

Le concept de vitesse, d'Aristote à Einstein

Pierre Magnien

Une vaste fresque historique décrit la lente émergence du concept de vitesse avec initialement la vision d'Aristote reposant sur l'observation et la réflexion, puis beaucoup tard, sur une conception qui se mathématise avec Galilée et Newton pour déboucher actuellement sur une perception totalement nouvelle du monde physique avec la relativité d'Einstein.

Il est courant de faire débiter la physique moderne avec l'œuvre de Galilée (1564 - 1642). Personne ne peut cependant ignorer qu'il avait été précédé par de nombreux philosophes ayant dégagé lentement et avec de nombreuses difficultés le chemin tortueux aboutissant aux principes et lois du mouvement que nous connaissons et utilisons aujourd'hui. Comme nous allons le voir, ce chemin débute en Grèce au VI^e siècle av. J.-C.

La cinématique grecque

Rappelons tout d'abord que les premiers philosophes grecs¹ développant une réflexion sur la nature dégagée des mythes originels sont presque tous originaires de la grande Grèce et non pas de la Grèce du Péloponnèse.

- Ionie : **Anaximandre** (né vers -610), **Thalès de Millet** (né vers -625), **Pythagore** (né vers -580), **Héraclite** (né vers -540) ;
- Sicile : **Empédocle** (né vers -480) ;
- Italie du Sud : **Parménide** (né vers -510), **Zénon d'Élée** (né vers -500) ;
- Thrace : **Leucippe** (né vers -460), **Démocrite** (né vers -460).

Leur objectif fondamental était de « saisir dans le fond des réalités physiques ce qui pouvait expliquer les apparences, tentant d'unifier en un tout intelligible la multiplicité des phénomènes que leur curiosité rencontrait² ». Ils tenaient donc avant tout un discours non hiérarchisé sur la nature, dans lequel les dieux étaient absents et avec comme objectif de remonter aux principes premiers.

Mais, à l'aube du IV^e siècle av. J.-C., Platon (-426, -346), disciple de Socrate (-470, -399), va renouveler les approches précédentes et inscrire l'homme dans un monde hiérarchisé dominé par des objets spirituels éternels et immuables : les Idées. Ces dernières, que

l'on ne peut ni voir ni toucher, permettent seules un rapport complet au réel. La physique platonicienne va donc chercher à faire correspondre notre monde visible et changeant à un modèle éternel et intelligible grâce, en particulier, aux mathématiques qui sont alors un instrument de contemplation, stade suprême de la connaissance. Dans cette perspective, l'observation, et encore moins l'expérimentation, ne peuvent permettre de parvenir à cette approche ultime.

Aristote (-383, -321), élève de Platon, se démarque très tôt de son maître en affirmant que la connaissance se développe à partir des sensations. Ses outils essentiels sont l'observation – il n'expérimentera que très rarement – et la réflexion. Il va tout d'abord ajouter aux quatre éléments – Terre, Eau, Air et Feu – déjà admis par Empédocle, quatre qualités : le Chaud, le Froid, l'Humide et le Sec. Il associe ensuite chaque élément à deux qualités : Terre ↔ Froid & Sec, Eau ↔ Froid & Humide, Air ↔ Chaud & Humide, Feu ↔ Chaud & Sec. En s'appuyant sur des raisonnements que nous avons du mal à suivre aujourd'hui, il parvient à expliquer l'ébullition de l'eau (indiquons ici que la substance banale « eau » ne doit pas être confondue avec l'élément fondamental « Eau ») : de son état initial froid et humide, elle passe à un état chaud et humide, c'est à dire de l'air. Il y a eu vaporisation.

Dans le cadre de sa physique, Aristote va introduire deux types de mouvement pour expliquer le déplacement des objets. Le premier dit « mouvement naturel » correspond au « retour » non contraint d'un objet vers le lieu naturel de ses éléments constitutifs dominant : le centre de la Terre pour les objets dont les principaux éléments associés sont « Terre » et « Eau », le ciel pour ceux où les éléments essentiels sont « Air » et « Feu ». La chute d'un objet lourd que l'on lâche constitue dans cette perspective l'exemple type de ce mouvement.

