Il observe encore que :

$$1 \times 2 + 2 \times \frac{1}{2} = 3$$

ce qui lui donne cette fois un ensemble de trois oiseaux (une colombe et deux moineaux) pour trois deniers.

En considérant une combinaison linéaire convenable des deux relations qui précèdent, il obtiendra alors trente oiseaux pour trente deniers. Cette combinaison linéaire consiste à prendre trois fois le premier ensemble de volatiles et cinq fois le second.

Bibliographie

[Bal93] Ballieu M. (1993) Le liber abbaci de Léonard de Pise : ce qu'on y trouve effectivement..., *Académie Royale des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique, Comité National de Logique, d'Histoire et de Philosophie des Sciences, Colloque National*, 15-16/10/92, p. 123-134, éd. Robert Halleux & Anne-Catherine Bernès, Bruxelles.

[BM89] Boyer C.B., Merzbach U.C. (1989) *A History of Mathematics*, John Wiley and Sons, Inc.

[Cap90] Cappelli A. (1990) *Lexicon Abbreviaturarum, Dizionario di Abbreviature latine ed italiane*, Ulrico Hoepli, Milano, sesta edizione.

[FibI72] Fibonacci Leonardo Pisano (1228) *Liber abbaci*, Manuscrit I72 SUP, Biblioteca Ambrosiana, Milano.

[FibCS2616] Fibonacci Leonardo Pisano (1228) *Liber abbaci*, Manuscrit Conversi Soppressi C.1. n° 2616 codice Magliabechiano, Badia Fiorentina, Biblioteca Nazionale, Firenze.

[FibCGR] Fibonacci Leonardo Pisano (1228) *Liber abbaci*, Codici Gaddiani Reliqui n° XXXVI, Biblioteca Laurenziana, Firenze.

[FibCR783] Fibonacci Leonardo Pisano (1228) *Liber abbaci*, Codice Riccardiano n° 783, Biblioteca Riccardiana, Firenze.

[KCL99] Kangshen S., Crossley J.N., Lun A.W.-C. (1999) *The Nine Chapters on the Mathematical Art, Companion & Commentary*, Oxford University Press

[LOR50] Loria G. (1950) *Storia delle matematiche dall'alba della civiltà al tramonto del secolo XIX*, Ulrico Hoepli, Milano.

[LUN93] Lüneburg H. (1993) *Leonardi Pisani Liber Abbaci oder Lesevergnügen eines Mathematikers*, Bibliographisches Institut Wissenschaftsverlag, Mannheim.

PHYSIQUE, MATHÉMATIQUE ET MÉTAPHYSIQUE OU QUE SERAIT CENDRILLON SANS SES DEUX SŒURS ?

Maryvonne Menez-Hallez

avec la collaboration de **Marie-Françoise Jozeau**

Groupe M :A.T.H. IREM Paris VII

Introduction

Un parcours collège-lycée d'Aristote à Gilles Chatelet, d'Héraclite à Newton en passant par Einstein a été proposé dans lequel le point et le mobile ont été mis en question ; des textes courts distribués aux élèves ont été commentés durant l'exposé : textes de Héraclite, Aristote, Nicole Oresme, Galilée, Newton, Hegel, Einstein, Gilles Chatelet[1]. Ce parcours comporte des détours, des autoroutes, des passages sur abîmes ; il est particulier mais d'un particulier qui veut rejoindre l'universel.

La méthode choisie est une méthode historique inspirée de la pensée de Pierre-Jean Labarrière, philosophe contemporain, spécialiste de Hegel dans le but de faire vivre

ce qui du passé demeure signifiant pour l'engendrement du présent et de l'avenir

et ainsi, toujours en suivant son analyse du procès de la mémoire collective, faire émerger

le sens d'un événement, le mouvement qui l'anime, la charge d'avenir *dont il se trouve porteur,*

en l'explorant

dans sa dimension d'avènement, en le replaçant dans son contexte d'histoire.

[1] Tous les textes cités ont été lus avec des élèves.

Le style privilégié est celui de la narration : les deux dimensions évoquées ci-dessus s'articulent en utilisant *au sein même de la spéculation la dimension de la narrativité* [2]. Cette dimension est *omniprésente en notre culture, depuis l'art des conteurs.* La mise en scène *est la voie obligée de toute discursivité, qu'elle soit d'ordre historique ou fictionnel* [3] mais aussi pédagogique.

Le fil conducteur est une reconstruction des charnières d'articulation des idées émises par Gilles Chatelet dans son livre *Les enjeux du mobile.* Ce livre, essentiel à notre avis, est préfacé par Jean-Toussaint Desanti[4] qui commence par ces mots : *Voir vivre ce que l'on aime ; c'est peut-être bien là le bonheur*, phrase que l'on peut certes appliquer à bien d'autres joies que celles procurées par les mathématiques mais qu'il nous est doux d'entendre à propos d'icelles.

Dans cette reconstruction didactique, nous allons suivre l'analogie que propose Chatelet entre le tryptique Cendrillon et ses deux sœurs et le tryptique Mathématique, Physique, Philosophie, sous-titre *des enjeux.*

Nous avons, toutes et tous ou presque, une ou des histoires de Cendrillon en tête, suivant la forme du conte choisie. Cendrillon a 4000 ans d'histoire, de 2000 ans avant J.-C. jusqu'à nos jours, en passant par Strabon, la Chine et l'Afrique. Nous pouvons proposer une ou des réponses à la question :

Cendrillon a-t-elle besoin de ses deux sœurs ?

Voici deux épilogues bien différents : les deux sœurs rendues aveugles par les oiseaux qui ont aidé Cendrillon, ou les deux sœurs accueillies et mariées par Cendrillon dans son palais. Chacune, chacun pourra choisir une des deux ou en construire d'autres après la lecture de ce texte.

L'entrée en scène de Cendrillon par Gilles Chatelet se fait par un monologue à l'antique où la philosophie est le héros et qui commence ainsi :

> *Triste destin de la philosophie ; elle qui tenait autrefois le haut du pavé se trouve désormais réduite au rôle de Cendrillon commise au* vérificatoire *et à ses palpitants problèmes de bon sens !*

Du statut de reine de toutes les disciplines proclamée par Platon, la philosophie a été reléguée par certains au statut de servante des mathématiques. La primauté donnée au calcul a pu la rendre parfois dévouée, aimant *réconcilier technique et humanisme* et ainsi *initier le public* cultivé *à certains résultats spectaculaires, mais censés être trop abstraits et heurter de front le bon sens*, attitude que Chatelet qualifie de *scientifico-caritative*. D'autres, toujours d'après lui, lui font assumer d'autres fonctions serviles comme celles

> *d'anesthésie et d'orthopédie, en montrant que la science peut très bien malgré ses turbulences, être apprivoisée dans le grand jardin des catégories philosophiques. Le public est alors convié à un jeu de pigeon-vole : Devinez qui est là ? Qui est de retour ? Tiens ! Voici la nouvelle figure de la Substance. Approchez par là...Tout le monde reconnaîtra le Transcendantal terrassant l'hydre à neuf têtes de l'Empirie... Et par ici la Dialectique un peu ébréchée...*

---

[2] [LAB 92] p. 74.

[3] Op.cit. p. 75.

[4] Auteur de *Les idéalités mathématiques, la philosophie silencieuse, introduction à la phénoménologie...*

Chatelet critique ici certains réalistes et pragmatistes.

