

in *La vitesse. Actes des 8^ès Entretien de la Villette*, Centre National de Documentation Pédagogique, Paris, 1997, p. 15-31.

Histoire rapide de la vitesse (le concept physique)[§]

par

Michel PATY[#]

1

DE LA VITESSE AUJOURD'HUI AUX ORIGINES DE LA NOTION

Il est banal de dire que notre époque est celle de la vitesse. Elle est aussi celle de beaucoup d'autres choses... Arrêtons-nous, cependant, un instant à cette omniprésence de la référence à la vitesse dans notre univers quotidien. Des mouvements pressés de l'homme d'affaires ou du ministre qui s'enfourne dans sa puissante limousine au spectacle du métro en début de matinée, aux gestes de l'usine (souvenons-nous de Charlot dans *Les temps modernes*) ou à ces images des fusées Ariane, Challenger ou Soyouz, prenant majestueusement leur envol dans le ralenti des caméras et filant comme l'éclair dans le ciel bleu, très vite perdues de vue.

La vitesse nous est familière, non pas seulement par la quotidienneté de ses manifestations dans notre vie, mais par le fait que nous savons associer à ces gestes, à ces mouvements, à ces rythmes, des notions que nous pouvons décrire avec la précision des nombres. Nous savons ce qu'est le concept physique de vitesse, exprimé par le rapport d'une distance à une durée ; nous lui attachons aussi bien une valeur moyenne (la vitesse d'un trajet) qu'une valeur instantanée (quand nous disons, par exemple, que le pilote d'une voiture de course fait une pointe à 300 km/h).

Cependant, nous n'avons pas pour autant une totale maîtrise de la

[§] Conférence, *Les Entretien de La Villette: La vitesse*, Cité des Sciences et des Techniques, La Villette-Paris, 26 mars 1997.

[#] Equipe REHSEIS (UPR 318), CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot.

notion de vitesse car, au-delà du domaine malgré tout restreint de notre expérience courante, nous imaginons difficilement les vitesses “astronomiques” des particules lancées dans les accélérateurs, proches de celle de la lumière. Et pourquoi, se demande-t-on, est-il impossible de dépasser la vitesse de la lumière ? Nous concevons intuitivement mal que deux vitesses qui se composent ne s'additionnent pas purement et simplement, comme Galilée l'avait si clairement montré dans ses *Discours*, dès lors qu'elles sont très grandes. Et pourtant, la physique nous enseigne que c'est le cas, que c'est facile à concevoir, et qu'il est même possible de développer une forme d'intuition adaptée à ces nouvelles réalités.

C'est que la physique et son histoire nous montrent, en fait, que la vitesse est une notion construite par la pensée humaine, pour rendre compte de propriétés du monde qui nous entoure. Cette construction pouvait paraître, à certains égards, soit naturelle (quand on y était habitués), soit arbitraire (par exemple, par ses définitions à l'aide de grandeurs mathématiques représentées sous forme de symboles et qui, en tant que telles, n'existent pas à proprement parler dans la nature). La physique et son histoire nous enseignent que cette construction est en réalité contrainte par une cohérence supérieure, qui peut obliger à la modifier quand cela s'avère nécessaire. C'est essentiellement ce que je voudrais montrer dans ce qui suit : construite et modifiable, la vitesse peut alors être considérée comme une grandeur qui est “vraie” dans son domaine de pertinence, que nous aurons, chemin faisant, balisé.

Nous verrons ainsi de quelle longue élaboration est issue cette notion qui nous est devenue - ou que nous croyons - familière, le concept physique de vitesse, et que sa construction, et ses applications, sont relatifs à des phénomènes bien définis et circonscrits, objets de l'approche scientifique. Mais nous savons aussi, par l'expérience commune de la vie quotidienne, que la vitesse dont on parle dans le langage courant ne s'identifie pas toujours ni nécessairement à ce concept très élaboré.

Et cependant, il y a un raccord nécessaire entre les deux. Dès que l'on s'interroge en profondeur sur la vitesse au sens du langage courant, on en vient, car la connaissance scientifique n'est pas étrangère à la connaissance commune et coupée d'elle, à concevoir la vitesse selon le contenu conceptuel que la physique en donne. D'un autre côté, avant la construction scientifique du concept de vitesse, quelque chose préexistait, sous la même dénomination ou non, qui correspondait à l'expérience que les hommes en avaient. C'est en ayant en vue cette “pensée du raccord”, indispensable à la culture scientifique, et pour la susciter, que je proposerai quelques remarques pour tenter de resituer d'une manière générale la notion de vitesse dans l'expérience et la pratique humaines.

La construction de concepts vient accompagner la prise de conscience d'une réalité éprouvée, et, dans le cas qui nous occupe, d'une expérience humaine antérieure très ancienne. Si le concept physique de vitesse est le fruit d'une longue élaboration qui a demandé du temps (plus de vingt siècles) avant qu'il ne nous soit présenté tel que nous le connaissons, il est certain que nous pouvons déceler dans la pensée consciente des êtres humains, très longtemps avant ces élaborations, une expérience diversifiée (et probablement multiple) de ce que nous appelons la vitesse.

Une histoire complète de la vitesse devrait parler aussi de cette origine : sans la richesse d'expériences vécues de ce que nous appelons "vitesse", le concept n'aurait été ni pensé ni construit. Ce qui veut dire que notre concept de vitesse contient, de fait, toute cette expérience non formalisée, du moins cette expérience passée ensuite au filtre de la pensée rationnelle et critique. Il nous intéresserait aussi de savoir comment d'autres systèmes de pensée rendent compte de cette expérience d'une manière différente de celle que nous connaissons (ce qui nous renvoie à l'ethnologie et à l'histoire des sciences d'autres civilisations).

Que l'homme ait eu depuis très longtemps l'expérience de la vitesse comme une caractéristique du mouvement, nous pouvons l'imaginer sans mal. Nous en trouvons le témoignage dans les fresques et les bas reliefs des grottes de la préhistoire, qui donnent à voir dans les représentations d'animaux quelque chose du mouvement saisi au vol - fruit, indéniablement, d'une observation attentive de la succession des gestes. Certainement l'homme avait-il alors une notion pratique de la vitesse, par la plus ou moins grande rapidité requise pour rattraper les animaux à la course. Il est admirable qu'il ait su la retranscrire d'une manière aussi évocatrice sur les peintures rupestres. Cet art de la transposer dans la représentation symbolique, c'était déjà, d'une certaine manière, *penser* le mouvement et la vitesse.

