

progrès de la technique : roues hydrauliques, machines de Watt – sources d'énergie des usines de la première révolution industrielle (filatures, minoteries, forges, etc.).

Coriolis était un « ingénieur-savant ». Ce joli nom a été donné par l'historien et philosophe des sciences britannique Ivor Grattan-Guinness, l'un des meilleurs analystes de la période, à la trentaine de savants français œuvrant entre 1800 et 1840, presque tous issus de cette École polytechnique qui correspondait au projet qu'avaient Monge et la Convention de donner des forces vives à une France nouvelle.

Ingénieurs, ils aidaient au développement de l'industrie grâce à leurs connaissances scientifiques ; savants, ils faisaient avancer la science en lui adjoignant de nouvelles branches qu'ils théorisaient, s'appuyant sur leur expérience d'ingénieur. C'étaient, entre autres, Coriolis, Poncelet et la théorie des machines, Navier et l'hydraulique, Lamé et la résistance des matériaux, Fresnel et l'optique.

Des machines à la science

Contrairement à une image répandue, la science n'a pas toujours précédé la technique : à ce moment-là, elle rattrapait à marche forcée la technique – on savait faire fonctionner une machine à vapeur avant que Sadi Carnot (autre ingénieur-savant polytechnicien) ne jette, en 1824, les bases de ce que l'on nommera la thermodynamique.

La « mécanique appliquée », expression qui peut qualifier une partie des nouveaux domaines ci-dessus (la théorie des machines, l'hydraulique, la résistance des matériaux), venait compléter la mécanique dite rationnelle, celle de Lagrange, de Poisson et des mathématiciens, encore appelés géomètres à l'époque.

À la mécanique rationnelle, fondée sur la notion de force et qui pouvait rester purement conceptuelle, la mécanique appliquée apportait des éléments de réalité physique : les frottements, les chocs, les machines et leur mouvement. Mathématiciens par leur formation polytechnicienne et ingénieurs et d'une certaine manière physiciens (ce terme était encore fort peu employé), car

en contact avec la réalité, ces ingénieurs-savants étaient les mieux placés, à cette charnière entre mathématiques et physique, entre théorie et pratique, pour révéler ces apports de la mécanique appliquée à la science fondamentale.

Et, si l'on affine cette caractérisation, on peut placer Coriolis plus certainement du côté de la théorie que de la pratique : par son tempérament, par le caractère très mathématique de ses écrits, par le déroulement académique de sa carrière.

Après avoir formalisé la notion de travail, Coriolis lui donne une véritable cohérence en l'appliquant à de nombreux champs : raideur d'un ressort, roulage des voitures à chevaux, roues hydrauliques et même jeu de billard. Il définit le travail moteur, le travail résistant, le principe de transmission du travail, etc. Unissant par ce fil directeur divers objets et divers concepts, il a l'ambition de bâtir une véritable théorie du travail, expression qui revient souvent sous sa plume et qui pourrait caractériser son œuvre. Même si la formule a un aspect d'oxymore, Coriolis a été, de façon déterminante, un théoricien de la mécanique appliquée.

C'est du sein de cette mécanique appliquée qu'a jailli la célèbre force de Coriolis. Pour notre ingénieur-savant, il s'agissait initialement de rectifier une erreur commise par son collègue Jean-Victor Poncelet (lui aussi polytechnicien) dans la conception

L'AUTEUR

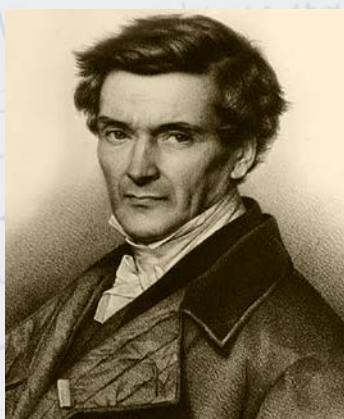


Alexandre MOATTI est ingénieur en chef des Mines et chercheur associé à l'Université

