

## GASPARD GUSTAVE CORIOLIS ET SES DEUX THÉORÈMES

**Anders Persson**

Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme  
Shinfield Park - Reading RG2 9AX  
ROYAUME-UNI

« Pour comprendre une science il est nécessaire de connaître son histoire. »  
Auguste Comte, 1798–1857.

### RÉSUMÉ

Gaspard Gustave Coriolis (1792-1843) a fait connaître une force inertielle, capitale pour la météorologie et l'océanographie, mais il est resté à peu près inconnu dans l'histoire des sciences. L'étude de sa carrière scientifique montre le lien entre la découverte de la « force de Coriolis » et les progrès mécaniques et industriels dans la France du début du XIX<sup>e</sup> siècle. L'approche originale de Coriolis est fondée sur la discussion de l'énergétique d'un système mécanique en rotation. Elle permet de comprendre d'une manière physique la dynamique des systèmes en rotation en général et d'importants aspects de la dynamique atmosphérique en particulier. La présentation traditionnelle de la force de Coriolis est purement cinématique ; sa nature physique est donc souvent mal comprise, ce qui peut gêner la compréhension des phénomènes atmosphériques.

### ABSTRACT

Gaspard Gustave Coriolis and his two theorems

Gaspard Gustave Coriolis (1792-1843) is an obscure figure who revealed the inertial force, of great importance in meteorology and oceanography, which was to be named after him. A study of his scientific career and achievements shows how closely the "Coriolis force" was linked to the mechanics and industrial developments of early 19th century in France. It also provides an alternative way to understand the dynamics of a rotating system and important features of the dynamics of the atmosphere in particular. The traditional way to derive the Coriolis force has been essentially cinematic, which has had the consequence that its physical significance has been misunderstood for certain aspects of the dynamics of the atmosphere.

Dans son *Traité sur le principe variationnel en mécanique*, Cornélius Lanczos (1893-1972) s'irritait que certains concepts physiques fondamentaux fussent considérés comme élémentaires et donc enseignés très tôt dans les cours, à un stade où l'esprit des étudiants n'est « pas mûr pour comprendre leur vraie signification ». Un même étudiant pouvait fort bien être familier des moindres détails d'un accélérateur de particules, mais ne comprendre que vaguement la différence entre le poids et la masse (Lanczos, 1949).

En météorologie, la **force de Coriolis** est l'un de ces concepts fondamentaux que l'on qualifie d'élémentaires et que l'on enseigne très tôt dans les cours. En raison du mouvement de rotation de la Terre, la force de Coriolis infléchit la trajectoire de tout corps en mouvement horizontal vers la droite dans l'hémisphère

nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud. Elle joue un rôle capital dans la formation de la circulation générale atmosphérique, le développement des tempêtes et la rotation des brises côtières. À cause d'elle, une boule de pétanque lancée à 3 m/s sur une surface plane ratera un cochonnet placé à une distance de 85 mètres<sup>(1)</sup>.

## EXPRESSION MATHÉMATIQUE

La force de Coriolis par unité de masse, ou **accélération de Coriolis**, s'obtient par un changement de coordonnées entre un référentiel (f) immobile par rapport aux étoiles et un référentiel (r) solide de la Terre, en rotation à une vitesse angulaire  $\omega$  (figure 1). La transformation s'écrit :

$$\frac{dB}{dt} \Big|_f = \frac{dB}{dt} \Big|_r + \omega \wedge B \tag{1}$$

où B est un vecteur quelconque. On applique (1) au vecteur position r et à la vitesse  $v = dr/dt$  ; en combinant les deux expressions, on obtient l'expression de l'accélération absolue a :

$$a = a_r + 2 \omega \wedge v_r + \omega \wedge (\omega \wedge r) \tag{2}$$

qui pour un observateur en rotation « semble » se décomposer en accélération relative  $a_r$ , en accélération de Coriolis  $2 \omega \wedge v_r$ , qui ne dépend que de la vitesse, et en accélération centrifuge  $\omega \wedge (\omega \wedge r)$  qui ne dépend que de la position. La force de Coriolis n'affecte que la composante de la vitesse qui est orthogonale à l'axe terrestre. À l'équateur, un objet en mouvement zonal est affecté par cette force, contrairement à une croyance répandue, mais la déviation a lieu dans un plan vertical (figure 1).

## CONFUSION ET FRUSTRATION

La démonstration de l'expression de la force de Coriolis est mathématiquement simple par rapport à d'autres problèmes que l'on rencontre en météorologie. Pourquoi donc cette confusion qui l'entoure ? Cela commence déjà dans la discussion de sa nature. Les ouvrages insistent souvent sur le fait que cette force est « fictive », « apparente », c'est une « pseudo-force » ou une « construction de l'esprit ». La force centrifuge, pourtant non moins fictive, est presque toujours traitée sans ces épithètes, ce qui laisse l'impression que certaines forces fictives sont plus fictives que d'autres.

Henry Stommel, le célèbre océanographe américain, avait conscience du sentiment de frustration qui envahissait les étudiants en météorologie et en océanographie lorsqu'ils rencontraient cette mystérieuse force de Coriolis à la fin d'une série de manipulations formelles : « Cramponnés à la main du professeur, ils sont menés le long d'une étroite passerelle au-dessus du gouffre béant qui sépare le référentiel au repos du référentiel en rotation. Terrorisés à l'idée de baisser les yeux et de voir l'eau noire et froide qui clapote entre le quai et le navire, nombreux sont ceux qui, une fois à bord, sont ravis de croire aveuglément en la force de Coriolis, persuadés qu'elle a été démontrée rigoureusement. Et certains préfèrent ne jamais plus regarder par-dessus le bord... » (Stommel et Moore, 1989, p. 2).