On imagine que ce qui a dû venir d'abord dans la formation de l'idée de vitesse, c'est ce qui lui correspond dans l'action humaine comme réponse à une sollicitation extérieure (la proie qu'il faut attraper, voire l'émulation de la course comme épreuve initiatique), ou comme impulsion qui met en œuvre les potentialités du corps (la tension des muscles pour s'élancer, la marche plus ou moins rapide, la course, le bond). La notion de vitesse n'est qu'une abstraction par laquelle on formule une idée commune à tous ces actes, qui accompagne cette autre abstraction, le mouvement. Immobilité, mouvement, vitesse : trois notions, trois abstractions, qui vont ensemble, liées aux expériences primordiales.

Comment se créent les notions les plus communes, celles qui viennent des origines ? Les inventions surviennent au rythme des actes humains, qui accompagnaient alors étroitement les rythmes et les événements de la nature (les autres êtres, l'environnement, les astres). On peut inventorier différents niveaux où la vitesse est de tous temps impliquée, mais rien n'indique qu'ils répondaient à une notion unique comme aujourd'hui : il existait, plus probablement, des vitesses de tous les genres, correspondant à des situations qui n'étaient pas vraiment comparables (la séparation, à la Renaissance, entre mouvements naturels et violents peut, en un sens, être vue comme un résidu savant de telles distinctions).

Sans doute y eût-il - dans la diversité des cultures et des civilisations - des rapprochements, et peut-être un même mot exprima-t-il un même genre de mouvement, une même catégorie de vitesse, avec, dans l'une ou l'autre, une gamme de variations. La course : l'homme poursuivant le bison, le cerf, la gazelle. La marche : les déplacements des tribus nomades, la vitesse des légions romaines ; on aime à se représenter le lent déplacement des chariots lourds des rois fainéants, mais, en regard, la course rapide des chevaux des conquérants arabes, ou la mobilité des drakkars vikings... La chute (d'eau, de pluie, de grêle). Le lancer, selon une impulsion linéaire : flèches, javelots, projectiles divers tels que boulets, balles ; ou non linéaire : pierre de fronde, boomerang, etc. On considéra aussi les

régularités, ou les irrégularités, constatées pour les mouvements des astres par les plus anciens astronomes (de l'observation des corps célestes vient la notion de mouvement uniforme).

Et encore l'estimation d'une relation entre durée et distance, dont il faut avoir le sens pour viser à la chasse. Le contraste entre l'instantanéité (de la lumière, conçue jusqu'au XVII^e siècle) et la propagation à vitesse finie (celle du son). La différence entre mouvements linéaire et circulaire, qui suppose une géométrie ; et les autres n'étant envisagés, dans la science européenne, qu'au XVII^e siècle, avec les ellipses dans l'astronomie de Képler et la parabole dans la balistique de Galilée. La distinction entre mouvements “naturels”, continus, et mouvements “violents”, discontinus...

Qu'est-ce qui fait qu'une flèche lancée dans l'air poursuit sa course, alors qu'elle est détachée de ce qui lui a donné le mouvement, et dénuée de support matériel ? Par-delà les paradoxes de Zénon d'Elée, la réflexion sur cet état de choses est à l'origine de la lente conceptualisation de la vitesse comme grandeur physique que nous allons maintenant esquisser. On n'oubliera pas non plus, à verser au dossier de l'assimilation de la vitesse dans la culture, au moins dès la période classique, la sagesse proverbiale qui renverse l'ordre de la comparaison des vitesses, attestant de son caractère de notion commune et “relative” : “Rien ne sert de courir, il faut partir à point”, fait observer, selon La Fontaine, à Jeannot Lapin la Tortue sentencieuse.

Terminons ces considérations préliminaires en évoquant une remarque de nature physiologique faite naguère sur la vitesse par Ernst Mach, à la suite d'expériences sur les sensations : l'organisme perçoit directement les changements de mouvement (c'est-à-dire les accélérations), et non les vitesses linéaires et uniformes. Nous avons la sensation et la conscience du mouvement de rotation (tout en gardant les yeux fermés, par exemple) par l'excitation produite par ce mouvement sur les canaux semi-circulaires de l'oreille interne, qui modifie notre sensation d'équilibre. Si nous gardons les yeux ouverts, cette sensation détermine un mouvement réflexe de rotation des globes oculaires, dans la direction opposée à celle du mouvement, par lequel les images rétiniennes des objets proches du corps sont déplacées : l'oeil voit ces derniers bouger dans la direction du mouvement.

D'une manière générale, faisait observer Mach, le changement nous fait prendre conscience de la chose qui change. L'organisme perçoit directement le taux de changement de mouvement (c'est-à-dire l'accélération), dans la mesure où l'organe de perception s'y adapte et y répond : ce taux, insistait Mach, n'est donc pas une idée abstraite, comme la vitesse des aiguilles d'une pendule ou d'un projectile, mais correspond à une sensation spécifique. Par contre, rien dans nos sens ne nous fait directement percevoir le mouvement uniforme. On peut considérer que l'accord entre cette particularité de l'organisme humain (et animal) et le principe de relativité pour les mouvements d'inertie (rectilignes et uniformes) est assez remarquable. A moins qu'on ne le trouve évident, puisque l'organisme animal est soumis aux lois de la physique, et que celles-ci sont inchangées dans les mouvements d'inertie. Cependant nous pouvons avoir la conscience du mouvement linéaire uniforme *relatif*, soit en ouvrant les yeux et en suivant du regard les objets, soit en constatant un effet Doppler-Fizeau pour une lumière ou pour un son

(modification de la fréquence avec l'éloignement).

Mais la théorie de la relativité générale, en dépassant les mouvements d'inertie, va au-delà de ces perceptions de notre corps, demandant que nos concepts se dégagent ici aussi de leur anthropocentrisme d'origine, et accentuant leur caractère de construction abstraite pour représenter un monde extérieur objectif. Car telle est bien la direction générale que l'on perçoit dans l'histoire de l'élaboration scientifique du concept de vitesse.