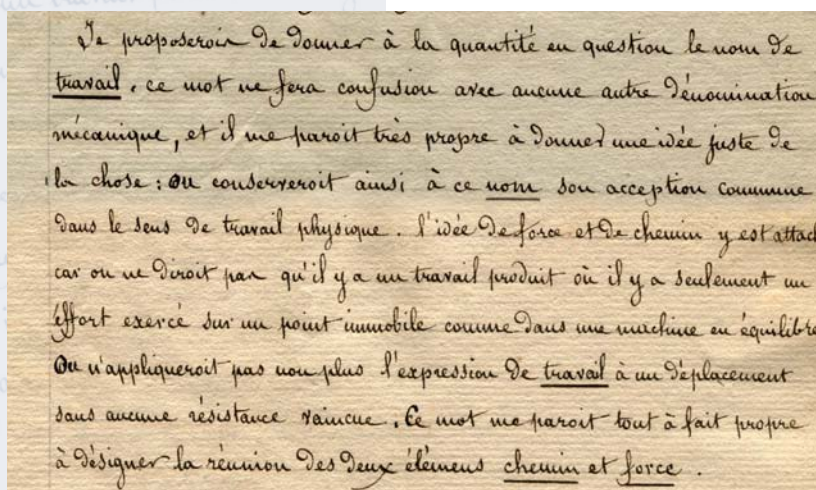
Paris-Diderot. Il est l'auteur du blog *Alterscience* sur la plate-forme SciLogs.fr (www.scilogs.fr/alterscience/).

BIBLIOGRAPHIE

A. Moatti, *Le mystère Coriolis*, CNRS Éditions, 2014.



Domaine public



Académie des sciences - Institut de France

1. PORTRAIT DE CORIOLIS ET UN PASSAGE de son manuscrit où il définit la notion de travail (pochette de la séance de l'Académie des sciences du 7 août 1826).

de sa roue à aubes courbes – qui avait pourtant reçu le prix de mécanique de l'Académie des sciences en 1825 ! Le mouvement de la goutte d'eau dans l'aube n'est pas le même à son arrivée (« amenée d'eau ») qu'à son départ (« dégagé d'eau ») : la roue a tourné entre-temps, et l'aube n'a plus la même inclinaison par rapport à la verticale, donc la gravité n'intervient pas de la même façon.

De la roue à aubes à la force de Coriolis

Coriolis prend le sujet dans sa plus grande généralité dynamique. En 1831, il étend au mouvement relatif la portée du principe des forces vives (ou de son nouveau « principe du travail »), en ajoutant le travail des forces d'entraînement. Ainsi, l'étude du mouvement de l'eau dans l'aube nécessite d'appliquer, dans le repère lié à l'aube, une force d'entraînement due au mouvement de la roue. Chacun a déjà fait l'expérience d'une force d'entraînement (ou force d'inertie, ou force centrifuge quand il s'agit d'une rotation) dans un train en mouvement ou le conçoit dans l'essorage d'une machine à sécher le linge.

Dans un second article, en 1835, Coriolis généralise son étude : dans le repère relatif,

il faut ajouter aux forces d'entraînement (F_e) les « forces centrifuges composées », égales « au double du produit de la vitesse angulaire des plans mobiles multipliée par la quantité de mouvement relatif projetée sur un plan perpendiculaire à cet axe » – soit le produit vectoriel $2m \mathbf{v} \wedge \boldsymbol{\Omega}$ où $\mathbf{v}$ est le vecteur vitesse relative (par exemple par rapport à l'aube), et $\boldsymbol{\Omega}$ le vecteur vitesse de rotation du repère (dirigé selon l'axe de rotation et ayant pour norme la vitesse angulaire de rotation). C'est l'expression de la force de Coriolis (F_c) telle qu'elle apparaît dans son calcul, et qui aboutit à une généralisation du principe de Newton (de $F = ma$ à $F + F_e + F_c = ma$, où a est ici le vecteur accélération dans le repère mobile).