De nombreux livres de cours se gardent bien de fournir plus qu'une démonstration mathématique, ne se réfèrent au « paramètre de Coriolis » que comme une variable de plus dans les équations et laissent au lecteur la tâche d'en comprendre les aspects physiques et dynamiques. Genty (1994) a mis en garde contre la confusion qui s'ensuivait : « Les professeurs de météorologie et d'océanologie rencontrent actuellement de sérieuses difficultés auprès de leurs élèves en ce qui concerne l'introduction de l'accélération de Coriolis dans les équations du mouvement des courants aériens et marins à la surface du

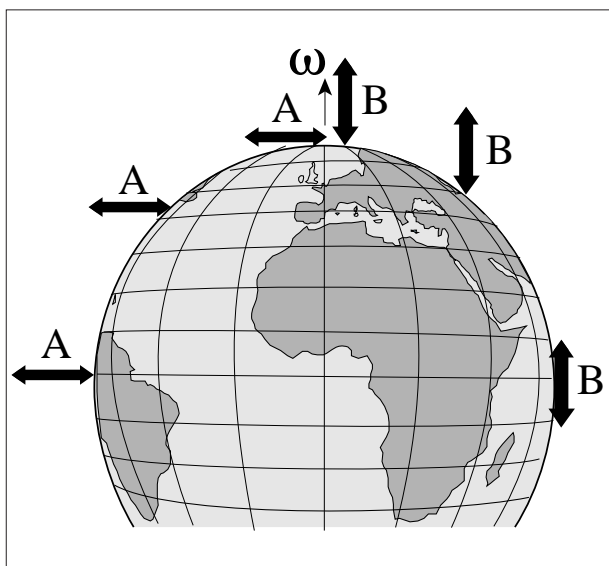


Figure 1 - L'accélération de Coriolis est le produit vectoriel entre le vecteur de rotation de la Terre et le vecteur vitesse par rapport à la Terre. Elle ne s'exerce donc que pour la composante A de la vitesse orthogonale à l'axe, pas pour des déplacements parallèles B. Elle s'exerce sur des courants verticaux et même sur des courants zonaux à l'équateur, mais la déviation est alors verticale.

(1) On suppose que la boule a un diamètre de 6 cm, le cochonnet un diamètre de 2 cm et on néglige les frottements (exemple inspiré par Holton, 1992, p. 24).

*globe. Les étudiants, tout en reconnaissant l'efficacité du procédé de Coriolis, éprouvent des scrupules à l'endroit du référentiel galiléen d'une part, et d'autre part ne saisissent pas bien sa signification physique, ce qui ne laisse pas de les troubler. »*

On montrera dans la suite de cet article que la difficulté dans l'enseignement de la force de Coriolis n'est pas sa démonstration mathématique, mais la compréhension de sa signification physique, que ce soit en météorologie, en océanographie ou même dans des problèmes mécaniques simples.

## UNE LITTÉRATURE TROMPEUSE

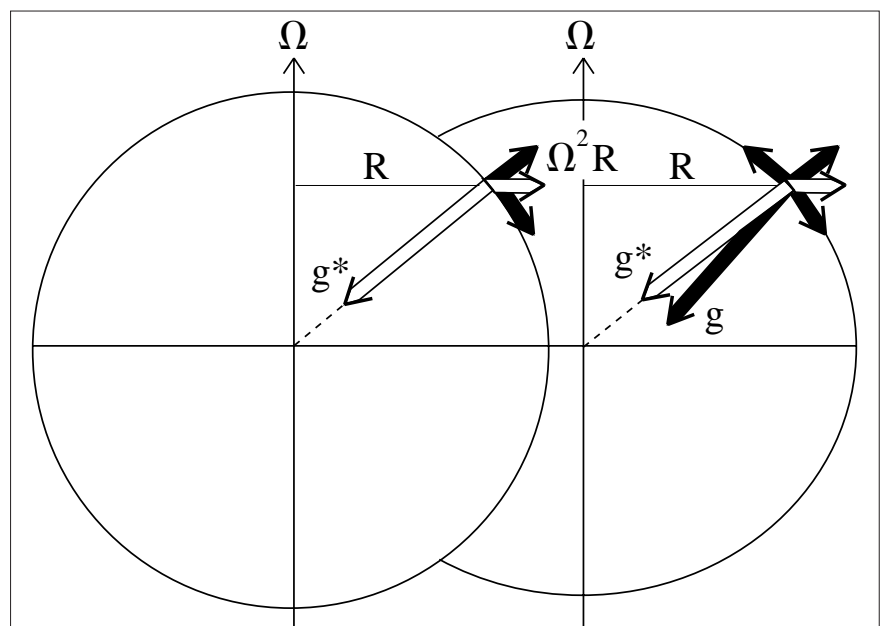
Une explication physique ne ressort pas automatiquement d'une démonstration mathématique, comme on peut le voir dans bien des ouvrages. Dans un souci de clarté pédagogique, certains auteurs expriment la force de Coriolis séparément pour des mouvements tangentiels et pour des mouvements radiaux<sup>(1)</sup>. Non seulement ce n'est pas aussi élégant et concis que les équations (1) et (2), mais cela complique les choses.

Pour un mouvement tangentiel (dans la direction de la rotation), la force de Coriolis est un terme qui s'ajoute à la **force centrifuge**  $\omega^2 r$ . Pour un mouvement radial, elle découle de la conservation du **moment cinétique**  $\omega r^2$  : plus on se rapproche de l'axe de rotation, plus la vitesse tangentielle est élevée. L'accélération correspondante est la force de Coriolis, dirigée perpendiculairement au mouvement radial.