Mais Cendrillon n'est pas destinée à rester servante toute sa vie et le but de Gilles Chatelet est de faire vivre l'essence révolutionnaire de la métaphysique avec la foi qu'il reste en l'homme

> *un désir confus de renouer charnellement avec ce qui est perçu comme une totalité mutilée par la dispersion technique* et de revisiter *toutes ces expériences de pensées, ces figures et ces diagrammes, toutes ces dynasties de problèmes capables, semble-t-il du* miracle *de la réactivation. Cette réactivation ... ne se réduit nullement au transfert dans un récepteur d'une forme déjà proposée dans un quelconque émetteur. Elle échappe aux clichés de la vulgarisation et des reportages scientifiques.*

Chatelet met là explicitement en cause l'enseignement traditionnel et propose que les intelligences des apprenants

> *s'exercent précisément aux points sensibles, mais aveugles, de l'entendement, aux charnières-horizons où se déploient les systématicités naissantes, en tous ces lieux où l'orientation ne s'obtient pas à titre gracieux et où le vrai ne se laisse pas saisir comme le vérifiable !*

Et c'est cette voie que nous tentons de suivre. Il cite, à ce propos du mystère, du miracle de la réactivation, les propos du mathématicien André Weil :

> *Rien n'est plus fécond, tous les mathématiciens le savent, que ces obscures analogies, ces troubles reflets d'une théorie à une autre, ces furtives caresses, ces brouilleries inexplicables ; rien aussi ne donne plus de plaisir au chercheur. Un jour vient où l'illusion se dissipe ; le pressentiment se change en certitude ; les théories jumelles révèlent leur source commune avant de disparaître ; comme l'enseigne la Gita, on atteint à la connaissance et à l'indifférence en même temps. La métaphysique est devenue mathématique prête à former la matière d'un traité dont la beauté froide ne saurait plus émouvoir.*

Nous proposons dans de modestes proportions cette ambitieuse réactivation à nos élèves, utilisant pour cela des techniques comme le *débat scientifique*[5], *la narration de recherche*[6] et la lecture de textes[7], en reprenant la question de ces dynasties de problèmes dont parle Chatelet.

Ce livre comporte cinq chapitres ; dans chacun est mis en scène un thème, une histoire d'une notion *mathematico-physico-philosophique* où les trois sœurs, entre autres personnages jouent un rôle. Nous vous présentons aujourd'hui le deuxième chapitre qui traite du mouvement et qui est intitulé *La toile, le spectre et le pendule*, autre tryptique du livre, chapitre sous-titré *Horizons d'accélération et de ralentissement.*

Chatelet revendique l'utilisation de ce mot tryptique :

> *Nous préférons le terme* tryptique *à celui de* triplet*. Le* triplet *appartient au vocabulaire technique de la théorie des ensembles : c'est une collection* ordonnée *à trois éléments. Le* triplet *ne renvoie qu'implicitement à une démarche d'orientation, qu'il*

---

[5] Cf. M. Legrand (1990) Revue de didactique des mathématiques, La pensée sauvage.

[6] Cf. Repères n°12 (juillet 1993), n°30 (janvier 1998), n°39 (avril 2000) et A. Chevalier et M. Sauter dans Actes des 41èmes rencontres CIAEM 1989.

[7] Cf. publications du groupe M :A.T.H. IREM de Paris VII.

s'empresse d'étaler. Le tryptique *est un tableau à trois volets et implique explicitement des charnières. Parler du* tryptique *(amplitude, intensité, paramètre), c'est* l'articulation *et le caractère indivis, alors que le* triplet *ne fixe l'attention que sur la règle qui associe l'énoncé : A, puis B, puis C et le symbole (A, B, C).*

A sa suite, nous pensons que cette forme, engendrée par le nombre trois, impose, comme toute forme préexistant à ce que l'esprit cherche à attraper dans ses filets, des orientations et des émergences de sens particulières et nous oblige à une attention soutenue à ce que permettent les charnières, les liens qui soutiennent la pensée.

Le travail pluridisciplinaire a été accompli avec des élèves niveau 5ème et niveau 2nde. Les disciplines concernées furent les mathématiques, l'histoire, la physique et la philosophie[8]. Au cours de la présentation, nous commenterons le texte de Chatelet et utiliserons les travaux effectués par, et avec les élèves. Nous pouvons reformuler l'optique du travail avec une citation d'un livre-clef de l'histoire du mouvement *repartir des problèmes qui suscitèrent les théories et des concepts qui permirent leur formulation* [9], optique qui est aussi celle de la Commission Inter-Irem Epistémologie et Histoire des mathématiques.

1. Brève histoire de la pensée du mouvement

1.1 Le mouvement dans l'Antiquité[10]

Les études du mouvement qui nous sont parvenues sont surtout le fait de *philosophes*. La pensée du mouvement se heurte à ce qui pour beaucoup semble contradictoire : le mouvement empêche l'être d'être totalement être ; ou pour reprendre un verbe platonicien l'être participe du non-être. *Faire du mouvement une chose naturelle, en effet, c'est dire que l'être n'est pas totalement être et qu'il participe donc de son contraire, le non-être*[11]. On peut schématiser trois courants de pensée chez les Présocratiques.

a) Tout est mouvement. La loi de la nature est la contradiction.

Héraclite (500 ans avant J.C.) pourrait être le représentant de cette tendance :

La route, montante descendante Une et même[12] ;

Conflit est le père de tous les êtres[13] ;

En changeant, il est en repos[14].

On peut, en écho, citer Malebranche (XVIIème siècle) : *c'est par le mouvement que tout se fait le feu*[15] *n'a de force que par le mouvement de ses parties*, et aussi un historien des

[8] Participation ponctuelle d'un enseignant de philosophie.

[9] [CLA 91] p. 80.

[10] Nous mettrons en caractères gras les apparitions des trois sœurs.

[11] [BAL 85]

[12] [DUM 91] p. 74.

[13] ibid. p. 78.

[14] ibid. p. 85.

sciences auquel nous devons beaucoup, Canguilhem : *le mouvement est pour l'homme le seul signe auquel il reconnaisse pour tout vivant autre que lui-même la présence d'une sensibilité.*

b) L'être, seul, est.

Parménide (450 av. J.C.) pose une première pierre de la science grecque : *il ne reste plus à présent qu'un voie dont on puisse parler : c'est celle du* il est[16]. Aristote reprendra, en la figeant quelque peu, cette position de Parménide.

Hegel reprendra la présentation aristotélicienne de Parménide pour la critiquer et mettre en place le mouvement de sursumation de l'être et du non-être par le devenir :

> *Parménide tout d'abord avait énoncé la pensée simple de l'être pur comme l'absolu et comme unique vérité et, dans les fragments qui sont restés de lui, avec l'enthousiasme pur du penser qui se saisit pour la première fois dans son abstraction absolue : seul l'être est, et le néant n'est pas du tout. Le profond Héraclite, contre cette abstraction simple et unilatérale, fit ressortir le concept total et plus élevé du devenir, et dit : l'être est aussi peu que le néant, ou encore tout coule, ce qui veut dire que tout est devenir... le devenir implique que le néant ne demeure pas le néant, mais passe dans son contraire, l'être... Le devenir est l'unité de l'être et du néant ; non pas l'unité qui abstrait de l'être et du néant ; mais en tant qu'unité de l'être et du néant, il est cette unité déterminée, ou dans laquelle être aussi bien que néant est. Mais en tant qu'être et néant sont chacun dans l'unité avec son autre, il n'est pas. Ils sont donc dans cette unité, mais comme disparaissants, et seulement comme sursumés*[17].

c) Les atomes se meuvent dans le vide infini. L'être atome est soumis au mouvement. Cette position, celle de Démocrite (450 av. J.C.) par exemple, met en scène le vide qui sera tour à tour nié comme être ou redéfini.