Comment se déroule un tel mouvement ? Pour Aristote, le corps prenait « immédiatement » une

1 On les appelle en général « philosophes présocratiques ».

2 La philosophie antique par JP Dumont page 25 - Que sais-je ? n° 250 (dixième édition).

vitesse constante qui dépendait de son poids – à cette époque une telle notion recouvrait simplement l'idée de lourdeur – et se déplaçait verticalement. L'observation sur laquelle il basait cette affirmation était que la pierre que l'on lâche tombe beaucoup plus vite que la feuille plus légère. En effet une pierre contenait essentiellement l'élément « Terre » et avait donc « hâte » de retourner à son lieu naturel, le centre de la Terre. D'autres facteurs pouvaient d'ailleurs jouer : Aristote décida que seule la résistance que le milieu opposait au mouvement devait entrer en ligne de compte. Il aboutit finalement à une idée que l'on pourrait aujourd'hui formuler en affirmant que la vitesse prise par un corps en chute libre est proportionnelle à son poids et inversement proportionnelle à la résistance du milieu. Cette conclusion lui permit alors d'en déduire que le vide ne pouvait pas exister puisque dans ce cas la résistance du milieu deviendrait nulle et la vitesse infinie, ce qui est, pour lui, impossible (rappelons que les Grecs avaient avec l'infini des relations difficiles !).

Aristote distingue ensuite le « mouvement contraint ou forcé » qui se produit lorsque le corps est propulsé par des forces extérieures qui tendent à s'opposer à son mouvement naturel. Il donne comme exemple le lancement d'une pierre ou le tir d'une flèche. La vitesse dans ce cas augmente avec l'importance de la force et lorsque la force cesse d'être appliquée, le mouvement redevient naturel. La difficulté est alors que, lorsque le contact avec le dispositif propulseur cesse, le mouvement devrait devenir brutalement vertical, contrairement à ce que l'on observe. Aristote s'en tire en donnant à l'air un rôle moteur qui prolonge l'effet de la force initiale en supposant que l'air, résistant, qui est chassé « devant » le projectile passe « derrière » ce dernier et devient moteur !! Il est difficile de croire qu'Aristote ait pu lui-même être convaincu par ses propres affirmations !

Dans cette perspective d'explication du mouvement, les seuls points ayant une importance pour les péripatéticiens³ sont l'**état initial** (position de départ) et l'**état final** (position d'arrivée) entre lesquels va se produire éventuellement un changement. Ceci n'entraîne pas une discontinuité du mouvement mais la trajectoire suivie et la quantification des paramètres, comme la vitesse, n'ont qu'une importance secondaire. La théorie se borne à analyser les **états** observables dans le système étudié et les variations de la vitesse **au cours** du déplacement ne sont même pas envisagées. Seules présentent un intérêt les différentes vitesses possibles selon le poids de l'objet et la résistance du milieu, là encore envisagées comme des **états**. La loi du mouvement en fonction du temps, dans ces conditions, n'est même pas pensable et il n'y a aucun intérêt pour

3 Ce sont les adeptes des idées aristotéliennes.

Aristote à chercher une description de la position du corps à chaque instant du déplacement.

Aristote s'intéresse également au concept de « temps » qui est intimement lié à celui de « mouvement ». Chez ce philosophe, ce dernier doit être compris d'une manière beaucoup plus large que celle que nous lui donnons habituellement aujourd'hui. L'idée de mouvement doit donc être rapprochée de celle de changement et, chez Aristote, la physique est la science étudiant les qualités sensibles – observables – et leur « mouvement » c'est à dire, pour nous, leur changement. C'est alors avant tout une science des états. Dans cette perspective le temps, qui est pourtant rangé dans les grandeurs dénombrables⁴ et mesure l'avant, le présent et l'après, existe cependant essentiellement comme une « qualité ». Ce temps aristotélien suit d'ailleurs la vision dualiste de l'Univers : dans le Cosmos – monde au delà de la Lune – existe un temps éternel, sans début ni fin, rythmé par des cycles (diurne, annuel, etc.) revenant sans altération et dont la mesure est dénombrable en unité de base, le jour ; dans le monde sublunaire s'écoule un temps « dégradé » qui n'est que l'expression du changement et de la corruption. Sa connaissance en terme quantitatif n'a qu'une importance secondaire, d'ordre pratique.