Ici nous trouvons notre premier malentendu. Pour illustrer cela, de nombreux textes font référence à un manège ou à un tourne-disque. Ces exemples sont en fait très complexes, car le moment cinétique ne se conserve que s'il n'y a pas de couple par rapport à l'axe vertical. Une personne qui se déplace sur un manège exerce un couple par frottement sur la surface. La force centrifuge est souvent beaucoup plus intense que la force de Coriolis dans ces exemples ; pour s'en débarrasser, il faudrait imaginer une balle qui roule sans frottement sur un plateau en rotation, ce qui revient à la présentation traditionnelle à base de changements de référentiels.

Ces problèmes disparaissent dans les fluides géophysiques : la Terre étant un ellipsoïde, la force centrifuge est en équilibre avec l'attraction gravitationnelle pour un objet sur la surface sans frottement, tant que cet objet est immobile par

Figure 2 - L'équilibre entre la force centrifuge et l'attraction gravitationnelle. Lors de la formation du globe terrestre, la matière la plus légère s'est accumulée vers l'équateur. Il en résulte que la surface du globe est une surface ellipsoïdale (à droite) pour laquelle les composantes horizontales de la force centrifuge et de la gravitation sont en équilibre. À gauche, ce qui se passerait avec une Terre sphérique.



(1) Cf. Holton (1992) par exemple. Page 17, dans le calcul du déplacement radial avec conservation du moment cinétique, l'expression du changement de vitesse angulaire  $\frac{d\omega}{(r+dr)}$  est d'ailleurs incorrecte : si  $u$  est la vitesse tangentielle, la vitesse angulaire est  $\omega = \frac{u}{r}$  et le changement de vitesse angulaire est  $d\omega = -\frac{du}{r} - u \frac{dr}{r^2}$ .

rapport au sol (figure 2). Si l'objet bouge, ces forces ne sont plus en équilibre. Lors d'un déplacement vers l'est, la force centrifuge augmente et pousse vers l'équateur. Lors d'un mouvement vers l'ouest, la force centrifuge décroît et la gravitation tire l'objet vers le pôle le plus proche. Il y a donc composition de la force centrifuge et de la composante horizontale de la force de gravitation. Par commodité mathématique, on suppose souvent que la Terre est sphérique ; implicitement, c'est une hypothèse d'équilibre entre ces deux forces, seule la force de Coriolis  $2\omega \wedge v_r$  subsiste alors.

Maintenant, nous trouvons notre deuxième malentendu : la confusion entre **conservation du moment cinétique** et **conservation de la quantité de mouvement**. De nombreux ouvrages, après avoir correctement appliqué la conservation du moment cinétique dans leur démonstration mathématique, s'aventurent dans une « explication » selon laquelle l'air, dans son mouvement radial, change de vitesse relative parce qu'il arrive en des lieux où la vitesse de rotation de la Terre est différente. Ce raisonnement n'a rien à voir avec la conservation du moment cinétique ; il repose sur la conservation de la quantité de mouvement dans un référentiel galiléen. Il est trompeur car s'il implique une courbure de la trajectoire dans la bonne direction, il n'explique que la moitié de l'accélération de Coriolis. En réalité, deux effets mécaniques s'ajoutent : la conservation de la quantité de mouvement et la rotation du référentiel terrestre (Eliassen et Pedersen, 1977). Cela peut se comprendre d'une manière cinématique (figure 3).

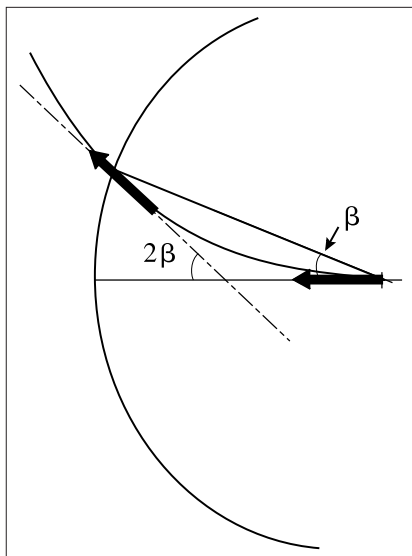


Figure 3 - La déviation due à la force de Coriolis est déterminée par  $2\omega$  et non  $\omega$ . Cela peut se voir par la cinématique : un déplacement rectiligne uniforme par rapport à un disque en rotation constitue une trajectoire courbe par rapport au référentiel galiléen. La vitesse par rapport à ce dernier aura tourné d'un angle  $2\beta$  lorsque le disque aura tourné de  $\beta$ .

Cette erreur remonte au XVIII<sup>e</sup> siècle, lorsque George Hadley (1682-1744), dans une discussion de la conservation de la quantité de mouvement, suggéra que la rotation de la Terre déviait les vents (cf. la reproduction de l'article de Hadley par Shaw, 1979). On ne réalisa que plus tard dans ce siècle que l'application de la conservation du moment cinétique, jusque-là limitée à la mécanique céleste (la seconde loi de Képler), pouvait être étendue à la mécanique conventionnelle. Le concept de force de Coriolis n'existait pourtant pas encore. Dans les « équations des marées » de Laplace, qui décrivent l'influence de la gravitation sur les mouvements d'un fluide à la surface d'une sphère en rotation (Gill, 1982, p. 98-99, 318 et 334), l'accélération de Coriolis apparaît explicitement, mais Laplace ne comprenait pas la signification physique de l'équation qu'il avait trouvée. Son explication qualitative des alizés, par exemple, reposait sur l'argument de conservation de quantité de mouvement de Hadley (Laplace, 1846, p. 340-341).