Venons-en à l'histoire de l'élaboration du concept physique de vitesse, où nous distinguerons, pour la commodité, trois périodes : d'Aristote à la Renaissance, de Galilée à la fin du XIX^e siècle, et la période contemporaine à partir de la théorie de la relativité.

2

LES CONCEPTIONS QUALITATIVES DE LA VITESSE

La première phase est celle d'avant la mathématisation. L'élaboration de la notion de vitesse s'y trouve liée à la conceptualisation du mouvement, de l'espace et du temps, dès les débuts de la science grecque, et en particulier dans l'oeuvre d'Aristote. Nous la ferons se poursuivre au-delà des premiers essais de quantification de la vitesse, vers la fin du Moyen Âge, où se développe, au XIV^e siècle, la doctrine de l'“impetus”, qui apparaîtra comme un pas très important pour la suite, jusqu'à la Renaissance et aux essais encore infructueux de donner une représentation géométrique satisfaisante des trajectoires des corps mobiles.

Dans cette longue durée de la première pensée scientifique du mouvement et de la vitesse, ces derniers étaient conçus selon une pensée des “qualités” qui nous est aujourd'hui très étrangère, si nous en prenons connaissance sans être avertis. Ils étaient pris dans des considérations ontologiques sur l'ordre de la nature (*physis*) et du cosmos qui (pour notre connaissance rétrospective) empêchaient de formuler une grandeur propre du mouvement et une loi générale de celui-ci. Du moins dans le sens que nous lui donnons, qui n'était pas encore acquis. Car, pour Aristote, le mouvement avait ses lois, que voici.

Aristote considérait comme le seul mouvement naturel ou parfait, auquel on devait rapporter les autres, le mouvement circulaire, en relation à sa cosmologie et à sa doctrine des éléments. Les éléments, ou corps simples, au nombre de quatre, la Terre, l'Eau, l'Air et le Feu, sont présents dans le monde sublunaire soumis à la corruption comme dans le Ciel, lieu sans corruption. Chaque corps a son lieu propre, vers lequel il tend : ainsi des éléments, les légers (Air et Feu) tendant vers le haut, les graves (Terre et Eau) tendant vers le bas. Le mouvement vers le haut ou vers le bas ne se fait pas par l'action d'un autre corps ni par pression, mais par la sollicitation de cette tendance : “Plus grande est la masse du Feu ou de la Terre,

plus rapide est son mouvement vers son lieu propre”. Et la rapidité croît vers la fin. Elle est aussi fonction de la forme du corps : “La figure des corps n'est pas la cause de leur mouvement vers le haut ou vers le bas d'une façon absolue, mais seulement de leur plus ou moins grande rapidité”. Aristote en donne pour exemples un disque plat de métal lourd flottant sur l'eau, ou encore des poussières en suspension dans l'air.

Mais c'est la sphère extérieure, celle des étoiles fixes, qui est, dans son système astronomique de sphères imbriquées voisin de celui d'Eudoxe, le lieu de l'éther, élément des substances sensibles et éternelles des cieux, dont le mouvement est le mouvement circulaire éternel, celui de la sphère des fixes, qui s'identifie au temps et constitue la mesure de tous les mouvements. Le mouvement éternel, un, identique, continu et premier, de la sphère éthérée est produit par le “premier moteur” ; il est le seul à pouvoir être uniforme, en raison de la conception qualitative du mouvement évoquée plus haut. “En effet”, écrit Aristote dans sa *Physique*, “ce qui se déplace en ligne droite ne se déplace pas de manière uniforme du commencement jusqu'à la fin ; car toutes choses se déplacent à une vitesse d'autant plus grande qu'elles s'éloignent davantage du lieu de leur repos”.

La physique d'Aristote est en dépendance de sa métaphysique et reste, en ce qui concerne le mouvement, extérieure aux mathématiques. Le mouvement, défini “comme l'acte de ce qui est en puissance, en tant que cela est en puissance”, exige une cause continuelle, et la vitesse garde son sens ontologique, qualitatif, en rapport à la doctrine du lieu naturel. Cela suffit à indiquer l'impossibilité d'un mouvement d'inertie, qui se poursuivrait de lui-même, et il y a, entre le mouvement et le repos, une différence de nature.

Les conceptions aristotéliennes sur le mouvement ont exercé, comme on le sait, une influence considérable sur toute la pensée médiévale, et certaines d'entre elles, comme ses idées sur les principes du mouvement, étaient encore admises au XVII^e siècle par Cardan et par Képler. Cependant, les maîtres des Universités de Paris et d'Oxford, au XIV^e siècle, en particulier Guillaume d'Ockham, Nicole Oresme et Jean Buridan, développèrent une dynamique anti-aristotélienne basée sur le concept de l’“impetus” (reprise de certains auteurs de l'Antiquité), force présente dans les corps en mouvement et cause de ce mouvement.

L’“impetus” était une impulsion de nature dynamique, transférée au corps par le moteur qui lui a donné le mouvement (par exemple un autre corps, dans un choc, ou une impulsion) et désormais portée par lui ; propriété du corps, l’“impetus” était pensé comme une sorte de force interne, sur le mode de la chaleur qui reste dans le corps après avoir été transmise. Tout en maintenant l'idée aristotélienne du mouvement comme processus et la différence de nature entre le mouvement et le repos, la doctrine de l’“impetus” permettait une approche quantitative avec la définition de la vitesse moyenne pour un intervalle de temps (une durée) donné. Elle fut à l'origine d'innovations importantes qui se firent jour dès le XVI^e siècle et permirent progressivement de géométriser ou mathématiser le mouvement.

S'élevant contre l'idée aristotélienne d'un moteur, Nicolas Tartaglia (au XVI^e siècle) se pencha sur le mouvement des corps pesants ou graves et, distinguant le mouvement “naturel” de chute du haut vers le bas, et le mouvement

“violent” (résultant de l'impulsion par choc), constata une incompatibilité entre les deux, en ce sens que les portions linéaires et circulaire (les seules trajectoires géométriques alors admissibles étant la droite et le cercle) de la trajectoire d'un projectile ne pouvaient pas être raccordées d'une manière continue. Cette impossibilité de réunir géométriquement les portions de trajectoires constituait un problème insoluble pour les ingénieurs et mathématiciens de la Renaissance, pour Léonard de Vinci comme pour Tartaglia. Toutefois, en proposant l'idée de “mouvement mixte”, Léonard de Vinci et Nicolas de Cues ouvraient la possibilité de concevoir la composition de mouvements différents.