Vint alors Aristote[18].

Du point de vue *philosophique*, comment celui-ci dit-il le changement *sans récuser les exigences de la pensée logique*[19] puisque A et non A sont en effet contradictoires par le fait même du langage ; doit-on suivre Parménide ou peut-on concilier être et non être ? Peut-on parler scientifiquement du mouvement ? Aristote répond en ces termes :

> *Le mouvement est l'entéléchie du mobile comme mobile* ou *Le mouvement est l'*acte *de ce qui est en puissance en tant que tel.*

Le mouvement devient ainsi le processus autorisant le passage de l'être en puissance, donc encore non-être à l'être en acte, étant entendu qu'un être peut être à la fois en acte et en puissance. Le changement, dont le mouvement est une catégorie, *n'est pas dans la forme mais dans le changé donc dans le mû, c'est-à-dire le mobile pris en acte*[20]. Il y a conjonction d'un moteur et d'un mobile. La théorie aristotélicienne du mouvement est d'autre part ancrée dans

[15] Le feu est l'élément premier d'Héraclite.

[16] ibid. p. 353.

[17] [HEG 72] p. 60-61-79.

[18] Les idées-force de la pensée d'Aristote furent l'objet d'exposés en classe dont sont tirées les idées émergentes. un enseignant de philo vint présenter Aristote à la classe.

[19] [BAL 85]

[20] [ARI 83] V 224 b 24.

une structure d'ordre a priori : le cosmos grec qui suppose l'immobilité de la terre. Le mouvement est ainsi *philosophiquement* défini.

Du côté *physique*, Aristote énonce des classifications, des théorèmes dont la durée de vie sera d'au moins quelques dix-sept siècles. Trois des catégories d'Aristote interviennent dans la classification des changements : selon le lieu, selon la qualité, selon la quantité.

Nous lûmes en classe les deux théorèmes, première tentative de *mathématisation* du mouvement.

1) Le premier sur la différence *physique* des milieux :

> *Soit un corps A transporté à travers B pendant le temps C, et à travers D, qui est plus subtil, pendant le temps E ; si B est égal à D en longueur, le temps sera proportionnel à la résistance du milieu.*

2) Le deuxième sur la différence des mobiles quant à une caractérisation *physique* :

> *Les corps dont la force est plus grande, soit en pesanteur, soit en légèreté, toutes choses égales d'ailleurs quant aux figures, traversent plus vite un espace égal et dans la proportion que les grandeurs ont entre elles.*

Principe *métaphysique*, induction *physique*, proportionnalité et discours démonstratif *mathématiques* sont ainsi sollicités par Aristote pour rendre compte du phénomène du mouvement.

1.2 Le mouvement au Moyen-Age

Jusqu'au XIV^{ème} siècle, la *physique* du mouvement évolue peu ; mais alors, tant au collège de Merton, en Angleterre, qu'à l'école de Paris, une réflexion importante s'amorce, prenant appui sur les textes de la tradition grecque dans laquelle l'étude du mouvement s'était imposée ; elle avait permis aux Grecs de *démontrer* la finitude du monde, elle va aider les scolastiques à répondre à cette question fondamentale :

> *Comment peut-on augmenter la vertu de charité d'une personne ?*

Est-ce par une addition de parties ? Une suite de bonnes actions à la Pascal ?

Les penseurs du Moyen-Age refuseront cette réponse : les qualités n'augmentent pas par addition de parties mais par une participation variable du sujet à la forme. Une nouvelle forme est acquise quand l'individu devient plus charitable. Les degrés exprimant l'intensité de la qualité sont irréductibles à des additions ou soustractions de type ordinaire. Et pour apporter une réponse à la question *métaphysique* comment doubler la charité d'un individu, on s'interroge sur la manière dont, en *physique*, la vitesse d'un mobile peut être doublée. Partant du fait que les mouvements sont plus ou moins rapides, on tente de trouver, soit du côté des causes, soit du côté des effets, les raisons de cette différence. Le problème central est d'abord le traitement quantitatif, donc *mathématique*, des qualités, objet de discussions sans fin qui courent le Moyen-Age : doit-on quantifier l'intensité (intentio et remissio, augmentation et diminution) à partir du degré zéro ou à partir du degré maximum ? Richard Swineshead, le Calculateur, celui qui, d'après Leibniz, *introduisit les mathématiques dans la philosophie scolastique* met fin à ces disputes par le raisonnement suivant :

> *Si la chaleur est deux fois plus intense, quatre fois plus intense, huit fois... elle sera deux fois plus proche, quatre fois plus proche... et ainsi jusqu'à l'infini, du degré maximum, la chaleur tendra vers l'infini avant la fin.*

En conclusion, il déclare que l'intensité (intentio et remissio) des qualités doit être mesuré dans tous les cas par la distance au degré zéro et non suivant les cas par rapport au degré zéro. Sa *démonstration* repose sur l'utilisation de ce que nous appelons la suite géométrique de raison 2 et reprend l'argumentation de Zénon tendant à réfuter le mouvement. Une fois mise en place l'origine de ce que nous appellerons repère, il peut avec les mathématiciens-philosophes du collège de Merton énoncer le théorème du degré moyen[21]. Mais on ne trouve dans les travaux du Moyen-Age aucune figuration. La vitesse n'est toujours pas quantifiée. Elle devient un objet quasi-*physique* quand, de ce théorème, Nicolas Oresme donne une figuration, *charnière* dans l'histoire de la mathématisation du mouvement. Notons que Oresme connaît bien le travail de ses collègues de Merton et s'en inspire.

2. Mathématisation du mouvement

2.1 Nicolas Oresme[22] et la mathématisation du mouvement

Lisons le texte d'Oresme distribué en classe présentant une proposition de figuration. Jusque-là, seules les grandeurs extensives : temps, distances, masses avaient fait l'objet de figurations

> *De la continuité de l'intensité. On se représente toute chose mesurable, à l'exception des nombres, comme une grandeur continue. Pour la mesure d'une telle chose, il faut donc se représenter des points, des droites ou des surfaces ou leurs propriétés. Car, selon le Philosophe, c'est en eux que se trouve originellement la mesure ou le rapport, tandis qu'on ne les reconnaît par similitude dans les autres choses qu'en s'y référant mentalement. Bien qu'il n'existe pas de points ou de lignes indivisibles, il faut les imaginer mathématiquement pour les mesures des choses et pour connaître leurs rapports. Toute intensité qui peut être acquise de façon successive doit donc être représentée par une ligne droite élevée perpendiculairement en un point de l'espace ou du sujet de la chose intensive, par exemple d'une qualité. Car, quel que soit le rapport qu'on trouve entre deux intensités de même espèce, un même rapport existe entre deux droites et vice-versa...*[23]

Ce que Oresme nous propose ici de travailler est l'imagination *mathématique*. Il nous enjoint de ne pas perdre de vue, du point de vue *philosophique*, que ce diagramme n'est qu'une représentation, et il insiste sur la différence essentielle entre le temps et l'espace, entre réalité et représentation.

[21] Cf. plus bas, pour la formulation et la démonstration de ce théorème par Oresme.