Des générations de météorologistes ont continué à confondre la conservation de la quantité de mouvement avec la force de Coriolis. Cette erreur se trouve jusque dans des ouvrages de haut niveau. Dans son célèbre livre sur la dynamique des océans et de l'atmosphère, Adrian Gill soutient plusieurs fois que Hadley a utilisé la conservation du moment cinétique (Gill, 1982, p. 23, 189, 369, 506 et 549), en contradiction avec sa propre présentation mathématique<sup>(1)</sup>.

Avant de revenir sur ces malentendus, nous allons explorer un autre mystère de la force de Coriolis : pourquoi porte-t-elle le nom d'un professeur français de l'École polytechnique de Paris, Gaspard Gustave Coriolis, décédé en 1843 ? Quiconque se plonge dans l'étude de l'influence de la rotation terrestre sur l'atmosphère rencontrera de nombreux savants célèbres, mais jamais Coriolis lui-même, qui apparaît aussi insaisissable que la force qui porte son nom.

## FOUCAULT, FERREL ET BUYS-BALLOT

Après les discussions du XVIII<sup>e</sup> siècle sur le rôle de la rotation de la Terre dans les courants aériens et marins, la question ne fut posée à nouveau qu'un demi-siècle plus tard, sous un angle différent. En 1837, Siméon Denis Poisson (1781-1840) nota qu'en raison de la rotation terrestre, la trajectoire d'un boulet tiré d'un canon était déviée vers la droite (dans l'hémisphère nord), mais douta que cela eût une quelconque importance pratique (Khrigian, 1970, p. 221), ce qui n'était vrai qu'à l'époque, avant les progrès de l'artillerie à longue distance. En 1915, la marine britannique était engagée dans une bataille contre les navires allemands près des îles Malouines. Les obus britanniques manquaient leur cible de 100 mètres, toujours vers la gauche : les canonnières appliquaient une correction de tir pour la force de Coriolis qui n'était valable qu'à 50 degrés nord de latitude (Marion, 1970, p. 346).

(1) La même affirmation est reprise par Lorenz (1983, p. 731), en contradiction avec ses articles précédents dans lesquels il écrivait que Hadley avait pensé en termes de vitesse relative (Lorenz, 1967, p. 2 et 61 ; Lorenz, 1969, p. 5).



Poisson commit une autre erreur plus grave : il niait qu'un pendule puisse être dévié par la rotation de la Terre. En 1851, Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) démontra exactement le contraire dans une célèbre expérience qui prit le monde scientifique par surprise. En vertu des lois de l'inertie, le pendule restait fidèle à son plan d'oscillation initial, mais le plancher de la pièce dans laquelle il était disposé tournait avec la Terre. Par rapport au sol, le plan d'oscillation effectuait une rotation complète en un **jour pendulaire** de  $2\pi / (\omega \sin \phi)$ , soit 32 heures à Paris ( $\phi$  est la latitude). Aux pôles, la rotation aurait pris 24 heures, à 30 degrés de latitude, 30 heures, et à l'équateur un temps infini (Dugas, 1955 ; Rochas et Javelle, 1993, p. 19). Foucault fit sensation à nouveau, peu de temps après, avec une de ses inventions, le gyroscope (du grec *gyros* et *skopein*, un instrument pour voir la rotation de la Terre).

La démonstration de Foucault suscita un grand intérêt scientifique et populaire, comparable à celui pour la théorie d'Einstein sur la gravitation et la lumière en 1919. L'expérience du pendule fut répétée immédiatement en divers endroits de la planète<sup>(1)</sup>. Le succès de Foucault, ainsi que la lecture des travaux de Newton et de Laplace conduisirent l'Américain William Ferrel (1817-1891) à conclure en 1856 que le vent souffle parallèlement aux isobares, que sa force dépend de la latitude et du gradient horizontal de pression (Khrigian, 1970, p. 222 ; Kutzbach, 1979, p. 36-38). Indépendamment, le météorologiste hollandais Buys-Ballot (1817-1890) publia en 1857 une règle empirique selon laquelle les basses pressions sont sur la gauche lorsque l'on regarde dans le sens du vent (Snelders et Schurrmans, 1980).

Le paramètre bien connu en météorologie,  $f = 2\omega \sin \phi$ , est curieusement appelé « paramètre de Coriolis » alors qu'il repose entièrement sur la découverte de Foucault, ce que semble signifier le choix de la lettre *f*. Certains auteurs se sont effectivement demandés si Coriolis avait vraiment sa place dans l'histoire de la science météorologique (Burstyn, 1966 ; Landsberg, 1966 ; Haurwitz, 1966 ; Jordan, 1966). Un auteur avait lu l'article original de Coriolis et était déçu qu'il n'y soit question que de machines, pas de l'atmosphère ni des océans, ni même de la rotation de la Terre. D'après lui, Coriolis avait déduit la force qui porte son nom « *non par changement de coordonnées ni conservation du moment cinétique, qui nous sont familiers, mais par analyse de l'énergétique du système, ce qui paraît plus difficile* » (Burstyn, 1966).

Cette remarque me rendit curieux de ce que Coriolis avait vraiment écrit. Des collègues français me communiquèrent des copies des articles originaux de Coriolis (1990). Je découvris rapidement que ces derniers étaient météorologiquement beaucoup plus intéressants que je ne l'avais imaginé.