3

VITESSE, ACCELERATION, MATHEMATISATION ET LOIS DU MOUVEMENT. CAUSALITE ET ANALYSE

La seconde phase commence avec les premières tentatives fructueuses de libérer la notion de vitesse de ses limitations qualitatives et ontologiques pour obtenir une représentation unifiée et mathématique du mouvement, avec Benedetti et surtout Galileo Galilei (Galilée). Ce dernier développa l'idée d'“impeto”, ou “momento”, qui ne garde de l'ancien “impetus” que l'idée d'une propriété motrice inhérente au corps, mais conçue comme l'effet du mouvement, et non comme sa cause. Par cette transformation de sens, le concept galiléen d'“impeto” est en rupture plus qu'en continuité avec l'“impetus” dynamique. Galilée, pour qui les mathématiques sont la langue de l'Univers, le concevait comme une grandeur intelligible mathématiquement. De fait, l'“impeto” contient deux idées originales dont l'importance allait s'avérer décisive : la conservation du mouvement, plus précisément de la quantité de mouvement (exprimée comme le produit du *poids* par la vitesse), et la loi de l'inertie, c'est-à-dire la poursuite indéfinie, pour un corps laissé à lui-même, de son mouvement initial, uniforme et en ligne droite. Ou, du moins, lorsque l'on s'affranchissait de la pesanteur, c'est-à-dire, pour Galilée, dans le plan horizontal. Car il considérait encore la force de pesanteur comme attachée au corps, et non pas extérieure à lui.

On peut considérer, avec Alexandre Koyré, que la grande innovation de Galilée aura consisté à considérer le mouvement, pour un corps physique, comme un *état* et non plus comme un *processus* (ce qu'il était d'Aristote aux scolastiques). Cela mettait le mouvement sur le même plan ontologique que le repos : la vitesse n'affecte pas les propriétés du corps. Il était dès lors possible de composer entre elles des vitesses dues à des causes d'origines différentes, mathématiquement, c'est-à-dire géométriquement (parallélogramme des vitesses), ce qui permettait de ramener, pour ainsi dire, le mouvement au repos (relativité des mouvements). Il pouvait alors trouver géométriquement la trajectoire d'un corps mobile, en

décomposant sa vitesse, acquise en un point de sa trajectoire, en celle due à la force d'inertie et celle due à la force qui le sollicite, par exemple dans la chute libre des corps graves.

Après des tâtonnements (il avait d'abord tenté d'exprimer la vitesse de chute comme proportionnelle à la distance parcourue, qui lui paraissait la loi la plus simple et naturelle), Galilée réussit à formuler la loi de la chute des corps en termes de la hauteur de chute proportionnelle au carré de la durée correspondante. Pour la première fois, une loi physique, pour des corps terrestres, était exprimée en fonction du temps pris comme variable. Avec la loi galiléenne de la chute des corps, la force était désormais conçue non plus comme ce qui produit la vitesse, mais comme ce qui produit le *changement* de vitesse, c'est-à-dire l'accélération. Il s'agissait alors de vitesses moyennes pour un parcours fini. La loi énonçait aussi l'égalité de l'accélération (dans le vide, c'est-à-dire en l'absence de résistance de l'air), à une hauteur donnée de chute, pour tous les corps, indépendamment de leur forme et de leur poids.

A l'aide de la composition des vitesses, Galilée était alors en mesure d'établir les lois de la balistique pour les corps terrestres et de calculer la trajectoire d'un projectile, dont il établit qu'elle est une parabole. A la même époque, Johannes Kepler formulait les trois lois du mouvement des planètes, à partir des mesures de Tycho Brahé, dont la première sur les trajectoires elliptiques. Pour la première fois, indépendamment et presque simultanément, l'existence de trajectoires géométriques autres que la ligne droite ou le cercle venait d'être annoncée. Il s'agissait dans les deux cas de coniques (courbes du second degré). Mais personne avant Newton ne s'avisa de faire le rapprochement.

Le principe d'inertie fut, après Galilée, formulé plus complètement, pour toutes les directions, en étant conçu indépendamment de la pesanteur, désormais pensée comme extérieure aux corps, par René Descartes et par Pierre Gassendi. La composition des vitesses, la conservation de la quantité de mouvement, le principe de relativité, présents chez Galilée, furent repris, de Descartes et Gassendi à Christiaan Huygens, qui formula explicitement le dernier avec cette dénomination. (On doit également à Huygens, indépendamment de Newton, la connaissance de la force centrifuge dans le mouvement circulaire).

L'instantanéité du temps dans le mouvement fut une préoccupation de Descartes, qui formula d'ailleurs la notion de centre instantané de rotation. Mais c'est à Newton qu'il devait revenir d'exprimer les lois dynamiques pour un instant donné en relation à un instant quelconque, grâce à la pensée du calcul infinitésimal qui est implicite dans la géométrie des limites mise en œuvre dans les *Principia*.

La formulation des lois du mouvement et de la dynamique connut ainsi son aboutissement avec Isaac Newton, qui en fit un système, couronné par sa découverte de la loi de la gravitation universelle. Reprenant les trois lois déjà formulées avant lui de l'inertie, de la composition des mouvements et des forces, et de l'équilibre ou de l'action et de la réaction, il les formula de manière systématique et en terme de forces, unifiant ce concept autour de sa seconde loi, qui exprime le

changement de vitesse en fonction de la force appliquée¹. C'est la loi fondamentale de la dynamique newtonienne, ultérieurement traduite dans la symbolique du calcul différentiel et intégral leibnizien, qui constitue la loi, différentielle et causale, de la dynamique de corps matériels.

