserons les *connaissances* acquises grâce à l'instrument étudié pour résoudre le problème que nous nous étions posé.

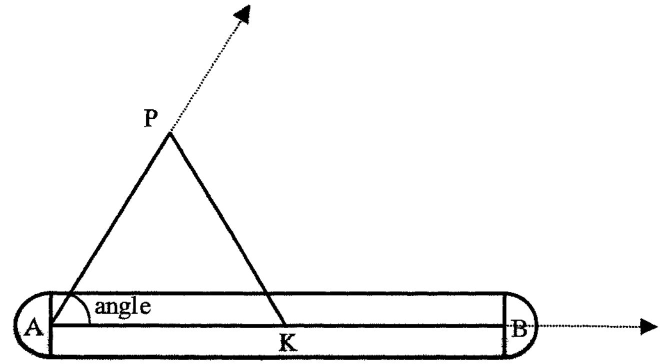
La solution du problème

Si nous tenons compte du résultat théorique obtenu grâce à l'instrument, nous observons que les temps que le mobile met pour tomber des points Q, P_2 et R jusqu'en A sont égaux, donc le temps mis de P_2 à A est le plus petit, puisque sur les autres plans inclinés le mobile doit parcourir une certaine distance supplémentaire (celle qui est extérieure à la circonférence), donc les temps seront plus grands. La figure suivante nous montre la situation.



2. Une *ressource didactique*, c'est-à-dire un objet autour duquel on peut organiser diverses activités en direction de *différents types d'élèves*. Autour d'un instrument peuvent se concevoir des activités allant de l'*artisanal* (utilisation d'outils pour sa construction) jusqu'à la *formalisation* la plus abstraite propre à la géométrie qui explique son fonctionnement, en passant par des activités *empiriques* (utilisation de l'instrument pour faire des observations et obtenir une information). Nous pouvons ainsi essayer de résoudre l'un des grands problèmes posé par les nouvelles lois en matière d'éducation, lesquelles visent à assurer l'accès à l'éducation de toute la population, indépendamment de ses conditions sociales, économiques, culturelles, etc., ce qui signifie, d'une part, un progrès quant à la justice sociale, mais, d'autre part, fait que les professeurs se trouvent en classe avec des élèves qui veulent accéder à des études universitaires, à coté d'autres qui ne savent pas ce qu'ils veulent devenir et d'autres qui ne veulent pas rester dans la classe ; il faut cependant proposer quelque chose à chacun d'entre eux. Nous pourrions donc commencer par proposer aux élèves qui ne veulent pas rester dans la classe, la construction d'un instrument, appelé *Règle de parallaxe,* comme celui de la figure de la page suivante.

L'instrument consiste en une règle AB de longueur s avec une rainure longitudinale dans laquelle glisse l'extrémité du segment PK de longueur $s/2$, lequel est articulé en P avec le segment AP, de la même longueur que PK et qui peut tourner autour du point A. Ainsi à chaque angle de sommet A correspond un segment de longueur AK, laquelle peut être utilisée pour mesurer indirectement le dit angle.



Une fois construit, il est tout à fait possible que nous arrivions à convaincre quelques-uns des élèves qui n'ont pas une idée claire de leur avenir d'essayer d'utiliser cet instrument pour mesurer des angles, après que ceux qui ont pour but d'atteindre un certain niveau de connaissances aient recherché les relations géométriques nécessaires pour pouvoir associer à chaque angle une longueur sur la règle. Ainsi, la construction de la connaissance parcourt un chemin qui va du travail manuel (l'artisanat) jusqu'à certains niveaux d'abstraction, en passant par l'acquisition de données sur ce qui nous entoure en utilisant des instruments (la connaissance empirique).

3. Un *réservoir de connaissances*, ou ce qui revient au même, un livre dans lequel est écrite l'Histoire des Sciences. Etudier la science signifie étudier son histoire, sa genèse ; et, pour cela, il faut lire dans ces livres ; c'est pourquoi nous devons connaître le langage dans lequel ils sont écrits : la *géométrie.*

Un bon exemple pour illustrer ceci peut être le suivant.