L'époque pré-galiléenne

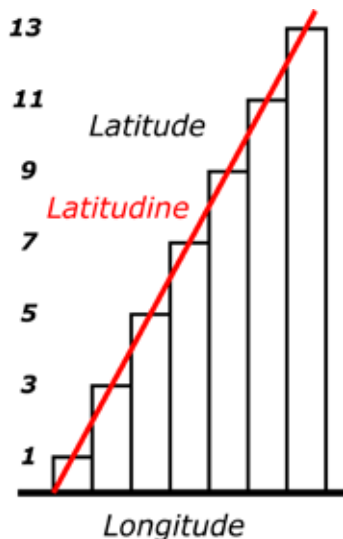
Les Romains ont peu apporté dans le domaine qui nous intéresse ici et après la chute de l'Empire et l'implantation durable du christianisme dans nos sociétés, c'est la vision platonicienne, après adaptation, qui va s'imposer : saint Augustin, par exemple, fait du monde dans lequel nous vivons un reflet de celui des Idées qui s'identifie lui-même avec la Parole Divine. Il faut attendre le XII^e siècle pour voir apparaître une évolution importante qui va modifier la vie intellectuelle en Europe occidentale. Les clercs vont alors découvrir – ou plutôt redécouvrir – la pensée grecque d'Aristote à travers les échanges qui vont s'établir avec le monde arabe. Ce dernier, depuis le VII^e siècle, s'est étendu sur d'immenses territoires qui vont de l'Espagne au voisinage de l'Inde. De puissants états se sont constitués et ont encouragé la récupération, la traduction et l'approfondissement des ouvrages des auteurs grecs.

De nombreux intellectuels arabes vont alors s'appuyer sur ce corpus considérable pour faire progresser les connaissances dans de nombreux domaines. Les nombreux échanges qui vont ensuite s'établir entre le monde arabe et le monde chrétien vont faire connaître en Europe des idées nouvelles qui vont apporter un changement considérable des mentalités. De plus, les Arabes ont considérablement

4 Les mouvements célestes, par exemple, étaient déjà associés à des grandeurs numériques comme le jour ou l'année.

développé les mathématiques grecques et inventé de nouvelles branches, en particulier l'algèbre. Longtemps après Pythagore, les nombres reprennent en science une place qu'ils ne quitteront plus mais en abandonnant leur « dimension » mystique. Aux XII^e et XIII^e siècles, apparaît alors le besoin de quantifier les qualités en repérant leur « intensité » par des nombres. Ce mariage entre les qualités d'Aristote et l'algèbre des arabes va conduire à une cinématique des proportions car on ne peut imaginer manipuler que des nombres sans dimension : on pourra parler d'une distance deux fois plus grande qu'une autre, d'une durée trois fois plus petite qu'une seconde. Chaque fois, ce qui est pris en compte, c'est le rapport de deux grandeurs de même nature mais il n'est pas pensable de faire le rapport d'une distance et d'une durée. Un tel objet n'a aucune signification pour les contemporains de cette époque.

La physique médiévale – contrairement à la cosmologie – se détachait donc déjà de la vision aristotélicienne mais conservait encore les grands principes de ce système. Une telle évolution va stimuler les réflexions de plusieurs maîtres de l'Université de Paris, en particulier **Jean Buridan** (v. 1300 - v. 1365) et son disciple **Nicolas Oresme** (v. 1320 - 1382). En utilisant une approche graphique et géométrique mise au point par les maîtres du collège Merton d'Oxford en Angleterre, ils se lancent dans l'étude des différents mouvements : le mouvement uniforme (vitesse constante) et le mouvement difforme (vitesse variable). Ils considèrent que le mouvement est la conséquence d'une qualité⁵ possédée par les objets, la vitesse. Pour représenter le « devenir » de cette dernière, Oresme va alors utiliser le graphique ci-contre à deux dimensions : l'axe horizontal ou longitude représente une « extension » de la qualité temps. En des points répartis régulièrement le long de la longitude, il porte des segments verticaux, les latitudes, qui expriment l'intensité de la qualité vitesse. En joignant les extrémités de deux latitudes