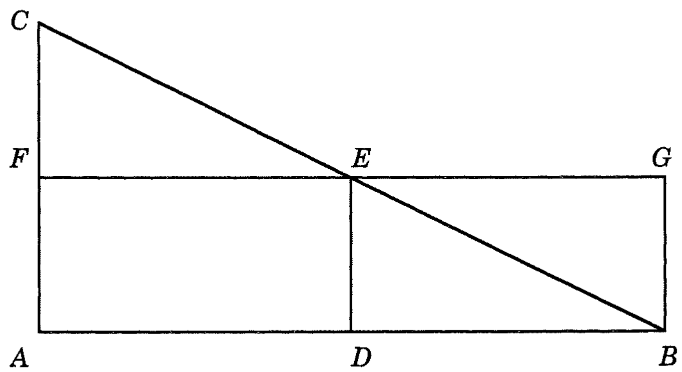
[22] Pour la biographie d'Oresme, voir annexe.

[23] [ORE 83]

Tractatus I.1 *Bien que le temps et la ligne droite soient incomparables qualitativement parlant, il n'existe cependant entre deux temps donnés aucune proportion qu'on ne trouve, par ailleurs, entre deux lignes et réciproquement... Cependant, la droite de l'intensité dont on vient de parler ne s'étend pas réellement en dehors du point ou du sujet, mais seulement dans la représentation.*

S'ensuit une démonstration *mathématique* du théorème du degré moyen pour des qualités quelconques.

Sur la mesure des qualités et des vitesses difformes



Toute qualité uniformément difforme est de même grandeur que la qualité du même sujet, ou d'un sujet égal, qui serait uniforme avec le degré du point médian du sujet donné ; cela, sous-entendu, si le sujet est linéaire. Si c'est une surface, ce serait avec le degré de la ligne médiane, et si c'est un solide, avec le degré de la surface médiane, les choses étant comprises de la même façon. On le montrera d'abord pour une qualité linéaire. Soit donc une qualité représentée par le triangle ABC, uniformément difforme se terminant avec un degré nul au point B. Soit D le point médian de la droite du sujet. Le degré ou l'intensité de ce point est représenté par la droite DE. La qualité qui serait uniforme sur tout le sujet avec le degré DE peut être représenté par le rectangle AFGB... Il est d'abord établi par la proposition 26 du livre I d'Euclide que les deux petits triangles EFC et EGB sont égaux. Donc les qualités ainsi représentables par ce triangle et par ce rectangle sont égales. Et c'est ce qui était proposé...

Et il cite la vitesse comme exemple de qualité :

On doit parler d'une vitesse tout à fait de la même façon que d'une qualité linéaire, en prenant à la place du point médian l'instant médian du temps qui mesure une vitesse de ce genre.

La représentation d'Oresme valide bien la règle de Merton College du degré moyen et permet de saisir plus rapidement et *parfaitement* par l'imagination les propriétés de la qualité étudiée, Oresme n'identifie encore nulle part explicitement quantité et espace parcouru, mais sa représentation induit cette relation.

Gilles Chatelet analyse l'apport de Nicolas Oresme, après avoir rappelé que :

Conformément à la tradition scolastique, il convient de bien distinguer dans le mouvement :

le point de vue extensif *: l'intervalle effectivement franchi, sa durée dans le temps ;*

le point de vue intensif *: celui qui concerne sa promenade ou sa lenteur (sa tardivité)*

Les diagrammes donnés par Oresme dans son De configuratione qualitatum *réussissent à créer une unité plastique capable d'intriquer les deux points de vue.*

La longueur ne s'obtient pas seulement en mettant bout à bout des étalons, ce serait une simple accumulation, mais se mobilise et rend manifeste qu'une dimension surgit, hétérogène au paramètre temps... Ces dispositifs, en conjuguant verticalité et horizontalité, ne se contentent pas de donner du ressort *à l'espace étendu, mais permettent de suivre des yeux l'acquisition progressive des degrés de vitesse et même d'obtenir immédiatement certains résultats non triviaux concernant les mouvements uniformément difformes*[24].

2.2 La physique galiléenne

Du côté *métaphysique*

Le monde est doté de toutes les dimensions, parfait, suprêmement bien ordonné, c'est-à-dire composé de parties disposées entre elles selon l'ordre le meilleur et le plus achevé, par nécessité de création divine.

Galilée pose le principe de raison suffisante : le passage d'un état à un autre se fait de la manière la plus facile, vers le plus proche ; il accorde une priorité explicitée de la raison sur le témoignage des sens, sans dénigrer celui-ci. Il ne s'attaque pas à toutes les qualités, mais à l'étude de cette qualité particulière qu'est la vitesse.

La physique galiléenne traite de cas abstraits ; les concepts de plan absolument lisse, de sphère absolument sphérique, de vide parfait ne se tirent pas de l'expérience, mais permettent de juger l'expérience au nom d'un idéal *mathématique* ; Galilée ne se penche pas sur l'explication *physique* du mouvement, ne cherche pas à identifier pourquoi le corps qui monte ralentit, pourquoi le corps qui descend accélère ; il identifie l'explication et l'essence *mathématique*. L'épistémologue Koyré attribue cette réflexion de Galilée à une influence *philosophique*, celle de Platon. C'est parce que Galilée était convaincu de ce qu'il lui fallait dépasser les phénomènes pour atteindre leur essence et parce qu'il croyait que seules les *mathématiques* peuvent exprimer cette essence qu'il a pu énoncer les lois de la chute des graves. Il reprend l'idée des scolastiques oxfordiens et parisiens d'assimiler la vitesse à une

[24] [CHA 93] p. 70-74.

grandeur intensive et reprend leur définition de la continuité : *un mouvement partant du repos et entreprenant un mouvement pour lequel il a une inclination naturelle passe par* tous les degrés de lenteur *entre un degré quelconque de vitesse et l'état de repos.*

Du côté *physique*

L'opposition du lourd et du léger qui commandait la théorie des mouvements naturels chez Aristote vient se dissoudre dans celle du dense et du rare telle que la notion de poids spécifique permet de le préciser.

Galilée contre le raisonnement d'Aristote.

Simp. Aristote, pour autant qu'il m'en souvienne, s'élève contre certains anciens qui introduisaient le vide à cause du mouvement, disant que celui-ci ne pourrait avoir lieu sans celui-là. S'opposant à cette thèse, Aristote démontre que tout au contraire la réalité du mouvement (et nous la constatons) rend le vide impossible. Développant son argumentation, il fait d'abord deux suppositions : la première concerne des mobiles de poids différents, se mouvant dans le même milieu, et la seconde un même mobile se mouvant dans différents milieux. Dans le premier cas, il admet que des mobiles de poids différents se meuvent dans le même milieu avec des vitesses inégales ayant entre elles mêmes proportions que les poids ; en sorte, par exemple, qu'un mobile dix fois plus lourd qu'un autre, descendra dix fois plus vite. Dans le second cas, il admet que les vitesses du même mobile dans différents milieux sont inversement proportionnelles à l'épaisseur ou densité de ces milieux ; si l'on prête ainsi à l'eau une densité dix fois supérieure à celle de l'air, il veut que dans l'air la vitesse soit dix fois plus rapide que dans l'eau[25].

Galilée, par les paroles de Salviati, impose un démenti à la thèse aristotélicienne.

Salv. On peut... prouver... à l'aide d'une démonstration brève et concluante, qu'un mobile plus pesant ne se meut pas plus rapidement qu'un mobile moins pesant, à condition que leur matière soit identique et qu'ils soient, en somme, semblables à ceux dont parle Aristote... si la plus petite tombait plus lentement, elle ralentirait la vitesse de la plus grande, si bien que liées ensemble, c'est-à-dire formant un corps plus pesant que la pierre la plus grande, elles se mouvraient moins vite... Nous en concluons donc que les mobiles grands et petits et possédant un même poids spécifique se meuvent avec une même vitesse.