L'astrolabe

Il est probable que l'astronomie ait fait son apparition lorsque quelqu'un combina l'observation du ciel avec la *mémoire*. Si nous observons le ciel, nous verrons au bout d'un moment que les astres ont changé de position, c'est-à-dire nous vérifions qu'il y a *mouvement* dans le ciel. En répétant l'observation et en mémorisant les positions antérieures des différents astres jaillit l'idée de la *trajectoire* et naît la *géométrie du cosmos*, qui se transformera plus tard en Géométrie simplement.

Mais quelque chose qui se meut spontanément n'est pas *parfait*, vu que s'il bouge, cela signifie qu'il n'occupe pas le lieu qui lui correspond dans un *cosmos ordonné*. Ceci veut-il dire que le cosmos n'est pas parfait ? Pour répondre à cette question, observons et mémorisons, c'est-à-dire, faisons de la géométrie.

Ainsi naît une trajectoire qui conditionnera pour toujours la géométrie du cosmos : la circonférence (la roue ?). Pour une quelconque autre figure géométrique, si nous la faisons tourner d'un certain angle, ses points abandonneront la figure initiale ; cependant, si nous faisons tourner une circonférence autour de son centre, ses points resteront toujours à l'intérieur d'elle-même, c'est-à-dire qu'elle est *immuable* (globalement invariante) ou, autrement dit, qu'elle est *fermée* quant au mouvement de rotation autour de son centre. En conséquence, l'unique mouvement naturel possible dans un cosmos ordonné et immuable est celui qui suit une trajectoire circulaire, ce qui fit que le cercle et son extension à l'espace tridimensionnel, la sphère, s'instaurèrent comme les figures géométriques de base pour la construction de modèles explicatifs du cosmos.

Apparaissent ainsi les théories de l'Antiquité qui vont de Eudoxe de Cnide (IV$^{\text{ème}}$ siècle avant J.C.), créateur du premier modèle connu qui utilisait des sphères concentriques pour l'explication du mouvement des astres, jusqu'à Ptolémée (II$^{\text{ème}}$ siècle après J.C.), lequel fut capable de projeter la sphère céleste sur un cercle, ce qui permit la construction d'instruments dont la géométrie circulaire reproduit le *fonctionnement* du cosmos : l'astrolabe, l'astrolabe nocturne, etc.

Ces théories développées dans le monde hellénique, jointes aux apports des cultures orientales, ainsi que les techniques de construction d'instruments, furent assimilées et perfectionnées par les arabes et diffusées dans l'Europe Occidentale durant le Moyen Age.

Enfin, nous pouvons observer que les différents *signes* qui apparaissent sur les cercles qui constituent un astrolabe sont les *traces* laissées par les apports faits à l'astronomie au cours des siècles, de telle sorte que comprendre sa signification (comprendre son fonctionnement) signifie comprendre l'histoire de l'astronomie, ou ce qui revient au même, comprendre la genèse de la connaissance astronomique. Et il est évident que ces signes sont écrits en langage géométrique sur des livres circulaires que nous appelons astrolabe, astrolabe nocturne,...

4. La *connexion* entre un *problème pratique* ou *théorique* qui se pose dans une société à une époque déterminée sous des conditions économiques, politiques, culturelles, religieuses, etc. ; et une *théorie scientifique*, *mathématique*, etc. plus ou moins abstraite.

L'étude de cet aspect des instruments nous permet d'effectuer des travaux de type *interdisciplinaire* dans lesquels entrent en jeu des matières en relation avec toutes les branches de la connaissance.

L'horloge de Christian Huygens

L'un des problèmes fondamentaux que la navigation dut affronter à l'époque Moderne fut la détermination exacte de la position des navires en mer. Au XVI$^{\text{ème}}$ siècle, le problème de la détermination de la latitude était déjà bien résolu grâce à l'observation de la hauteur apparente des astres aux différents points du globe terrestre ; il n'en allait pas de même avec celui de la longitude. L'importance de ce problème était telle, étant données ses implications économiques, politiques, géographiques, etc., qu'il se transforma durant trois siècles en objet permanent de recherche et en un véritable défi pour la science de l'époque.