⁵ Le concept de qualité et l'étude de ses changements peut s'appliquer pour Oresme et ses collègues à toute caractéristique d'un objet évoluant dans le temps ; c'est ainsi que la température, la couleur... pourront être traitées de la même façon que la vitesse.

successives par un segment, appelé latitudine, il obtient une visualisation de la variation élémentaire de la vitesse. Si les latitudes sont de même longueur, le mouvement étudié est uniforme. Dans le cas où les extrémités des latitudes sont alignées et forment l'hypoténuse d'un triangle rectangle, on a affaire à un mouvement « uniformément difforme » comme on peut le voir sur la figure précédente. Cette représentation graphique permet de comprendre plus facilement les propriétés de la qualité vitesse.

Oresme démontre alors géométriquement la règle des maîtres de Merton : « **Toute qualité uniformément difforme a la même quantité totale que si elle affectait uniformément le sujet selon le degré de son point milieu** ». Cela signifie que la quantité de la qualité vitesse – qui pour nous est maintenant une distance – a pour mesure la surface formée par les latitudes successives pendant une extension donnée, ici la durée. On comprend rapidement que la surface du triangle représentant la quantité de vitesse uniformément difforme est égale à celle du rectangle représentant la quantité de vitesse uniforme de même extension – c'est à dire sur une même durée – et d'intensité égale à celle que nous appelons aujourd'hui la vitesse moyenne.

Le diagramme d'Oresme « contient » pratiquement les lois de Galilée sur le mouvement uniformément accéléré, la vitesse variant linéairement avec le temps. On peut se demander pourquoi Oresme n'a pas franchi le pas et énoncé la dépendance entre la distance parcourue et le carré du temps. On peut déjà remarquer qu'il n'a nulle part dans son œuvre identifié la quantité de vitesse à la distance parcourue. Il a cependant énoncé que, dans le cas d'une qualité uniformément difforme avec un axe de longitude régulièrement divisé, les qualités successives produites par cette division seront comme la série des nombres impairs.

Ce travail « inachevé » laisse perplexe et nous amène inmanquablement à nous poser la question suivante : pourquoi a-t-il fallu attendre Galilée pour que le dernier pas nécessaire à l'obtention correcte de la loi du mouvement uniformément varié soit franchi ? Il est difficile d'y répondre. Il semble cependant que la principale difficulté ait résidé dans la conception et l'utilisation de la qualité vitesse. La règle de Merton nous fait bien sûr penser à la notion moderne de vitesse moyenne mais on ne doit pas penser que c'était le cas au XIV^e et XV^e siècle car les maîtres de cette époque travaillaient exclusivement sur des proportions, c'est à dire des rapports de grandeur de même espèce. Il n'était pas concevable de raisonner sur des rapports de type longueur sur temps. C'est peut-être là un des points de blocage qui a empêché Oresme de faire le dernier pas.

L'étude cinématique du mouvement chez Galilée

Les intellectuels du collège Merton d'Oxford, Jean Buridan et Nicolas Oresme, avaient étudié l'évolution de la « qualité » vitesse d'un objet comme un exercice de géométrie en concluant que c'était de cette manière que devait se comporter un corps en chute libre. Il n'était pas du tout question de rechercher une loi quantitative de ce mouvement exprimant la distance parcourue en fonction du temps. On avait alors toujours une vision « globale » du mouvement et de ses propriétés.