Du côté *mathématique*

Galilée sépare la matière et le mouvement, la cause et le mouvement et énonce une série de théorèmes *physico-mathématiques* libérés de toute *métaphysique*.

Théorème 1 proposition 1

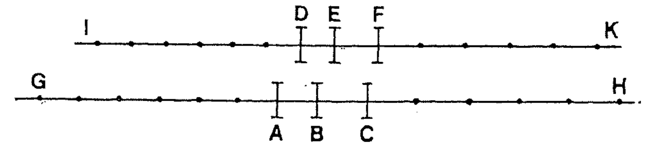
Si un mobile animé d'un mouvement uniforme parcourt, avec une même vitesse, deux distances, les temps des mouvements seront entre eux comme les distances parcourues.

$$t_1 / t_2 = x_1 / x_2$$

Soit en effet un mobile animé d'un mouvement uniforme et qui parcourt les deux distances AB, BC ; soit DE le temps du mouvement le long de AB et EF le temps le long de

[25] [GAL 70] p. 106-108.

BC ; je dis que le rapport de l'espace AB à l'espace BC sera aussi celui du temps DE au temps EF.



Galilée emploie le style euclidien et les démonstrations du livre V des Eléments ; l'homogénéité des grandeurs est bien respectée. Les temps et les distances sont représentées par des segments.

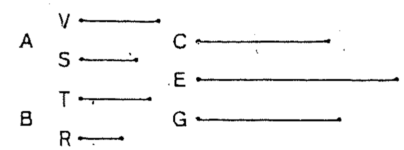
L'étape suivante de l'avancée de Galilée va introduire la quantification du rapport de deux vitesses et la représentation de ces vitesses par des droites.

Théorème VI Proposition VI

Si deux mobiles sont animés d'un mouvement uniforme, le rapport de leurs vitesses sera composé du rapport des espaces parcourus et du rapport inverse des temps.

Soient deux mobiles A et B, mus d'un mouvement uniforme ; les espaces qu'ils traversent ont le même rapport que V et T, mais les temps sont comme S est à R : je dis que le rapport de la vitesse du mobile A à la vitesse du mobile B est composé de l'espace V à l'espace T et du rapport du temps R au temps S.

$$v_1 / v_2 = x_1 / x_2 \times t_2 / t_1$$

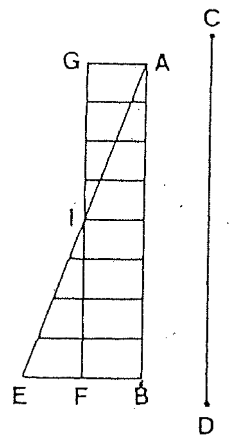


La troisième grandeur du mouvement après l'espace et le temps a reçu le même traitement de figuration.

Galilée ne cite pas Oresme, on ne sait ce qu'il en a lu. Il utilise pour le fameux théorème du degré moyen une configuration proche de celle d'Oresme où la vitesse, grandeur intensive, est représentée perpendiculairement à la grandeur extensive, le temps.

Théorème I

Le temps pendant lequel un espace quelconque est franchi par un mobile, partant du repos, avec un mouvement uniformément accéléré, est égal au temps pendant lequel le même espace serait franchi par le même mobile avec un mouvement uniforme, dont le degré de vitesse serait la moitié du plus grand et dernier degré de vitesse atteint au cours du mouvement uniformément accéléré.



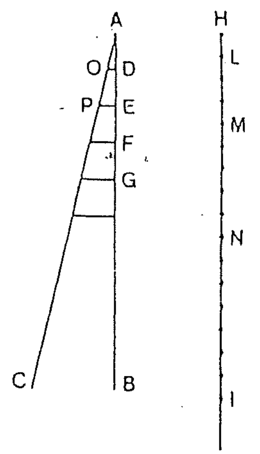
Le sujet d'Oresme est verticalisé en temps, les vitesses représentées à l'horizontale.

Dans la démonstration *mathématique*, Galilée se démarque d'Euclide en ce que, là, à la différence d'Oresme, il utilise ce qu'on appelle les indivisibles pour démontrer l'égalité des aires du rectangle et du triangle rectangle

Le diagramme d'Oresme a été une étape nécessaire, mais que l'on peut oublier, pour en tirer des lois fondamentales, et c'est ce que fait Galilée dans le :

Théorème II

Si un mobile, partant du repos, tombe avec un mouvement uniformément accéléré, les espaces parcourus sont entre eux en raison double des temps, c'est-à-dire comme les carrés de ces mêmes temps.



A la représentation aristotélicienne, pour qui le temps est une abstraction dérivée du mouvement, une autre représentation se fait jour dans laquelle le temps précède

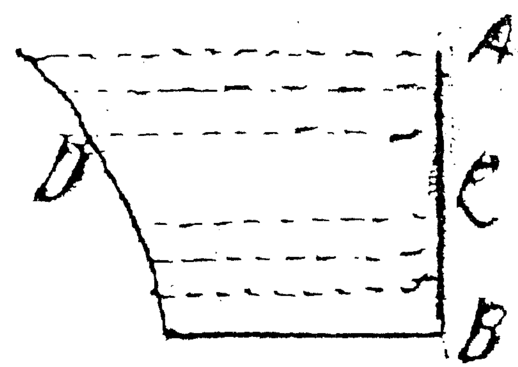
rationnellement le mouvement, grandeur continue dans la trame de laquelle le mouvement prend place et se développe[26].

Galilée joue sur les représentations *mathématiques* d'Euclide et d'Oresme. Des diagrammes d'Oresme à ceux de Galilée, la discrétisation du temps sera une expérience de pensée, une vision diagrammatique. Par le diagramme, on passe en acte du temps continu du sablier ou de la clepsydre au temps discret qui sera auditivement marqué par les tic-tac du pendule après l'invention *physique* de l'isochronisme des pendules. Par sa définition du mouvement uniforme, Galilée passe de la vitesse moyenne à l'idée de la vitesse instantanée par la division de l'intervalle et par la sommation des lignes, de la durée à l'instant, de Bergson à Bachelard. Cette idée de la vitesse instantanée nous conduit directement aux réflexions de Leibniz, autre charnière dans notre histoire.

2.3 L'apport de Leibniz

Leibniz reprend le diagramme dans le sens choisi par Galilée. Il généralise la représentation ; il ne parle plus de qualités, encore moins de mouvement, mais de séries, de dimensions **hétérogènes** :

Une application de plusieurs éléments d'une série dans plusieurs éléments d'une autre série, appliquée de façon ordonnée, est la quantité obtenue en associant à chacun des éléments qui sont dans une série un élément de l'autre[27].



Les traits horizontaux présentent ce que Leibniz appelle *l'appliquant* comme une famille de degrés appliquée en chaque point de la série discrète verticale.

Cette application d'une série dans une autre utilise une intrication de verticalité et d'horizontalité qui crée ce que Leibniz appelle un *amplum* et définit comme *un espace de déformation où des choses qui ne sont pas homogènes peuvent se déformer l'une dans l'autre par changement continu* et rend possible la coopération des dimensions. Leibniz précise : *les dimensions sont des quantités diverses, hétérogènes en principe, qui peuvent être comprises comme tracées l'une dans l'autre.*

[26] [CLA 91] p. 299.

[27] Leibniz *Initia rerum mathematicarum metaphysica*, Gerhardt, t. VII p. 19.

Dynamica de potentia, t. VI, p. 307-319.