## UN ÉTUDIANT DE CAUCHY

Gaspard Gustave Coriolis fut à la fois une victime et un héritier de la Révolution française. Il naquit le 21 mai 1792, année funeste, dans une petite famille aristocratique de Paris. Son père, Jean-Baptiste Elzéar, ancien capitaine de la garde de Louis XVI, fut ruiné par les événements politiques ; il se réfugia à Nantes où il devint un homme d'affaires. Le jeune Gaspard montra des talents précoces en mathématiques et fut admis à 18 ans à l'École polytechnique. Deux ans plus tard, il était élève ingénieur à l'École des ponts et chaussées<sup>(2)</sup>.

L'un des professeurs des Ponts et Chaussées était un autre aristocrate, Augustin Louis Cauchy, de trois ans son aîné (1789-1857). Cauchy est aux mathématiques ce qu'Honoré de Balzac incarne pour la littérature française ; sa contribution fut énorme et de grande valeur. Après la défaite de Napoléon en 1815, Cauchy devint professeur à Polytechnique. Il découvrit bientôt les qualités de Coriolis et lui offrit son poste aux Ponts et Chaussées. Ainsi Coriolis put-il subvenir aux besoins de sa famille après le décès de son père. Le restant de sa vie fut consacré à l'enseignement des sciences. « *C'est l'enseignement qui inspira son travail* », écrit Costabel (1961). L'un de ses cousins, un aristocrate rétrograde, ne supportait pas de le voir travailler comme un vulgaire « maître d'école » et tenta d'arrêter sa carrière, heureusement sans succès.

(1) Rares sont les systèmes concrets dans lesquels la rotation de la Terre peut être mise en évidence. Un autre exemple est celui de la rotation des brises côtières au cours de la journée (Atkinson, 1981, p. 150 et 164 ; Neumann, 1984 ; Simpson, 1985 ; Persson, 1997b).

(2) Les données biographiques reposent sur Costabel (1961), Le Tourneur (1961) et de Lapparent (1895), dont les chronologies sont quelque peu contradictoires. Il existe aussi une biographie russe de L. S. Freiman, citée par Costabel.





## LA MÉCANIQUE RATIONNELLE

De grands changements se produisirent au début du XIX<sup>e</sup> siècle. La révolution industrielle battait son plein et avait accru l'importance des machines, actionnées par l'eau ou le vent. L'enseignement à l'École polytechnique mettait l'accent sur la statique, qui était adaptée aux problèmes de construction, mais pas au transfert des forces, à l'énergie, à l'étude des turbines, en bref, à beaucoup des problèmes relatifs à la production industrielle. L'industrie française était en retard sur celle des Britanniques. Les théories mécaniques de Lagrange étaient critiquées, non qu'elles fussent erronées, mais on leur reprochait d'être difficiles à appliquer à des problèmes pratiques (Grattan-Guinness, 1997, p. 30).

À l'École polytechnique se forma un mouvement qui visait à comprendre et à expliquer le fonctionnement des machines pour les améliorer, ainsi qu'à mieux former les ouvriers, artisans et ingénieurs à la mécanique rationnelle (Grattan-Guinness, 1981). Coriolis et J.-V. Poncelet furent parmi les initiateurs de cette réforme. En 1829, ils publièrent deux livres de mécanique pour l'industrie : *Calcul de l'effet des machines* de Coriolis et *Introduction à la mécanique industrielle* de Poncelet.

Le livre de Coriolis était aussi remarquable pour ses développements théoriques, puisqu'il établissait pour la première fois la relation entre l'énergie cinétique (**forces vives**) et le travail :

$\frac{1}{2} m v_1^2 - \frac{1}{2} m v_0^2 = \int P ds$  (Grattan-Guinness, 1997, p. 449). Le facteur  $\frac{1}{2}$  était proposé par Coriolis et fut bientôt accepté (Kuhn, 1977). Cela mit fin à 150 ans de polémique entre les tenants de deux quantités conservatives : la « quantité d'action »  $v$  et les « forces vives »  $v^2$ . Elles sont proportionnelles à ce que nous appelons aujourd'hui quantité de mouvement (un vecteur) et énergie cinétique (un scalaire). Ce dernier terme ne fut introduit que vingt ans plus tard par W. Rankine en 1853. La notion d'énergie potentielle fut proposée par Lord Kelvin et P. G. Tait en 1862<sup>(1)</sup>.

## LES TRAVAUX AVEC NAVIER

Comme Balzac, Cauchy était un royaliste. Lors de la révolution de 1830, il quitta la France pour accompagner en exil l'ex-roi Charles X. Coriolis refusa de le remplacer à l'École polytechnique et préféra rester conférencier, pour des raisons politiques et médicales. Vingt ans auparavant, il avait contracté une grave maladie qui, selon ses propres termes, le privait des joies du mariage et risquait de mettre un terme à ses travaux scientifiques.

Les années suivantes furent néanmoins très productives. Coriolis fut l'assistant de Claude Navier (1785-1836) pour le cours de mécanique des Ponts et Chaussées. Navier était spécialiste des ouvrages d'art, mais il devint célèbre avec les équations d'évolution des fluides incompressibles dont il partagea la paternité avec George Stokes (1819-1903). Il les établit pour prédire les limites du comportement élastique des matériaux. À cette époque, Coriolis travaillait sur des prolongements de son livre de 1829, l'application des notions de travail et d'énergie cinétique aux systèmes en rotation.

Sa motivation ne provenait pas seulement des progrès technologiques. Le général commandant l'École polytechnique était passionné de billard. Afin d'améliorer son jeu, il voulait mieux comprendre les trajectoires des boules. Celles-ci ne se contentent pas d'échanger de la quantité de mouvement et de rebondir sur les bords. Il faut prendre en compte les frottements, la rotation des balles, etc. Le général chargea donc Coriolis de se pencher sur ce problème.