La loi newtonienne (différentielle) de la gravitation universelle unifiait et justifiait les lois képlériennes du mouvement des planètes et la loi galiléenne de la chute des corps (lois intégrales ou globales), par la relation qui lie la position et la vitesse d'un corps sur sa trajectoire entre un instant donné et l'instant immédiatement suivant. Newton avait introduit les notions de grandeurs absolues (temps, espace, vitesse), indépendantes des corps, nécessaires dans son esprit pour leur mathématisation, contrairement à ses prédécesseurs Galilée, Descartes, Huygens, qui les concevaient comme seulement relatives aux corps. En outre la deuxième loi du mouvement de Newton, qui énonce la proportionnalité de la force au changement de vitesse, requérait dans son esprit un espace absolu (physique et mathématique) comme support des accélérations.

Dans les *Principia*, Newton étudiait quantitativement les lois du mouvement en termes de représentation géométrique des grandeurs physiques, comme des portions de courbes ou de droites. Dans les passages à la limite les rapports de grandeurs (par exemple, de la corde à l'arc) il obtenait des valeurs finies pour un point et un instant donné, correspondant de fait à des grandeurs instantanées, sans pour autant qu'il les ait formulées explicitement comme telles. La représentation des grandeurs dans le langage du calcul différentiel leibnizien, faite au début du XVIII^e siècle, donnerait toute sa puissance à la mécanique newtonienne². Les lois du mouvement des corps, ensemble de points matériels pour Newton seraient ensuite étendues aux corps solides et fluides, bénéficiant en même temps de grands progrès dans le traitement mathématique. Ces développements se poursuivirent au long des deux siècles après la publication des *Principia*, aboutissant au plein développement de la mécanique et de la physique classique, de Leonhard Euler, Alexis Clairaut et Jean d'Alembert à Louis Joseph Lagrange et Pierre Simon Laplace, puis à William Rowen Hamilton, et se prolongent jusqu'à la fin du XIX^e siècle.

Mais, déjà avant la fin de cette période, on voit apparaître des éléments qui allaient à terme entraîner des modifications radicales pour le concept de vitesse. Ce sont (outre certaines difficultés conceptuelles de la mécanique newtonienne telles que le caractère absolu et inobservable du temps, de l'espace (et de la vitesse), criquées de Leibniz à Berkeley et à Mach) l'invariance de la vitesse de la lumière et la propagation à vitesse finie des champs d'interaction.

¹ $m\Delta v = F$. Il s'agit en fait de $m \frac{dv}{dt} = F$ (ou $F = m\gamma$), mais cette notation ne serait acquise qu'une quarantaine d'années après la première publication des *Principia*.

² $v = \frac{dx}{dt}$, $\gamma = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$.

4

INSTANTANEITE OU VITESSE FINIE.
DES PARADOXES DE LA LUMIERE
A LA PROPAGATION DES CHAMPS

Galilée fut, semble-t-il, le premier à penser que la lumière se propage en un temps fini et à imaginer une expérience pour mesurer sa vitesse (dans ses *Discours et démonstrations sur deux sciences nouvelles*). Mais les moyens dont on disposait à l'époque n'auraient pu permettre de distinguer, par une observation terrestre, une vitesse finie aussi grande d'une vitesse infinie. Descartes pensait, au contraire, que la lumière se propage instantanément. C'est Olaf Römer qui mit en évidence le caractère fini de la vitesse de la lumière et en détermina la valeur par la mesure, en 1675-1676, à l'Observatoire de Paris dirigé par Jacques Cassini. Il y parvint en observant les révolutions des satellites de Jupiter (les "planètes médicéennes" découvertes par Galilée en 1609) à l'aide d'une lunette de Galilée.

Chargé de vérifier les tables du mouvement des "lunes de Jupiter", Römer remarqua que leurs occultations (éclipses) souffraient d'un retard systématique sur une période de six mois, tout en reprenant la même valeur au bout d'un an. Il eut l'idée d'interpréter ce retard par le temps fini que met la lumière pour parvenir des lunes de Jupiter à la Terre, qui dépend de la distance entre les deux planètes, et donc de la position de la Terre sur son orbite autour du Soleil.

Römer effectua des mesures à six mois d'intervalle, pour une différence de parcours des rayons lumineux égale au diamètre de l'orbite terrestre, ce qui lui donnait la vitesse de la lumière (comme le parcours divisé par le temps du retard entre les deux positions de la terre sur son orbite à six mois d'intervalle). Cette première détermination de la vitesse de la lumière pour l'espace vide interplanétaire donnait environ 310 000 kms/sec, ce qui est très près de la valeur actuellement admise.

Plus tard, en 1738, James Bradley expliqua l'aberration des étoiles par la composition (en grandeur et direction) de la vitesse de la lumière et de celle d'entraînement de la lunette liée au mouvement de la Terre dans sa course autour du Soleil. La vitesse de propagation dans un milieu réfringent en mouvement, fit l'objet de l'hypothèse de l'"entraînement partiel" de l'éther, par Fresnel, en 1818 (dans le cadre de sa théorie ondulatoire), pour rendre compte aussi bien de l'aberration des étoiles que d'expériences d'Arago sur le prisme entraîné dans le mouvement de la Terre, faites vers 1810, qui montraient le maintien de la validité de la loi de la réfraction dans le mouvement d'entraînement de la Terre. L'hypothèse de Fresnel revient à supposer qu'une compensation à la modification de la vitesse de la lumière par le mouvement des corps a lieu naturellement, exprimée à l'aide du

“coefficient de Fresnel”³.

Une expérience célèbre de Fizeau, faite en 1851, sur la lumière (d'origine terrestre) traversant un courant d'eau, vérifia le bien-fondé de la formule de Fresnel. Plus tard, vers 1874, E. Mascart, A. Potier et W. Veltman montrèrent que l'ensemble des lois de l'optique restent les mêmes que l'on considère les corps au repos ou en mouvement, grâce à l'effet du coefficient de Fresnel, qui porte sur l'approximation “au premier ordre de l'aberration”, c'est-à-dire en $\frac{v}{c}$. Des expériences aux ordres supérieurs furent effectuées par la suite, notamment celle (au second ordre) de Michelson et Morley, en 1886, montrant que les lois de l'optique sont encore vérifiées.

La théorie électromagnétique de Lorentz, formulée (en 1895) à partir de celle de Maxwell pour les corps en mouvement dans l'hypothèse d'un éther optique et électromagnétique immobile (comme celui de Fresnel), permettait de retrouver ce coefficient directement par le calcul. Mais elle ne réussissait pas à rendre compte de manière naturelle des résultats aux ordres supérieurs. Il faudrait attendre la théorie de la relativité restreinte d'Einstein pour trouver l'explication simple des propriétés paradoxales de la vitesse de la lumière, dans une nouvelle conception de la vitesse, établie sur la constance absolue de la vitesse de la lumière, et qui ferait d'elle une limite absolue de toutes les vitesses.