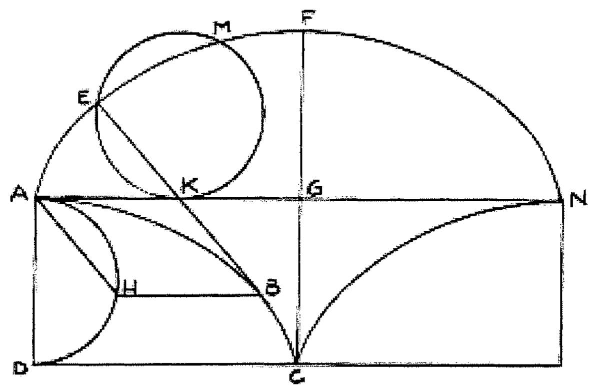
Depuis le XVI$^{\text{ème}}$ siècle, les monarchies européennes s'intéressèrent à la solution de ce problème et provoquèrent des concours internationaux, dotés d'importants prix, pour sa résolution définitive ; de plus, on créa des comités officiels pour discuter des méthodes disponibles.

Les premiers essais de solution surgirent de l'Astronomie. En effet, l'observation d'événements astronomiques lorsqu'elle se faisait simultanément en des lieux différents permettait d'établir facilement la position. Ainsi apparurent les méthodes, basées sur l'observation des éclipses du Soleil et de la Lune, des satellites de Jupiter et, particulièrement, des distances lunaires.

Le rare profit de ces méthodes, joint aux difficultés de calcul pour l'élaboration de tables, fit que l'attention se dirigea vers l'utilisation d'horloges qui permettraient de comparer l'heure du port d'origine avec celle du bateau, permettant d'en déduire la différence de longitude.

On doit l'un des essais de solution à Christian Huyghens, qui, dans le livre *Horologium oscillatorium*, publié en 1673, décrit, entre autres choses, la construction d'une horloge à pendule basée sur les propriétés de la courbe cycloïde, qui fonctionnerait sur un bateau, indépendamment des mouvements de celui-ci dûs aux vagues. C'est là une proposition de grande *beauté géométrique* étant données les étonnantes propriétés de la dite courbe.

Les connaissances théoriques associées à ces instruments sont fondamentalement ses propriétés mécaniques, la *brachystochronie* et la *tautochronie*, et leurs propriétés géométriques, que nous pouvons rencontrer dans l'œuvre d'Huyghens déjà citée : *Horologium Oscillatorium*. Ces propriétés peuvent être vérifiées empiriquement avec les instruments mentionnés plus haut et *démontrées* en utilisant la Géométrie Euclidienne et les résultats sur le mouvement de la chute des corps obtenus par Galilée.



Bibliographie

Clavelin Maurice (1995) *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles* (Galilée), Introduction, traduction et notes de Maurice Clavelin, nouvelle édition, Epiméthée, Essais Philosophiques, Presses Universitaires de France.

Cortés Albácar Martín (1551) *Breve compendio de la esfera y del arte de navegar*, Edition facsimilé, Editora Naval - Museo Naval, Madrid, 1990.

Galileo Galilei (1638) *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, édition préparée par C. Solís et J. Sádaba, editora nacional, 1981.

Galileo Galilei (1630) *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del Mundo ptolemaico y copernicano*, édition préparée par Antonio Beltrán Martí, alianza editorial, 1994.

Huygens Christian (1673) *Horologium Oscillatorium sive de motu pendulorum*, L'horloge oscillante, traduction de Jean Peyroux, édité par le traducteur, Bordeaux, 1980.

North John D. *Máquinas de Cómputo. El astrolabio*, TEMAS 4 – Investigación y Ciencia.

Ruiz Pedro (1575) *Libro de relojes Solares*, édition facsimilé, Fondos de la Biblioteca del Senado, Madrid.

Sellés Manuel (1994) *Instrumentos de navegación. Del Mediterráneo al Pacífico*, Lunwerg Editores S.A. (Ministerio de E. Y. C.).