En 1832, Coriolis publia la *Théorie mathématique du jeu de billard*. La même année, l'article *Sur le principe des forces vives dans les mouvements relatifs des machines* (Coriolis, 1832) fut présenté à l'Académie des sciences. Il portait sur l'énergétique d'un système en rotation, qui devait aboutir au premier théorème de Coriolis.

Trois ans plus tard, son article *Sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps* (Coriolis, 1835) énonçait le second théorème qui devait le rendre célèbre. La force défléctrice y apparaissait pour la première fois.

(1) Le progrès scientifique est plus lent qu'on ne le croit souvent. La notion de force ne se popularisa que vers 1750, lorsque des mesures de la forme de la Terre confirmèrent la théorie de Newton. Ce dernier ne mentionna jamais le terme **énergie**.



## LES DEUX THÉORÈMES DE CORIOLIS

Les deux ouvrages de Coriolis mentionnés ci-dessus ne portent pas sur l'atmosphère ou sur les océans, ni même sur la rotation de la Terre, mais sur les transferts d'énergie dans les systèmes en rotation, tels que les roues hydrauliques. Dans le cadre de cet article, nous n'exposerons que les idées de base sans nous étendre sur les aspects techniques.

### Le premier théorème

Ce théorème peu connu énonce que la relation entre énergie potentielle et énergie cinétique est la même, que le système soit en rotation ou pas. Il énonce aussi que le travail reste égal au produit de la force, de la masse et de la distance parcourue. Bien qu'il semble évident, il a des conséquences importantes.

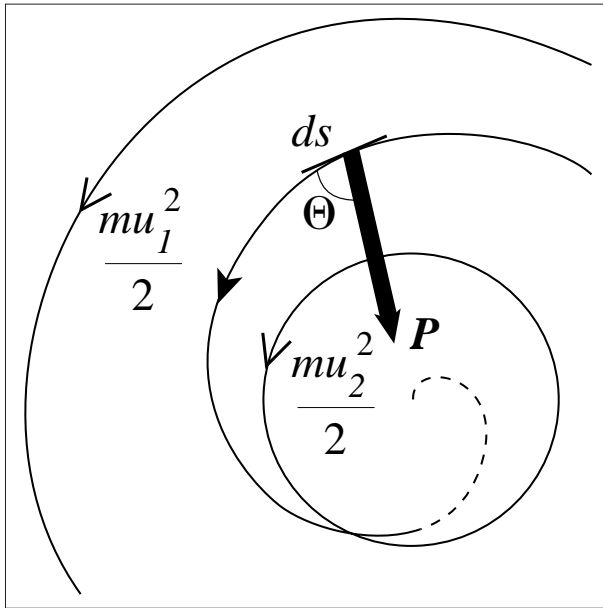


Figure 4 - Une application du premier théorème de Coriolis : une particule sur un plateau en rotation est déplacée vers l'axe avec une force P. Le travail effectué par P sur un chemin ds est le produit scalaire entre P et ds.

Soit une particule de masse m avec une vitesse tangentielle  $u_1$  sur un plan en rotation, et soumise à une force centripète P. La particule est déplacée le long d'une trajectoire ds vers une autre orbite où elle se déplace avec une vitesse tangentielle  $u_2$  (figure 4). Coriolis démontra que la différence d'énergie cinétique correspond à la différence d'énergie potentielle et n'est due qu'à la projection de la force P sur ds :

$$\frac{1}{2} m u_2^2 - \frac{1}{2} m u_1^2 = \int P \cos \theta ds$$

( $\theta$  est l'angle entre P et ds). Pour comprendre cette équation, reprenons l'exemple de la patineuse, utilisé dans de nombreux livres. Elle augmente sa vitesse de rotation en regroupant les bras, tout en conservant son moment cinétique (figures 5a et 5b). Mais qu'advient-il de son énergie cinétique ? On la confond souvent avec le moment cinétique, et souvent l'on entend dire que son énergie cinétique reste constante parce que son moment cinétique est conservé. En fait, son énergie cinétique augmente proportionnellement à sa vitesse de rotation.

Lorsque les bras sont tendus, le moment d'inertie est I avec une vitesse angulaire  $\omega$ . Le moment cinétique  $L = I\omega$  reste constant puisqu'il n'y a pas de couple vis-à-vis de l'axe vertical. L'énergie cinétique  $I\omega^2/2 = L\omega/2$  augmente avec la vitesse de rotation, même si L reste constant (Feynman et al., 1977).

On entend quelquefois dire que la patineuse « doit » augmenter sa vitesse « pour » conserver son moment cinétique. Non seulement cela relève de l'anthropomorphisme et de la métaphysique, mais c'est faux : elle peut augmenter sa vitesse de rotation même si son moment cinétique décroît. Dans un mouvement de translation, quantité de mouvement et énergie cinétique varient ensemble, mais l'énergie de rotation peut augmenter alors même que le moment cinétique