Galileo Galilei dit Galilée⁶ (1564-1642) va inverser l'approche précédente. Tout d'abord, à partir d'observations et d'expériences, il va remettre en cause trois « certitudes » des physiciens aristotéliens en affirmant que :

Sur le plan cinématique

- L'état de repos et l'état de mouvement ne sont pas fondamentalement différents.
- Nous ne pouvons donc pas vérifier cette différence en observant la vitesse des objets en mouvement, cette différence n'étant qu'une question de point de vue.

Sur le plan dynamique

- Le déplacement d'un objet dans l'espace ne nécessite pas de force qui le pousserait et le maintiendrait en mouvement⁷.

L'étude expérimentale du mouvement de chute ralentie sur un plan incliné va permettre à Galilée de vérifier et de renforcer ces trois nouvelles affirmations et de donner naissance à une mécanique du point pesant en mouvement dans un champ gravitationnel constant⁸. Pour cela il faut effectuer des mesures et, en particulier, celles concernant la vitesse. Il faut alors définir préalablement ce que l'on va rechercher. Aujourd'hui personne n'a de difficulté pour écrire la formule $v = \frac{dl}{dt}$ (vitesse définie comme la dérivée de la distance parcourue en fonction du temps) mais

6 Après la condamnation en 1633 de son ouvrage *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Galilée se tourne vers la rédaction d'un traité consacré à la mécanique, et plus particulièrement à celle du mouvement de chute libre. Ce travail aboutit à la publication en 1638 de son dernier ouvrage *Discours sur deux sciences nouvelles* sur lequel nous nous appuyons pour cette partie de l'étude.

7 Ce n'est pas encore le principe d'inertie car, pour Galilée, la courbe suivie par un objet sur lequel n'agit aucune force résultante est un arc de cercle.

8 On pourra consulter le compte-rendu des travaux remarquables de Maurice Clavelin sur la question dans son excellent ouvrage *La philosophie naturelle de Galilée* paru chez Albin Michel (réédition de 1996). Il y montre clairement que l'essentiel de la science galiléenne est « le passage d'un univers conceptuel à un autre univers conceptuel ».

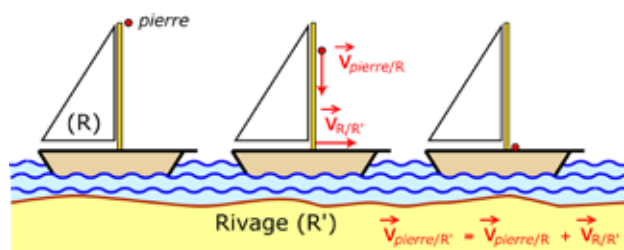
Galilée, comme ses prédécesseurs, ne possédait pas les mathématiques pour écrire cette simple égalité par contre il maîtrisait la géométrie et la loi des proportions énoncées par Euclide, déjà mises en œuvre par Oresme. Cependant il dépasse clairement ses prédécesseurs en considérant la vitesse d'un tel mouvement non plus comme ayant simplement une « intensité » croissant régulièrement mais comme la composition par addition d'accroissements élémentaires qu'il appelle dans son ouvrage « moment de vitesse ». Il fait enfin du temps une quantité continue que l'on peut diviser en éléments aussi petits que l'on veut. À partir de là, il peut « définir » l'accélération instantanée comme une quantité exprimant la croissance de la vitesse durant chaque partie successive aussi petite qu'on le souhaite. Cette forme de « passage à la limite » lui permet de remplacer le diagramme en escalier des intellectuels du XIV^e siècle par une ligne droite, dont il détermine expérimentalement quelques points, lui permettant de remonter à la loi que nous connaissons et exprimant la proportionnalité entre la distance parcourue et le carré du temps.