Ainsi le caractère fini de la vitesse de la lumière contenait-il en germe la nécessité de modifier les conceptions sur les propriétés de la vitesse en général. Mais il ne fut pas vu immédiatement de cette façon. Cette conséquence ne s'imposa que tardivement, bien après que l'on ait compris que les actions (électrique, magnétique, et plus tard gravitationnelle) se font aussi à vitesse finie. L'absence d'action instantanée entraînait le caractère relatif de la simultanéité, qui allait obliger à repenser la signification physique du temps et de l'espace et, à leur suite, de la vitesse.

La propagation des champs à vitesse finie, considérée pour les champs électrique et magnétique par Michael Faraday (vers le milieu du XIX^e siècle), constitue un élément fondamental dans les transformations du concept de vitesse encore à venir. Elle n'apparut reliée à la vitesse de la lumière que lorsque la théorie électromagnétique de Maxwell accorda à cette dernière un rôle central pour la pensée de l'unification des champs : la vitesse de la lumière est aussi la vitesse de propagation du champ électromagnétique, et la lumière elle-même est une onde électromagnétique (la théorie de Maxwell inclut aussi l'optique). Elle coexiste cependant, jusqu'à la fin du siècle, avec l'idée d'action instantanée pour la gravitation, selon la théorie de Newton. Laplace avait bien fait des calculs en supposant que l'attraction d'un corps à un autre est différée dans le temps, par suite d'une vitesse finie, mais il avait conclu que la vitesse de propagation de la gravitation devrait être extrêmement élevée, très supérieure à la vitesse de la lumière

³ Pour un milieu réfringent, la vitesse de la lumière dans le milieu en mouvement (avec une vitesse v) est donnée par $V' = \frac{c}{n} + \alpha v$, avec $\alpha = (1 - \frac{1}{n^2})$, α étant le coefficient de Fresnel (et c la vitesse de la lumière dans le vide).

(en fait, 10^7 fois celle-ci). Il gardait donc l'action instantanée.

Un siècle plus tard, Henri Poincaré confirmait ces calculs, mais faisait valoir la limitation des hypothèses considérées par Laplace. Lorsqu'il étendit, en 1905, le principe de relativité (dans le sens restreint) à la gravitation, il fit remarquer qu'elles hypothèse n'étaient plus de mise avec le rôle désormais accordé à la vitesse de la lumière et avec la nouvelle loi relativiste de composition des vitesses ; la gravitation devait aussi être transmise avec cette même vitesse. C'est elle aussi qu'Einstein prit pour vitesse de propagation du champ de gravitation dès son premier travail sur ce sujet, en 1907. Il aura fallu, de fait, les conceptions de la relativité restreinte, pour faire de la propagation à vitesse finie un caractère universel des champs d'interaction.

5

LA RECONSTRUCTION DE LA VITESSE DANS LA THEORIE DE LA RELATIVITE

La troisième et dernière période de notre histoire commence donc avec la prise de conscience pleine et entière de la nécessité représentée par les développements qui précèdent, qui s'exprime dans la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, formulée en 1905. Elle se prolonge jusqu'à nos jours, la reconstruction de la vitesse s'étant accompagnée d'autres développements et implications liés aux théories de la physique et à la cosmologie.

La fin de l'idée newtonienne d'action instantanée à distance et sa substitution par celle d'actions propagées de proche en proche à vitesse finie entraînent, en définitive, la critique de l'idée de simultanée absolue entre des événements et la suppression de l'idée de temps absolu. Cela devait occasionner une nouvelle mutation du concept de vitesse. L'analyse critique de l'idée de simultanéité, qui y joue un rôle décisif, incorpore pleinement à la physique le caractère fini des vitesses de propagation, toutes les vitesses étant rapportées à la vitesse de la lumière dans le vide conçue comme invariant absolu, indépendant du mouvement, et vitesse limite.

Ces considérations, développées surtout par Einstein à partir d'un travail théorique sur l'électrodynamique, durent beaucoup aux réflexions critiques sur l'espace et sur le temps absolus de la physique classique proposées notamment par Ernst Mach et Henri Poincaré. La vitesse de la lumière dans le vide, ainsi promue au rang de constante universelle, vit ensuite exprimer sa signification profonde comme la constante de structure de l'*espace-temps*.

La question de la vitesse est au cœur de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. Celle-ci met en effet en avant, comme les deux principes sur lesquels elle se fonde, deux propositions ayant trait à la vitesse. La première est la *relativité des mouvements* d'inertie (c'est-à-dire rectilignes et uniformes, de *vitesses*

constantes en grandeur et direction, le repos en étant un cas particulier) pour les lois physiques ou, de manière équivalente, l'*invariance* des lois physiques pour l'ensemble de tels mouvements. (Ultérieurement, la limitation à cette classe de vitesses serait abrogée par la relativité générale, par la considération d'invariance pour tous les mouvements de *toutes les vitesses*).

La seconde proposition est la constance de la *vitesse de la lumière* indépendamment du mouvement de sa source (noyau de la théorie de Maxwell, en tant que vitesse des ondes électromagnétiques, valide pour le système au repos de l'éther). La première oblige d'étendre la seconde à tous les mouvements d'inertie (le principe de relativité exigerait une même équation des ondes électromagnétiques dans tous les systèmes de référence, et donc en particulier une même valeur de la vitesse de la lumière dans tous ces systèmes). Mais entre les deux se tenait (à l'époque d'Einstein) la règle galiléenne de composition des vitesses, qui les rendait incompatibles (selon cette règle, les vitesses s'ajoutent géométriquement). Tous les phénomènes mécaniques, optiques et électromagnétiques connus semblaient respecter la relativité des mouvements : il y avait donc un désaccord à cet égard entre les phénomènes et la théorie. C'est cette règle des vitesses qu'Einstein décida d'abandonner aux prix d'une reformulation de l'espace et du temps, qui soumettait ces derniers, pour en faire des grandeurs réellement physiques, aux deux principes indiqués.