Il a surmonté l'obstacle de l'hétérogénéité permettant de penser le d/v qui n'est pas pour autant neutralisé, mais on peut dire qu'il y a émergence d'une audace nouvelle. Il restera à Varignon à introduire le dx/dt *mathématique*.

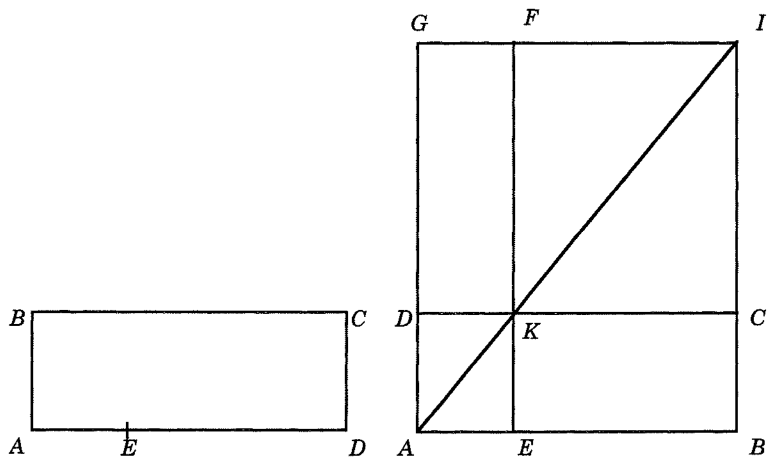
Ainsi du temps se transforme en espace et on passe de $x_1/x_2 = t_1/t_2$ comme nombre (de l'ordre du quantitatif) à $x_1/t_1 = x_2/t_2$ comme mesure ontologique (de l'ordre du qualitatif).

La vitesse est enfin devenue une grandeur *mathématique*.

3. Nicolas Oresme et un chemin vers la théorie de la relativité

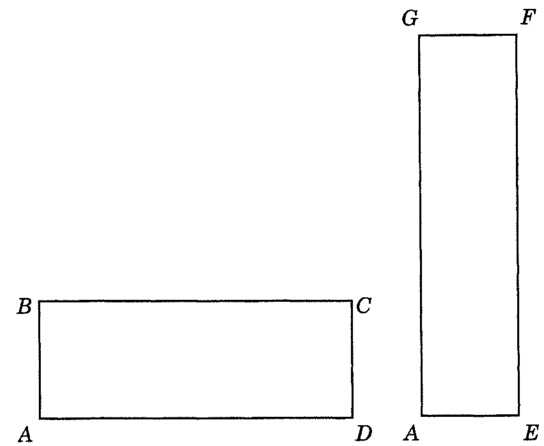
3.1 Réactivation du diagramme d'Oresme et une première expérience de pensée

Une autre réactivation des diagrammes d'Oresme est à envisager maintenant, qui est aussi une réactivation d'un diagramme *mathématique* euclidien mettant en scène le gnomon, étymologiquement source de connaissance. Soit ABCD un rectangle, construire sur [AE] un rectangle AEFG de même aire que ABCD.



Par E, on trace la parallèle à (CD) qui coupe [BC] en K. (AK) coupe (CD) en I ; par I, on trace la parallèle à (AD) qui coupe (EK) en F et (AB) en G. L'égalité des aires des rectangles EKCD et BKFG est l'objet de conjectures puis de démonstrations en 6ème et 5ème de collèges.

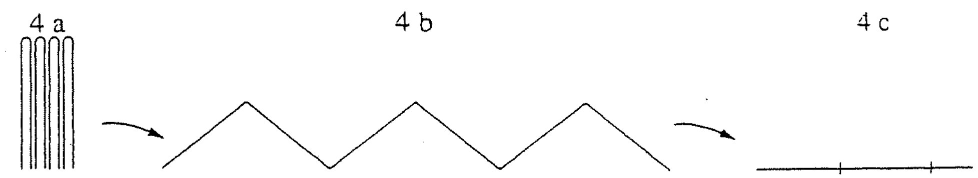
On peut ainsi construire une infinité de rectangles de même aire.



Considérons ABCD et AEFG comme des diagrammes d'Oresme représentant la même distance parcourue avec des vitesses différentes. Le fait de représenter une distance par une aire, autrement dit de représenter les variations de la grandeur vitesse en fonction de la grandeur temps, peut conduire à une relativisation de la notion de distance. Réalisez à la campagne une expérience de pensée contemplative sur la distance entre deux brins d'herbe avec l'image des diagrammes d'Oresme, cette distance parcourue à la vitesse de la lumière s'annule ! Gilles Chatelet nous invite à cette réactivation contemporaine en ce sens qu'elle intègre les expériences de pensée respectivement de Galilée et d'Einstein. Voici le commentaire de Chatelet :

> *Pas de longueur sans vitesse. Le degré 1 de vitesse (la mobilité absolue) saisit l'espace d'un coup d'œil ; l'espace se donne alors comme infiniment compressé, absolument vertical. Il peut se donner aussi complètement étendu, c'est le degré zéro de vitesse et il y a tout un continuum de degrés qui se déploient entre ce degré et la mobilité absolue.*[28]

Pour apprécier la plus ou moins grande perfection de la saisie de l'espace, Chatelet propose les diagrammes suivants donnant une image des degrés de vitesse de 1 à 0. Il met ainsi en œuvre l'idée-force du philosophe Gilbert Simondon[29] de la généalogie de techniques à propos de cette technique particulière qu'est la pensée diagrammatique.



[28] [CHA 93] p. 75.

[29] G. Simondon est un philosophe contemporain, auteur de *Du mode d'existence des objets techniques*, Aubier, 1969

Avec la proposition suivante de Paul Valéry, je vous invite à prolonger cette expérience de pensée :

La trajectoire d'un mobile est ligne qui joint des points qui ne coexistent pas.

Ainsi le point a_1 appartient à l'espace total A_1, le point a_2 à l'espace A_2.

Or on ne peut joindre un point de A_1 avec un point de A_2 puisque A_1 et A_2 contiennent chacun exclusivement tous les points...

Joindre deux points est impossible comme chez Zénon, vous croyez les joindre... L'erreur est constitutionnelle.[30]

Chatelet ajoute :

Le degré 1 des vitesses doit fonctionner comme horizon des diagrammes d'Oresme : c'est probablement l'intuition centrale de la relativité.

Il introduit la notion de spectre des vitesses et d'horizon de ce spectre.

Les vitesses ne doivent pas être ajoutées comme des règles mises bout à bout, mais doivent être saisies telles qu'un même sujet les déploierait en pensée pour inspecter un espace plus ou moins promptement. Il faut donc parler du spectre des vitesses et, dans ce spectre, le degré maximal (le degré 1 des vitesses) joue manifestement un rôle particulier.

L'effet de perspective peut retentir. La matière, en l'occurrence, le chemin de terre entre les deux brins d'herbe acquiert une plasticité, une élasticité dont rend compte Leibniz, cité par Chatelet en exergue de ce chapitre. Une certaine dialectique des plis de la matière et de la transformation du temps en espace et vice-versa peut s'envisager.

Philalète

L'entendement ne ressemble pas mal à un cabinet entièrement obscur, qui n'aurait que quelques petites ouvertures pour laisser entrer par dehors les images extérieures et visibles, de sorte que si ces images, venant à se peindre dans ce cabinet obscur, pouvaient y rester et y être placées en ordre, en sorte qu'on pût les trouver dans l'occasion, il y aurait une grande ressemblance entre ce cabinet et l'entendement humain.