On a mis du temps à comprendre la portée du résultat de Coriolis. Encore de nos jours, son approche par la dynamique est délaissée au profit d'une démonstration cinématique, plus accessible. Après la mort de Coriolis, le mathématicien et futur mandarin Joseph Bertrand (1822-1900) crut bon d'indiquer que c'était Clairaut qui avait trouvé le même résultat un siècle auparavant, ce qui est faux.

C'est finalement Charles-Eugène Delaunay (1816-1872, polytechnicien comme Bertrand) qui, 15 ans après la mort de Coriolis,

fera le lien entre cette force F_c et des effets jusqu'alors inexplicables : la rotation du pendule de Foucault, le gyroscope, la déviation des corps vers l'Est dans l'hémisphère Nord, l'érosion unilatérale des rives des cours d'eau...

Dans cette même période, le météorologue américain William Ferrel (1817-1891) a mis en évidence des termes analogues à ceux de Coriolis. Ce n'est pas le moindre des paradoxes que constater que la force de Coriolis a trouvé de nos jours une universalité dans de nombreuses branches de la physique (météorologie, climatologie, géomagnétisme, astronomie...) fort éloignées de la théorie des machines chère à son inventeur !

Et l'homme, Coriolis ? Comme l'écrit joliment Erik Orsenna (*Portrait du Gulf Stream*, 2005), « Rien n'indique que notre Gaspard-Gustave ait jamais mis le pied sur un bateau ni qu'il se soit jamais intéressé à la mer. Le fait est là : pour les siècles des siècles, Coriolis est celui qui a expliqué l'influence de la rotation de la Terre sur le parcours des vents et des courants. »

On peut même aller plus loin : hormis quelques voyages d'études, missions et cures thermales en province, rien n'indique que Coriolis soit souvent sorti d'un petit périmètre parisien allant de la rue Descartes (École polytechnique) à la rue des Saints-Pères (École des Ponts et Chaussées).

Ces deux noms de rues ont d'ailleurs une forte charge symbolique : Coriolis alliait une rationalité scientifique dans sa vie professionnelle à une certaine ferveur religieuse dans sa vie personnelle. Mais jamais ces deux sujets n'étaient mêlés chez lui. Il vivait pour la science et pour l'enseignement – il est resté célibataire. Il avait une personnalité réservée et une vie recluse et sédentaire. Il ne mélangeait pas ses opinions politiques, plutôt royalistes et conservatrices, à sa pratique professionnelle – y compris durant la brève période où il occupa le poste de responsabilité de directeur des études à Polytechnique.

Si on le compare à d'autres savants qu'il a fréquentés, issus des mêmes études que lui, il n'a pas quitté la France pour des raisons politiques comme l'a fait Cauchy en 1830, il n'est pas devenu un homme politique comme Arago ou Le Verrier.

Des forces vives à l'énergie cinétique

Le « principe des forces vives », énoncé sous sa forme générale par Joseph-Louis Lagrange, ne nous parle plus guère. Il stipulait que la variation de la force vive mv^2 entre un état initial et un état final est $mv_f^2 - mv_i^2 = 2 \int_i^f \Sigma F dx$.

Si l'on note $2W$ le membre de droite, W représente la somme des produits $F dx$, où F est la force appliquée au mobile le long d'un déplacement élémentaire dx . La quantité W était nommée indistinctement moment d'activité, quantité d'action, etc.

En divisant par 2 les deux membres de la rela-

tion ci-dessus, Coriolis a redéfini la force vive : « Cette force vive n'est que la moitié du produit de ce qu'on a désigné jusqu'à présent par ce nom, c'est-à-dire de la masse par le carré de la vitesse. »

Il a aussi nommé « travail » ce qui reste à droite de la relation, à savoir la quantité W . Le

pas franchi par Coriolis paraît anodin, mais la relation réécrite sous la forme

$$\frac{1}{2} mv_f^2 - \frac{1}{2} mv_i^2 = W$$

nous est aujourd'hui bien plus familière et signifie, en termes modernes, que la variation de l'énergie cinétique ($\frac{1}{2} mv^2$) d'un mobile est égale au travail des forces qui lui ont été appliquées. Bien que l'énergie cinétique et d'autres concepts tels que l'énergie potentielle n'ont été définis que bien plus tard, Coriolis a été un maillon important dans la chaîne qui a conduit jusqu'à eux.