On voit combien la question de la signification physique de la vitesse fut décisive dans ces développements. Il fallait, en vérité, que la vitesse de la lumière ne change pas, même quand on la composait avec une autre vitesse quelconque, ce qui relevait d'une propriété de la cinématique nouvelle qu'il fallait instaurer. Cette cinématique fut obtenue par l'explicitation du lien existant entre les coordonnées d'espace et le temps pour qu'une relation physique soit possible entre deux points de l'espace en fonction du temps, cette liaison étant "réalisée" par des transmissions (à vitesse finie) de signaux de positions et d'indications d'horloges.

Dans la transformation qui fait passer d'un référentiel à un autre en mouvement (rectiligne et uniforme) relatif, le temps entre dans l'expression des coordonnées d'espace, et l'espace entre dans les coordonnées de temps. Il n'y a plus de temps ni d'espace absolus et séparés, les deux sont liés et relatifs, et la simultanéité de deux événements est toujours relative au système où l'on se trouve. Cette relativité de la simultanéité ressort directement du fait que la transmission de signaux pour en juger se fait à vitesse finie.

Des formules de transformation des coordonnées et du temps, découle une nouvelle loi de composition des vitesses, qui n'est plus simplement additive mais modulée par un facteur (inférieur à l'unité) tel que la vitesse résultante reste dans tous les cas inférieure ou égale à la vitesse de la lumière⁴. La formule relativiste de composition fait immédiatement voir le rôle parfaitement symétrique

⁴ Loi des vitesses de Galilée : $u=v+w$; loi des vitesses d'Einstein-Poincaré : $u = \frac{v+w}{1+\frac{vw}{c^2}}$. La

composition de n'importe quelle vitesse avec la vitesse de la lumière donne encore la vitesse de la lumière.

des vitesses qui interviennent, ce qui est l'expression directe de la relativité des mouvements (aucun n'est privilégié). Elle montre aussi que toutes les transformations par mouvements d'inertie forment un groupe (au sens mathématique).

La relation entre l'espace et le temps, qui se manifeste dans la forme d'une quantité invariante ($s^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - c^2 t^2$), peut être exprimée d'une manière mathématique qui montre immédiatement la "solidarité organique" de ces grandeurs, en en faisant les quatre dimensions d'une même variété, l'espace-temps (le temps étant une quatrième coordonnée, $x_4 = ict$). C'est la représentation proposée dès 1907 par Hermann Minkowski. La vitesse de la lumière y joue le rôle fondamental de "constante de structure" de l'espace-temps. Il n'est dès lors plus étonnant qu'elle soit une vitesse limite, si c'est par la définition même du lien de l'espace et du temps pour les événements physiques.

La représentation géométrique de l'espace-temps à quatre dimensions (on peut la ramener à un diagramme à deux dimensions, une pour la coordonnée variable d'espace, l'autre pour le temps) met en relief sa division en trois régions, caractérisées par trois catégories de relations distances-temps, c'est-à-dire de vitesses : le "cône de lumière" (le rapport des distances aux intervalles de temps y est égal à la vitesse de la lumière), la "région temps" (où des actions physiques causales, c'est-à-dire effectuées à des vitesses inférieures à celle de la lumière, sont possibles) et la "région espace" (sans connexions physiques).

On remarque que la loi de composition relativiste des vitesses a une forme hyperbolique, c'est-à-dire que l'espace des vitesses relativistes n'est pas euclidien mais hyperbolique (ou lobachevskien). Il est possible de faire un changement de variable qui remplace la vitesse par une autre grandeur (appelée "vélocité"), de telle sorte que la loi de composition entre les "vélocités" soit additive, ce qui fait retrouver la loi simple d'addition, parfois plus facile à utiliser, car plus directement intuitive⁵.

Avec la relativité restreinte, la vitesse perd de son importance par rapport aux lois physiques, en exprimant l'équivalence de tous les mouvements d'inertie. La relativité générale perpète plus encore ce détronement, en supprimant pour ainsi dire tout intérêt aux vitesses de tous les mouvements, en les rendant équivalentes. Elle abolit, en effet, toute distinction fondamentale entre tous les genres de vitesses, uniformes et variables, en les incorporant dans la structure de l'espace-temps. Du moins, une seule vitesse présente-t-elle de l'intérêt dans les deux cas : celle de la lumière, responsable de la couture ensemble de l'espace et du temps, c'est-à-dire de la couture de l'espace-temps, globalement pour la première, localement pour la seconde.

Dans la théorie de la relativité générale, en effet, où la forme de la structure de l'espace-temps, donnée par la métrique, inclut les champs de gravitation, la vitesse de la lumière n'a qu'un caractère local (elle est constante localement, dans l'hyperplan tangent en un point de l'espace-temps).

D'autres implications du concept de vitesse ont accompagné depuis la

⁵ $V = chv$ (ch : cosinus hyperbolique).

relativité restreinte et jusqu'à nos jours les développements de la physique, dans deux directions principales : celle de la physique quantique, d'une part, avec la mécanique quantique, non relativiste puis relativiste, prolongée en théorie quantique des champs et des particules atomiques et subatomiques, avec les développements récents des théories de champs de jauge et symétries ; et celle, d'autre part, de l'astrophysique et de la cosmologie contemporaine (laquelle a pris son départ dans la direction de la relativité générale).

La propriété duale des éléments de matière qui se présentent tantôt comme des ondes et tantôt comme des particules a été mise en évidence à partir du fait que la lumière a une impulsion : la quantité de mouvement du quantum lumineux fut démontrée théoriquement par Einstein en 1916, et expérimentalement par l'effet Compton (conservation de l'énergie-impulsion dans l'interaction photon-électron) quelques années plus tard. Dans la physique classique, l'impulsion (ou quantité de mouvement) était définie, pour un corpuscule, par le produit de la masse par la vitesse ; mais la relativité restreinte, avec l'équivalence de la masse et de l'énergie, permettait de continuer à donner un sens à l'impulsion, même quand la masse d'une particule est nulle et que sa vitesse est toujours égale à celle de la lumière. Cela signifiait en même temps un dépassement de la *vitesse* comme grandeur significative dans la dynamique au profit de l'*impulsion*, déjà apparent d'ailleurs en physique classique avec le formalisme hamiltonien.