Galilée va également détruire la différence, irréductible dans le modèle aristotélien, entre le mouvement et le repos. Ils perdent chacun leur caractère absolu : pour le second en particulier ce n'est plus un état auquel parviennent les objets lorsqu'ils ont rejoint leur lieu naturel mais il doit se comprendre comme une absence de modification dans les relations spatiales entre les choses. Dans cette perspective il devient relatif et l'on peut dire que le repos est un mouvement qu'une modification de point de vue a annulé. Galilée, dans la deuxième journée de son ouvrage *Dialogue* concernant les deux plus grands systèmes du monde écrit : « Ainsi, les marchandises dont un navire est chargé se **meuvent en tant que, quittant Venise, elles passent par Corfou, par la Crète, par Chypre, et vont à Alep (...)** mais, pour ce qui concerne les balles, caisses et autres colis dont le navire est rempli et chargé, et respectivement au navire lui-même, le mouvement de Venise en Syrie est comme nul et ne modifie en rien la relation qui existe entre eux, cela parce qu'il est commun à eux tous et que tous y participent ». Étant en mouvement par rapport à son port d'attache, le chargement passe au repos si l'on se place d'un autre point de vue et que l'on considère celui d'un marin monté à bord du navire. Galilée peut donc ajouter « **Il est donc manifeste que le mouvement qui se trouve être commun à plusieurs mobiles est oiseux et comme nul, s'agissant des relations entre ces mobiles, parce que rien ne change entre eux...** ». On a ici un premier énoncé du principe de relativité⁹ de la mécanique classique qui sera repris

9 L'expression « principe de relativité » est de Henri Poincaré.

sous une forme plus rigoureuse par Newton et élargi à l'ensemble de la physique par Einstein. Il fait entrer dans le champ des études de mécanique le concept fondamental de référentiel¹⁰. Il s'agit d'un « objet » quelconque par rapport auquel on détermine les positions successives – donc le mouvement – du système que l'on souhaite étudier en attachant à cet objet un repère tridimensionnel et une référence temporelle.

Cette réflexion à propos de la diversité des points de vue avec lesquels on peut décrire le mouvement va amener Galilée à formuler ce que nous connaissons maintenant sous le nom de « composition des vitesses ». Comme souvent dans ses ouvrages, Galilée illustre son affirmation à l'aide d'un exemple que nous connaissons bien ; il s'agit de la pierre que l'on lâche depuis le sommet du mât d'un bateau. Vaut-elle tomber à son pied ou bien un peu en arrière – point de vue des aristotéliens – en fonction de la vitesse du navire ? Il considère deux observateurs : le premier est immobile dans le référentiel du bateau et le second dans celui du rivage devant lequel se déplace le vaisseau.



À partir des réflexions précédentes, Galilée montre alors que, vue depuis le rivage, la pierre se déplace, avant d'être lâchée, à la vitesse du bateau. Du fait de « l'indélébilité » du mouvement uniforme, elle va la conserver par la suite, mais ce mouvement de translation horizontale uniforme se combinera alors avec celui de chute libre verticale. Cette composition des vitesses s'exprime aujourd'hui par la loi galiléenne d'addition des vitesses indiquée sur le schéma précédent.

Tous ces résultats vont être diffusés à travers les deux principaux ouvrages de Galilée : en 1632, paraît *Dialogue sur les deux systèmes du Monde* et en 1638 *Discours et démonstrations mathématiques à propos de deux sciences nouvelles*. Lus dans toute l'Europe, ce renouvellement profond des sciences de la nature va être diversement appréhendé. René Descartes (1596-1650), dans ces échanges épistolaires avec divers intellectuels du moment, montre qu'il n'a pas compris l'importance de ce qui est détaillé en particulier dans les *Discours* ; pour lui, Galilée s'est

10 Galilée n'est pas à l'origine du terme qui apparaît à la fin du XVII^e siècle et sera très largement utilisé en physique à partir de la seconde moitié du XIX^e.

fourvoyé en recherchant des lois mathématiques décrivant le mouvement alors que l'essentiel est dans la recherche des « causes premières » prenant leur origine en Dieu. Pour lui, la seule quête qui vaille la peine est celle des règles métaphysiques permises par le Créateur du Monde.