Théophile

Pour rendre la ressemblance plus grande, il faudrait supposer que dans la chambre obscure, il y eût une toile pour recevoir les espèces, qui ne fût pas unie, mais diversifiée par des plis, représentant les connaissances innées ; que, de plus, cette toile ou membrane, étant tendue, eût une manière de ressort ou force d'agir, et même une action ou réaction accommodée tant aux plis passés qu'aux nouveaux venus des impressions des espèces. Et cette action consisterait en certaines vibrations ou oscillations, telles qu'on en voit dans une corde tendue quand on la touche, de sorte qu'elle rendrait une manière de son musical. Car non seulement nous recevons des images ou traces dans le cerveau, mais nous en formons encore des nouvelles, quand nous envisageons des idées complexes. Ainsi il faut que la toile qui représente notre cerveau soit active et élastique[31]*.*

[30] [VAL 74] p. 549.

Cette réflexion *philosophique* est continuée par Gilles Deleuze :

L'unité de matière est le pli, non pas le point qui n'est jamais une partie, mais une simple extrémité de la ligne[32]*.*

pli qui donne du ressort, de l'élasticité à la matière. L'audace d'une construction par plis initiée par Leibniz informera et orientera les spéculations d'Einstein.

3.2 Expérience de pensée de Galilée

La gymnastique de l'esprit qui consiste à adopter des points de vue différents est très enrichissante. Prenons maintenant une expérience de pensée *physique* de Galilée et considérons les deux points de vue suivants : celui de l'armateur resté à quai à Venise, celui du matelot embarqué avec les marchandises. Un nouveau principe d'ordre est à l'œuvre, celui de la relativité. Les faits pour l'armateur et le matelot ne sont pas les mêmes. Tout mouvement est relatif et ne peut être détecté sans référence à un point.

Le mouvement n'est rien d'autre que le déplacement d'une chose par rapport à une autre[33]*.*

Considérons d'autre part un navire qui descend le long d'un fleuve. Du haut du mât, un matelot laisse tomber une balle. Pour lui, la balle tombe d'un mouvement rectiligne et touche le sol au pied du mât. Que se passe-t-il pour un promeneur sur la rive du fleuve ? Le mouvement de la balle tel qu'il le perçoit n'est pas rectiligne. Le changement du système de références affecte le mouvement des objets observés. Avec Galilée, nous nous élançons avec les ailes de Léonard de Vinci et osons en physique laisser parler l'imagination. Cette audace que nous avons à provoquer chez nos élèves doit s'accompagner de passerelles de retour dans le monde *réel* ; on doit être capable d'atterrir sur la terre de la rationalité avec des procédés de conjectures et de réfutations. L'expérience de pensée de Galilée nous donne un élan vers l'expérience de pensée d'Einstein.

3.3 Expérience de pensée d'Einstein

Considérons une autre expérience de pensée physique. Imaginons-nous à la suite d'Einstein chevauchant un photon de lumière. Que voyons-nous ? Einstein s'est posé la question dès l'âge de 15 ans et ce serait le principe de relativité de Galilée qui lui aurait permis de répondre qu'il verrait son image dans le miroir tenu à bout de bras. Parce que si l'image disparaissait quand on se déplace à la vitesse de la lumière, on saurait que l'on se déplace à la vitesse de la lumière rien qu'en regardant le miroir. On n'aurait pas besoin de regarder dehors. Or ce serait contraire au principe de la relativité !

Parmi les clichés que véhiculait la mécanique classique, l'évidence de la solidité était certainement l'un des plus tenaces[34]*.*

[31] [LEI 66]

[32] [DEL 88] p. 9.

[33] Galilée, cité par [CLA 91] p. 225.

[34] [CHA 93] p. 95.

L'horizon des vitesses avec sa capacité élastique va être mis en scène par un nouveau personnage : Lorentz, avec sa fameuse contraction qui utilise une expression *mathématique* du rapport des longueurs suivant la vitesse de parcours.

Un observateur associe le nombre $1-v^2/c^2$ *à une règle passant devant lui à la vitesse v s'il sait déjà qu'elle est identique à une règle de longueur* 1 *posée immobile en face de lui*[35].

A vous d'inventer des péripéties des trois sœurs ; la haine et l'envie continuent à aveugler cycliquement *mathématiques* et *physique* entre autres, l'amour et la générosité à les enrichir et la *métaphysique* cherche et perd tout aussi cycliquement sa pantoufle de vair. Continuons à méditer sur les chemins qu'emprunte l'esprit humain dans son travail réflexif comme dans son travail créatif. Concluons provisoirement avec un texte de Chatelet qui n'a pas été lu avec des élèves :

Nous avons vu comment Einstein brisait le caractère inaccessible du degré 1 des vitesses. En reconnaissant la masse au repos comme un horizon par le truchement d'une vitesse infinie, *de Broglie renoue avec la tradition scolastique, qui posait un degré maximal (=1) et dégradait ensuite jusqu'à l'infini obscur (le degré zéro). Comme Einstein, de Broglie a bien compris toute la force élastique de l'horizon et sa capacité à déployer et à compresser à volonté. Le paysage de la physique est désormais bouleversé : la vitesse de la lumière n'est plus cette asymptote qui se dérobe à toute saisie matérielle et la masse au repos n'est plus naïvement palpable, rendue disponible, là, devant moi, par une intuition allant de soi. Einstein, en se juchant sur son photon, et de Broglie, en expédiant la masse au repos* infiniment loin, *ont osé deux expériences de pensée dont on ne saurait surestimer le retentissement*[36].

Affaire à suivre…

Bibliographie

[ARI 86] Aristote (1986) *Physique*, Belles lettres.

[BAL 85] Balibar F. (1985) Article mouvement, Encyclopedia Universalis.

[CHA 93] Chatelet G. (1993) *Les enjeux du mobile*, Seuil.

[CLAG 68] Claggett M. (1968) *Nicole Oresme and the medieval geometry of qualities and motions*, U. Wisconsin Press.

[CLAV 68] Clavelin M. (1968) *La philosophie naturelle de Galilée*, A. Colin.

[DEL 88] Deleuze G. (1988) *Le* pli, éd de Minuit.

[35] [CHA 93] p. 95.

[36] [CHA 93] p. 105.

[DUH 13] Duhem P. (1900-1913) *Etudes sur Léonard de Vinci*, tome 3.

[DUM 91] Dumont J.-P. (1991) *Les écoles présocratiques*, Folio Gallimard.

[GAL 70] Galilée G. (1970) *Discours concernant deux sciences nouvelles*, trad. M. Clavelin, A. Colin.

[HEG 72] Hegel G. W. F. (1972) *Science de la logique*, Aubier.

[LAB 92] Labarrière P. J. (1992) *L'utopie logique*, L'harmattan.

[LEI 66] (1966) *Nouveaux essais sur l'entendement humain*, Garnier-Flammarion.

[ORE 83] Oresme N. (1983) *Tractatus de configurationibus qualitatum et motuum*, traduit par P. Souffrin et J.P. Weiss dans Cahiers n°18 et n°19 du Séminaire d'histoire des sciences, Université de Nice.

[VAL 74] Valéry P. (1974) *Cahiers*, Pléiade Gallimard.

ANNEXE : Nicole Oresme (1323-1382)

La vie et la carrière

Natif d'un village aux environs de Caen, il étudie la théologie à Paris. Etant admis au Collège de Navarre (son nom figure sur une liste du 29/11/1348), on peut supposer qu'il est issu d'une famille modeste. En 1355-1356, il est grand-maître du collège ; il est donc sans doute docteur en théologie. Ce collège est subventionné par le pouvoir royal ; c'est ainsi qu'il entre en relation avec le futur Charles V, dont il a peut-être été le précepteur ?