Coriolis illustre aussi à quel point certains chercheurs sont faits pour la science et non pour « l'administration de la recherche ». En 1839, alors directeur des études à Polytechnique, il propose une réforme de l'enseignement dans la « filière polytechnicienne ». Ce projet de bon sens, adapté aux réalités et aux nécessités (par exemple celle d'exiger le maniement du calcul différentiel à l'examen d'entrée), se heurte au conservatisme du « clan Arago » – le Secrétaire perpétuel, président du Conseil de perfectionnement de Polytechnique et homme politique qu'était Arago était plus « libéral » dans sa vision politique que dans sa gestion des institutions.

Coriolis se remettra difficilement de l'échec de son projet de réforme, et surtout du mode d'opposition rencontré, qui n'avait rien de rationnel ! De même, les luttes de pouvoir et d'influence pour les postes de professeur

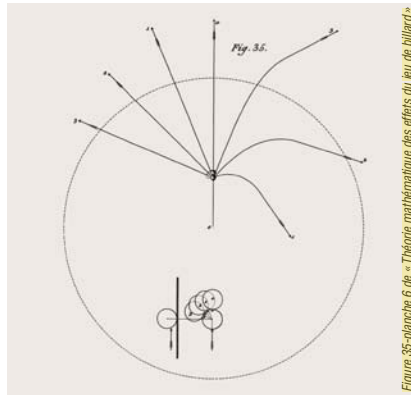


Figure 35: planche 6 de « Théorie mathématique des effets du jeu de billard »

2. CORIOLIS EST AUSSI l'auteur en 1835 d'une *Théorie mathématique des effets du jeu de billard*, qui faisait suite à l'invention par Maingaud, capitaine des armées napoléoniennes, de la « queue à procédé » (rondelle hémisphérique en bout de la queue de billard). Cette invention permettait les « effets rétro », où la bille revient en arrière après un choc.

ou de répétiteur, à propos desquelles son avis de directeur des études était fort important, ont pesé sur son entrain.

Les écrits personnels de Coriolis réservent aussi des surprises : une utopie sur le duel, où en homme profondément chrétien, il propose de substituer aux armes (qui favorisent l'offenseur s'il est bon épéiste ou tireur) un « séjour d'intérêt général » comme soignant dans un hôpital ; un écrit sur la musique religieuse, où il s'élève contre une tendance à privilégier la performance vocale ; des notes éducatives à sa sœur Cécile... Finalement, en plus d'une cohérence certaine dans son œuvre scientifique et son parcours, c'est aussi un homme attachant, avec ses projets et ses échecs, ses démêlés avec ses collègues, son caractère idéaliste et romantique, que nous avons eu le plaisir de découvrir. ■

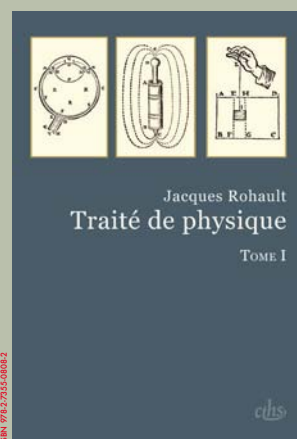
Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

une collection complète d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines



**Savants et inventeurs
entre la gloire et l'oubli**
Sous la direction de Patrice Bret
et Gérard Pajonk

136 pages
21 x 27 cm
br.
23 €



**Traité de physique
Tome I**
Jacques Rohault (1618-1672)

830 pages
15 x 22 cm
ill. j. br.
45 €