La mécanique quantique posa des limitations au concept de vitesse et à celui d'impulsion par les relations d'“indétermination” de Heisenberg. Mais l'impulsion ne continue pas moins à jouer un rôle important dans les développements ultérieurs de la physique. N'évoquons que la question actuelle de la masse des neutrinos, qui n'est peut-être pas nulle : leurs vitesses seraient alors différentes de la vitesse de la lumière, et cela aurait des implications à différents niveaux, notamment en astrophysique. Ou encore le fait que la vitesse de propagation des champs d'interaction est liée à la masse de leurs particules (quantiques) ou bosons d'échange : elle est égale à celle de la lumière pour des bosons d'échange de masse nulle, comme c'est le cas du champ électromagnétique (photon) et celui du champ de gravitation (graviton), et en diffère pour les bosons lourds comme ceux des interactions faibles, dans les régions d'énergie où ces masses sont sensibles. La vitesse intervient encore comme un paramètre significatif dans certains phénomènes d'interactions dont elle détermine la durée (très petite) pour une densité très élevée de matière-énergie, comme dans le cas des plasmas de quarks et de gluons.

En astrophysique et en cosmologie, la vitesse intervient de multiples façons. On s'en tiendra à mentionner la question du rapport de la vitesse et de l'horizon dans le cas des trous noirs, et celle des vitesses de récession des galaxies, liée à la vitesse d'expansion de l'Univers (par la constante de Hubble), sur laquelle règnent encore des incertitudes. Et, pour terminer, les vitesses des diverses phases de l'Univers primordial, dominées par les lois des champs de jauge dont les symétries se brisent en les différenciant. L'ensemble dresse un panorama de la séquence des vitesses de déroulement des événements dans l'Univers, et du déploiement de l'“espace-temps-matière” identifié à ce dernier.

BIBLIOGRAPHIE SUCCINCTE

- ARISTOTE, *La Physique*, Trad. et notes, Vrin, Paris ; *Traité du Ciel*, Trad. et notes par J. Tricot, Vrin, Paris, 1949 ; De la génération et de la corruption, Trad. et notes par J. Tricot, Vrin, Paris, 1971 ; *Métaphysique*, Trad. et notes par J. Tricot, 2 vols., Vrin, Paris, 1970.
- AUDOUZE, Jean, MUSSET, Paul, PATY, Michel (éds.) [1990]. *Les particules et l'Univers*, Presses Universitaires de France, Paris, 1990.
- DESCARTES, René [1964-1974]. *Oeuvres de Descartes*, publiées par Charles Adam et Paul Tannery, 11 volumes (1ère éd., 1896-1913) ; nouvelle édition révisée, 1964-1974; ré-éd., 1996.
- DUHEM, Pierre, *Le système du monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, Hermann, Paris, 10 vols., 1913-1959.
- EINSTEIN, A., *Oeuvres choisies, 2 et 3 : Relativités I et II*, éd. par F. Balibar, O. Darrigol, J. Stachel et al., Paris, Seuil, 2 vols., 1993.
- GALILEI, Galileo (Galilée), *Discours et démonstrations concernant deux sciences nouvelles* (1638), trad. fr. par M. Clavelin, A. Colin, Paris, 1970.
- KOYRE, Alexandre, *Etudes galiléennes* (1935-1939), Hermann, Paris, 1966 ; *Etudes newtoniennes*, (1965), Gallimard, Paris, 1968.
- LLOYD, Geoffrey, *Les débuts de la science grecque, de Thalès à Aristote*, Trad. de l'anglais par Jacques Brunschwig, Maspero, Paris 1974.
- NEWTON, Isaac, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Société Royale, Londres, 1687; 3ème éd., 1926; trad. en anglais par Andrew Motte, révis. et éd. par Florian Cajori, University of California Press, Berkeley, 1934; ré-impr., 1962, 2 vols.
- PATY, Michel, *La matière dérobée*, Archives contemporaines, Paris, 1988 ; *Einstein philosophe*, Paris, PUF, 1993 ; Sur l'histoire du problème du temps : le temps physique et les phénomènes, in Klein, E. et Spiro, M. (éds.), *Le temps et sa flèche* (1994), 3è éd., Flammarion, Paris, 1996, p. 21-58 ; Poincaré et le principe de relativité, in Greffe, J.-L., Heinzmann, G. et Lorenz, K. (éds.), *Henri Poincaré. Science et philosophie*, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996, p. 101-143 ; Galilée et la mathématisation du mouvement, *Passages*, n°76, avril-mai 1996, 49-53 ; Le vide matériel, ou : La matière crée l'espace, in Diner, S. et Gunzig, E. (éds.), *Le vide. L'autre côté de la matière*, Editions de l'Université de Bruxelles, 1997 ; 'Mathesis universalis' et intelligibilité chez Descartes, in Chemla K. et al (éds.), *Ceci n'est pas un Festschrift. Mélanges offerts à Imre Toth* , à paraître ; Le coefficient de Fresnel et la vitesse de la lumière, *Revue d'Histoire des sciences*, à paraître.

RESUME.

Après avoir rappelé quelques éléments de nature générale, anthropologique et culturelle, mais aussi physiologique, sur la notion de vitesse, préalables à sa constitution en concept scientifique, nous parcourons les étapes importantes de l'histoire de sa conceptualisation physique. Nous ferons débiter la première avec Aristote et la conception qualitative du mouvement, en la faisant se poursuivre jusqu'aux Médiévaux et à la Renaissance, avec la doctrine de l'*impetus*, la distinction entre mouvement naturel et mouvement violent, et l'absence, voire l'impossibilité, d'une véritable mathématisation. La deuxième période est celle de la formulation de lois du mouvement par la mathématisation de la vitesse, de Galilée à la mécanique de Newton et à la physique classique, où la puissance du concept s'établit dans son expression par le calcul différentiel. La troisième période est celle de la prise en compte des actions propagées de proche en proche à vitesse finie, de la critique de la simultanéité, de la vitesse de la lumière comme vitesse limite : la théorie de la relativité reconstruit la vitesse sur une nouvelle conception de l'espace et du temps. Cette période se prolonge plus récemment dans d'autres aspects qui concernent la physique des particules quantiques et la cosmologie.