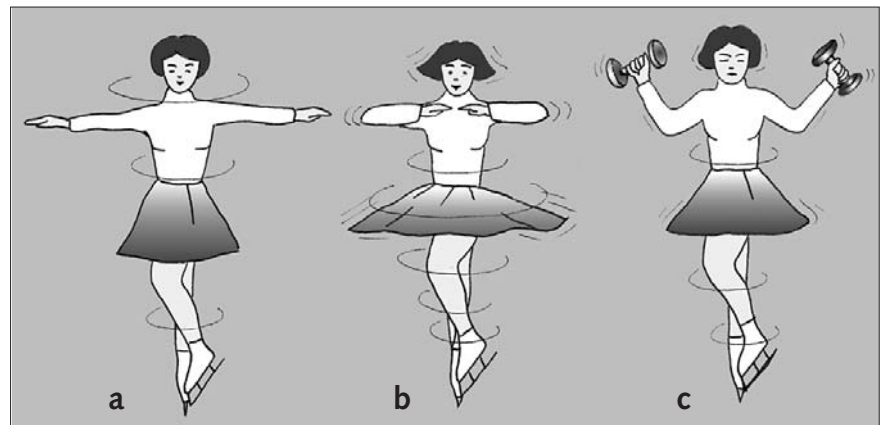


Figure 5 - La patineuse sur glace régule sa rotation en étendant ou en groupant les bras horizontalement (a). Elle conserve son moment cinétique, le changement de vitesse de rotation étant dû aux muscles de ses bras (b). Si elle portait de lourdes haltères, son moment cinétique serait conservé, mais elle ne pourrait plus plier les bras (c). Les frottements n'affectent que marginalement sa vitesse de rotation.



décroit, ce qui est effectivement le cas pour le moment cinétique de la patineuse du fait des frottements avec l'air et la glace. Le même phénomène se produit lorsqu'un satellite en orbite retombe dans l'atmosphère terrestre : sa vitesse augmente alors que son moment cinétique diminue (figure 6).

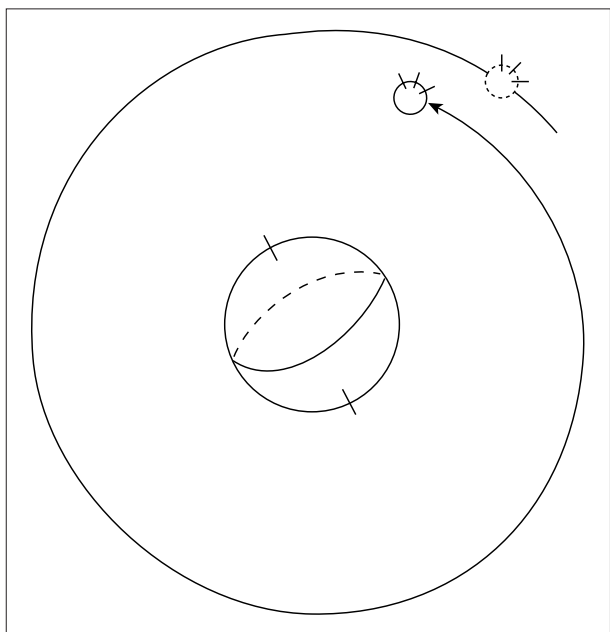


Figure 6 - Un satellite qui pénètre dans les confins de l'atmosphère terrestre rencontre une résistance due aux molécules de gaz. Son moment cinétique diminue, mais sa vitesse augmente.

D'où provient donc l'énergie cinétique supplémentaire ? Au repos, regrouper les bras ne constitue pas un travail mécanique, mais lorsque l'on est en rotation, il faut vaincre la force centrifuge. L'énergie provient du travail de la force centripète exercée pour replier les bras. Là est l'essence du premier théorème de Coriolis.

Une autre expérience intéressante consisterait à placer des haltères dans les mains de la patineuse (figure 5c). Elle conserve toujours son moment cinétique lorsqu'elle plie les bras, mais cette fois-ci elle ne pourra pas les regrouper complètement, parce que la force centrifuge finit par devenir trop forte. Si notre patineuse, maintenant épuisée, relâche les bras, la force centrifuge va les entraîner vers l'extérieur et nous nous retrouvons dans la situation de départ, une patineuse en rotation lente avec les bras tendus. Son énergie cinétique s'est retransformée en énergie potentielle, donc du travail a été effectué, mais par qui ? Il serait tentant de dire que le travail a été effectué par la force centrifuge, malheureusement une force d'inertie ne peut pas travailler.

De plus, cela impliquerait que l'énergie totale du système aurait augmenté à la suite de la contraction puis du relâchement des bras. Le travail a été effectué comme avant par ses muscles, et c'est un **travail négatif**, ramenant le système dans son état initial. La notion de travail négatif est peu connue en météorologie, pourtant elle est aussi établie en mécanique que celle de travail positif. Dans les textes météorologiques, il semble que tout travail doive être positif. Cela a été la source de nombreux malentendus sur lesquels nous reviendrons. Le premier théorème de Coriolis nous permet donc d'analyser les mouvements de rotation suivant un point de vue différent de la conservation du moment cinétique.

### Le second théorème

En 1835, Coriolis revint sur l'analyse des mouvements relatifs, en particulier sur l'effet de la force centripète dans un système en rotation. L'un des corollaires de l'équation du premier théorème de Coriolis est que la force centrifuge n'intervient pas dans l'équation de conservation de l'énergie ; c'est une force fictive qui ne travaille pas. Un corps fixé sur un disque en rotation subit une force centrifuge opposée à la force centripète d'entraînement, mais ce n'est plus vrai si le corps est en mouvement par rapport au disque. La force centrifuge est toujours orthogonale à la trajectoire du corps, dirigée le long du rayon du cercle osculateur.