Le triomphe de la mécanique classique chez Newton

Alors que pour Descartes la mécanique proposée par Galilée est une construction sans fondements, Isaac Newton (1643¹¹-1727) va la faire fructifier en dépassant son approche purement cinématique¹² et va lui apporter une dynamique en identifiant les causes du mouvement et en proposant les lois auxquelles elles obéissent. Son ouvrage le plus important en relation avec notre sujet est *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, publié en 1687 et connu sous le nom abrégé des *Principia*. Il y énonce, d'une part, la loi de la gravitation universelle qui unit « définitivement » les phénomènes terrestres et célestes et, d'autre part, les principes de base permettant d'étudier mathématiquement les mouvements après avoir défini les concepts fondateurs de force, de masse (grave et inertielle), d'espace et de temps (absolus et relatifs). Cet ensemble constituera le socle de la mécanique classique jusqu'au début du XX^e siècle.

Cependant il est difficile aujourd'hui de lire les *Principia* car Newton n'y fait que très peu usage du calcul différentiel dont il est d'ailleurs à l'origine (méthode des fluxions) en concurrence avec Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) et avec lequel il entretiendra sur le sujet une querelle de priorité¹³ pendant plusieurs années. Les démonstrations de son ouvrage s'appuient sur des méthodes de géométrie infinitésimale qui en rendent le texte presque illisible pour un lecteur d'aujourd'hui. Mais très vite après sa parution, le contenu des *Principia* va être réécrit sous la forme que nous connaissons et qui s'appuie sur la mise en œuvre des algorithmes du calcul intégral-différentiel que vont

11 On lit très souvent que Newton est né l'année de la mort de Galilée. Bien que ce détail ne soit pas, en soi, d'une grande importance, il est faux ! La raison est cependant intéressante : Galilée est mort le 9 janvier 1642 et Newton est né le 25 décembre 1642. Il semble bien que nous soyons dans la même année mais ça n'est pas le cas car ces dates ne sont pas données dans le même calendrier : pour Galilée il s'agit déjà du calendrier grégorien, adopté en Italie en 1582, alors que pour Newton nous sommes encore dans le calendrier julien, l'Angleterre adoptant le premier en 1752. Si nous nous plaçons pour les deux savants dans le calendrier grégorien, Newton est né le 7 janvier 1643.

12 Rappelons ici que Galilée avait fait une avancée sur le plan de la dynamique en énonçant une première formulation du principe d'inertie.

13 Pour être précis, les échanges contradictoires se sont faits non pas entre Leibniz et Newton lui-même, mais avec un des amis de ce dernier, Samuel Clarke (1675 – 1729).

rapidement développer plusieurs mathématiciens comme **Jacques Bernoulli** (1654-1705), le marquis **Guillaume de l'Hospital** (1661-1704) et **Pierre Varignon** (1654-1722), ce dernier appliquant les nouvelles méthodes leibniziennes à la mécanique newtonienne. Le XVIII^e siècle verra le triomphe de la formulation que nous connaissons aujourd'hui avec des symboles tels que $dx, dt, \frac{d}{dt}, \frac{d}{dt}, \dots$, qui permettent une véritable algébrisation de la cinématique et de la dynamique. L'aboutissement de cette démarche est contenu dans l'ouvrage de **Joseph Louis Lagrange** (1736-1813) *La mécanique analytique* qui, comme il le dit dans sa préface, «... expose des méthodes ne demandant ni raisonnements géométriques ou mécaniques, mais seulement des opérations algébriques, assujetties à une marche régulière et uniforme». La vitesse est devenue une grandeur définie mathématiquement d'une manière rigoureuse permettant sa manipulation sans difficulté. Toutes les discussions qui étaient apparues suite à la publication des *Principia* se sont alors éteintes devant la puissance prédictive de ces nouvelles méthodes qui vont s'imposer pendant un siècle et demi.