De 1358 à 1361, il enseigne à l'université de Paris.

En 1360, le Dauphin l'envoie à Rouen négocier la contribution de la ville à la rançon de son père, Jean le Bon, prisonnier en Angleterre.

Nommé archidiacre de Bayeux en 1361, il renonce à ce titre.

En 1362, il est nommé Chanoine à la cathédrale de Rouen puis, l'année suivante, il devient Chanoine de la Sainte Chapelle. A la cour pontificale d'Avignon, auprès du pape Urbain V, il dénonce la politique centralisatrice de la papauté et abandonne le Collège.

De 1364 à 1377, il est Doyen de Rouen et séjourne entre Paris et Rouen.

A partir de 1370, il commence à traduire, à la demande de Charles V, une partie de l'œuvre d'Aristote.

Le 16 novembre 1377, il est nommé Evêque de Lisieux ; il y réside à partir de 1380 (mort du roi) et y meurt le 11 juillet 1382.

L'œuvre

Son œuvre très variée amène plusieurs questions.

Quel dynamisme intellectuel rend possible la concomitance de ses différents ouvrages ?

Quelle tension secrète de l'auteur à travers cette hétérogénéité ?

Mais, nous ne citerons ici que les ouvrages enrichissant notre propos.

Soulignons qu'il recourt au français dans son œuvre ; il donne à ce geste un sens culturel profond. Il contribue ainsi à enrichir cette langue et à améliorer sa qualité. Il traduit en français plusieurs œuvres d'Aristote dont *Le livre du ciel et du monde*[37]. Ces diverses traductions comportent de nombreuses gloses. Il est conscient de participer à une œuvre collective importante pour le royaume de France.

Parmi les traités de mathématiques, physique et astronomie qu'il écrit, citons :

a) des *Quaestiones* sur les Eléments d'Euclide[38] ;

b) *De motibus sperorum* (en latin)[39] ;

c) *De proportionibus proportionum* (vers 1350)[40] ;

d) *Algorimus proportionum,* manuscrit édité en 1868 ;

e) *Tractacus de configurationobus qualitatum et motuum*, vers 1350[41].

Son temps

Temps de crises et de mutations, les certitudes et les valeurs traditionnelles sont contestées et peu à peu remplacées par d'autres, aussi bien en politique (ébranlement du magistère de la Papauté, affaiblissement de l'idée d'universalité) que dans le domaine intellectuel. On renonce, sous l'influence de Guillaume d'Ockham (1285-1349), à l'ambition d'un savoir unifié et organisé en un système fondé sur la vérité divine, le dogme et la vérité humaine ; la synthèse n'est plus un idéal. Pour ce nominaliste, l'universel n'est qu'une abstraction. Il n'y a de réel que le singulier, la seule connaissance parfaite est celle dont le singulier constitue la matrice. Il prône la connaissance du singulier (différent de Dieu) et ouvre la voie à une certaine

---

[37] Traduction datant de 1377, éditée par Albert D. Menut et A. J. Denomy, 1968, Madison, the University of Wisconsin Press.

[38] *Quaestiones super geometriam Euclides*, manuscrit édité par H. L. L. Busard (Brill, Leiden, 1961) avec une paraphrase en anglais.

J.E. Murdoch en a publié une revue critique importante, bien que souvent injuste : Scripta Mathematica XXVII, 1964, 67-91.

Une traduction anglaise de ces deux questions se trouve dans E.Grant, A source Book in médiéval science, Havard University Press, 1974.

[39] *Le traité de l'espere* (traduction française d'Oresme) (Le traité de la Sphère) imprimé à Paris par Simon du Bois ; première édition sans date ; deuxième édition en 1508.

[40] Imprimé à Paris vers 1500 et à Venise vers 1505, traduit en anglais par Edward Grant, 1966, Madison, the University of Wisconsin Press.

[41] Traduction russe V. P. Zoubov (1958). P. Duhem en traduit des passages dans *Le système du monde*, livre VII, Hermann, Paris, nouveau tirage, 1976 (*Sur la configuration des qualités*) (A.L. Maier).

laïcisation du savoir ; il en résulte des ouvrages savants écrits en langue vulgaire ; en effet, le public s'élargit et n'est plus seulement constitué de clercs. Pour ce nouveau public, sont écrits des textes sur les phénomènes naturels, les nombres, les mouvements des corps célestes... Ockham est censuré à l'université de Paris plusieurs fois en 1339, 1340, 1347, 1373.

Oresme s'associe sans doute à cette dernière censure, mais a certainement aussi subi l'influence d'Ockham. Il perce des ouvertures dans l'édifice théorique du XIV^{ème} siècle, mais n'en bouleverse pas le cadre.

Certes, le souci de quantifier la qualité était déjà présent avant Oresme ; un élément moteur fut celui de quantifier la charité ! Cette idée est suggérée par l'appréciation de la hauteur des sons par les musiciens. D'autre part, Alhazen et Witelo ont essayé de géométriser la vision pour expliquer les illusions perceptives. Oresme, quant à lui, a donné un développement essentiel à la théorie de *Swineshead* (ou Suisset) sur l'intensité des formes. Il l'a rendu plus simple et plus concrète en utilisant systématiquement des représentations géométriques des grandeurs et de leurs relations.

La concordance entre la continuité du réel et la valeur discrète des nombres est rendue par la figure géométrique.

Cette dernière lui permet, par la méthode de représentation graphique qui l'accompagne, de mettre en œuvre l'idée d'une quantification des qualités. Il applique cette méthode, entre autres, à ces *qualités* que sont la vitesse et l'accélération des mouvements. *Dans ce cas, la base horizontale de la figure ou configuration représente le temps de parcours, et les segments verticaux les degrés de vitesse d'instant en instant.*

Lorsque le mouvement est uniforme la figure obtenue est donc un rectangle ; dans le cas d'un mouvement uniformément difforme (vitesse fonction linéaire du temps), on obtient un triangle rectangle. Dans ce dernier cas, il énonce la loi du degré moyen que Galilée établira à propos du mouvement de chute des corps :

> *Lorsqu'un mobile se meut, pendant un certain temps, d'un mouvement uniformément accéléré, le chemin qu'il parcourt est égal à celui qu'il parcourrait en un mouvement uniforme, de même durée, dont la vitesse serait égale à celle qui est prise en l'instant moyen du premier mouvement.* (Pierre Duhem, *Le système du monde*).

Le théorème du degré moyen ou *théorème de Merton* est le texte d'Oresme le plus cité par les historiens des sciences. La démonstration de ce théorème se trouve au chapitre III vii. Son importance exagérée découle de l'étroite similitude de ce chapitre et de la démonstration par Galilée du théorème I de la troisième Journée des *Discours sur Deux Sciences Nouvelles.* C'est donc dans son application au mouvement selon le lieu ou mouvement local que ce théorème sera important dans la fondation de la mécanique au XVII^{ème} siècle, mais il ne faut pas oublier qu'Oresme l'applique à n'importe quelle qualité.

Pour en savoir plus sur Oresme

Clagett M. *Oresme*, Dictionary of scientific biographies.

Souffrin P., Segonds A. Ph. (1988) *Nicole Oresme - Tradition et innovation chez un intellectuel du XIV^{ème} siècle,* Les Belles Lettres.

Quillet J. (1990) *Autour de Nicole Oresme,* Vrin.