La révolution einsteinienne

Durant le XIX^e siècle, plusieurs difficultés étaient apparues pour expliquer les résultats obtenus dans des expériences d'optique où intervenait la vitesse de la lumière. Dans le même temps, apparaissait la notion de champ et plusieurs savants remirent alors en cause l'idée newtonienne d'action instantanée à distance pour la remplacer par celle d'actions se propageant de proche en proche à vitesse finie. Ils vont aussi critiquer l'idée de simultanéité absolue entre des événements mais sans remettre en cause celle de temps absolu s'écoulant de la même façon en tout lieu de notre Univers. La question va recevoir en 1905 une réponse renouvelant complètement notre vision de la physique dans un article écrit par Albert Einstein *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement*. **Son contenu montrait que le temps n'était plus un paramètre indépendant du référentiel d'étude** mais devenait une dimension supplémentaire au même titre que les dimensions spatiales, ce qui en faisait une grandeur «privative» attachée à chaque observateur. Les nouvelles transformations permettant de passer des coordonnées dans un repère attaché à un référentiel (**R**) à celles dans un repère attaché à un référentiel (**R'**) imbriquent les dépendances entre les coordonnées spatiales et la coordonnée temporelle.

De plus l'analyse d'Einstein montrait que, dans ces conditions, il apparaissait une constante fondamentale de structure notée c qui avait la dimension d'une vitesse et qu'on identifiait à la vitesse de la lumière dans le vide. Ceci ne pouvait qu'occasionner une

mutation importante du concept de vitesse. Tout d'abord aucun objet pesant ne peut se déplacer à la vitesse c et, à plus forte raison, plus vite que c . Cette limite infranchissable oblige à revoir la loi d'additivité galiléenne des vitesses. Rappelons-la : si un objet A se déplace à la vitesse $v_{A/(R)}$ par rapport à un référentiel (**R**) qui lui-même se déplace à la vitesse $v_{(R)/(R')}$ par rapport à un référentiel (**R'**), la loi galiléenne nous permet d'écrire (avec des vecteurs vitesse colinéaires) :

$$\mathbf{v}_{A/(R')} = \mathbf{v}_{A/(R)} + \mathbf{v}_{(R)/(R')}$$

On voit bien que si $v_{A/(R)} = c$ et $v_{(R)/(R')} \neq 0$ on a alors $v_{A/(R')} > c$ ce qui n'est pas autorisé. Il faut donc construire une nouvelle loi telle que si $v_{A/(R)} = c$ on a alors $v_{A/(R')} = c$. Celle proposée par Einstein est la suivante :

$$\mathbf{v}_{A/(R')} = \frac{\mathbf{v}_{A/(R)} + \mathbf{v}_{(R)/(R')}}{1 + \frac{\mathbf{v}_{A/(R)} \cdot \mathbf{v}_{(R)/(R')}}{c^2}}$$

Enfin, en 1908, **Hermann Minkowski** (1864-1909) va donner à la relativité einsteinienne une formulation mathématique quadri-dimensionnelle permettant de définir la quadri-vitesse qui est la dérivée du quadri-vecteur position par rapport au temps propre¹⁴ et dont la composante temporelle vaut $c\gamma(v)$ ¹⁵. Il n'est pas possible de développer plus avant cette question mais remarquons cependant que les trois composantes spatiales de la quadri-vitesse ont pour expression $\gamma \cdot v_i$, v_i représentant les composantes de la vitesse tridimensionnelle usuelle. On constate ici que la notion de vitesse, en relativité, se complexifie considérablement du fait que l'on est obligé de raisonner dans un espace quadri-dimensionnel.

En relativité restreinte, l'équivalence de tous les mouvements inertiels entraîne que la vitesse ordinaire perd de son intérêt pour exprimer les lois physiques. La relativité générale accentue plus encore ce « déclassement », car elle supprime toute distinction fondamentale entre les différents types de vitesses en les intégrant dans la structure de l'espace-temps. Une seule vitesse conserve un sens précis dans les deux théories : celle de la lumière, paramètre de liaison de l'espace et du temps mais sa constance n'a un sens global que pour la relativité restreinte car en relativité générale son caractère invariable n'est que local. ■

14 Le temps propre est celui mesuré par une horloge dans le référentiel qui lui est attaché.

15 La notation $g(v)$ – g étant le facteur de Lorentz – indique que le facteur g de la relativité restreinte est attaché à un objet ayant une vitesse variable, la théorie pouvant traiter, contrairement à ce qu'on lit souvent, le cas de mouvement quelconque à condition de ne pas être en présence d'un champ gravitationnel, ce cas relevant alors de la relativité générale.