Elle se décompose en deux forces : l'une,  $m\omega^2 r$  dirigée selon une ligne passant par le centre de rotation, l'autre,  $-2m\omega v$ , la **force de Coriolis**, fonction de la vitesse relative  $v$  et orthogonale à sa direction (figure 7). Coriolis appelait ces deux termes **forces centrifuges composées** :

« Pour établir une équation quelconque de mouvement relatif d'un système de corps ou d'une machine quelconque, il suffit d'ajouter aux forces existantes deux espèces de forces supplémentaires ; les premières sont toujours celles [...] qui sont

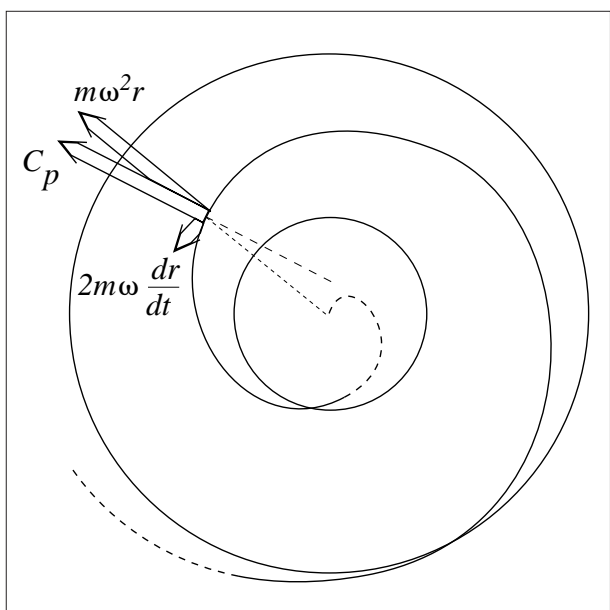


Figure 7 - Le second théorème de Coriolis appliqué à un mouvement radial  $dr/dt$  dans un référentiel en rotation avec une vitesse angulaire  $\omega$  par rapport à un référentiel galiléen : la force centrifuge totale  $C_p$  exercée sur le corps de masse  $m$  est orthogonale à la tangente à la trajectoire et composée de deux forces :  $m\omega^2 r$  dirigée selon une ligne provenant de l'axe de rotation et orientée vers l'extérieur, et  $-2m\omega v$ , la force de Coriolis, qui est perpendiculaire au mouvement considéré dans le référentiel en rotation.



*opposées à celles qui sont capables de maintenir les points matériels invariablement liés aux plans mobiles ; les secondes sont dirigées perpendiculairement aux vitesses relatives et à l'axe de rotation des plans mobiles ; elles sont égales au double du produit de la vitesse angulaire des plans mobiles par la quantité de mouvement relatif projetée sur un plan perpendiculaire à cet axe. Ces dernières forces ont la plus grande analogie avec des forces ordinaires. Pour mettre en évidence cette analogie, il suffit de remarquer que la force centrifuge est égale à la quantité de mouvement multipliée par la vitesse angulaire de la tangente à la courbe décrite, et qu'elle est dirigée perpendiculairement à la vitesse et dans le plan osculateur, c'est-à-dire perpendiculairement aussi à l'axe de rotation de la tangente » (Coriolis, 1835).*

On notera que Coriolis n'était pas lui-même aussi intéressé par sa propre force que nous le sommes. Pour lui, son seul intérêt était de calculer la force centrifuge totale.

Dans son second théorème, Coriolis met la force centrifuge et la force de Coriolis sur un pied d'égalité : elles sont tout aussi apparentes l'une que l'autre. Il met la force défective dans un contexte dynamique et montre clairement ce qu'elle fait – et ce qu'elle ne fait pas. Comme elle est toujours perpendiculaire au mouvement du corps, elle en change la direction, mais ni la vitesse ni l'énergie cinétique : la force de Coriolis ne travaille pas.

## L'IMPORTANCE DES THÉORÈMES DE CORIOLIS EN MÉTÉOROLOGIE

### La différence entre moment cinétique et énergie cinétique

Les deux théorèmes de Coriolis nous aident à comprendre trois notions fondamentales en météorologie dynamique : le rôle de l'inertie, la relation entre moment cinétique et énergie cinétique, et le travail, en particulier la façon dont un travail négatif peut réduire l'énergie cinétique.

De nos jours, il est courant d'étudier la dynamique d'un système en rotation à partir de la conservation du moment cinétique. Ce n'est pas la même chose que l'énergie cinétique rotationnelle. Puisque la conservation du moment cinétique ne permet même pas de comprendre des systèmes mécaniques simples, comment pourrait-elle être suffisante pour comprendre la circulation générale atmosphérique ? Les météorologistes ne sont pas tous d'accord sur l'utilité du moment cinétique dans ce domaine. Pour certains, c'est une « *contrainte forte* » sur les mouvements atmosphériques (Hartmann, 1994, p. 150), pour d'autres, c'est une « *description visiblement inadaptée* » du vent zonal aux latitudes moyennes et élevées (James, 1994, p. 81-82).

La conservation du moment cinétique s'applique seulement si aucune force n'exerce de couple. Ce n'est vrai que globalement dans l'atmosphère : le travail global exercé par les gradients de pression est nul. Mais ce n'est pas vrai localement. Les météorologistes ont tenté d'éviter cette difficulté en considérant la

De lat. (1)	à lat. (2)	vitesse (m/s) $v_2$	à lat. (3)	vitesse (m/s) $v_3$
90°	80°	-81,5		
80°	70°	-117,3	90°	$\infty$
70°	60°	-123,2	80°	234,7
60°	50°	-118,3	70°	179,8
50°	40°	-105,3	60°	151,1
40°	30°	-87,7	50°	125,9
30°	20°	-65,9	40°	98,9
20°	10°	-41,0	30°	71,5
10°	0°	-14,0	20°	43,0
0°			10°	14,2

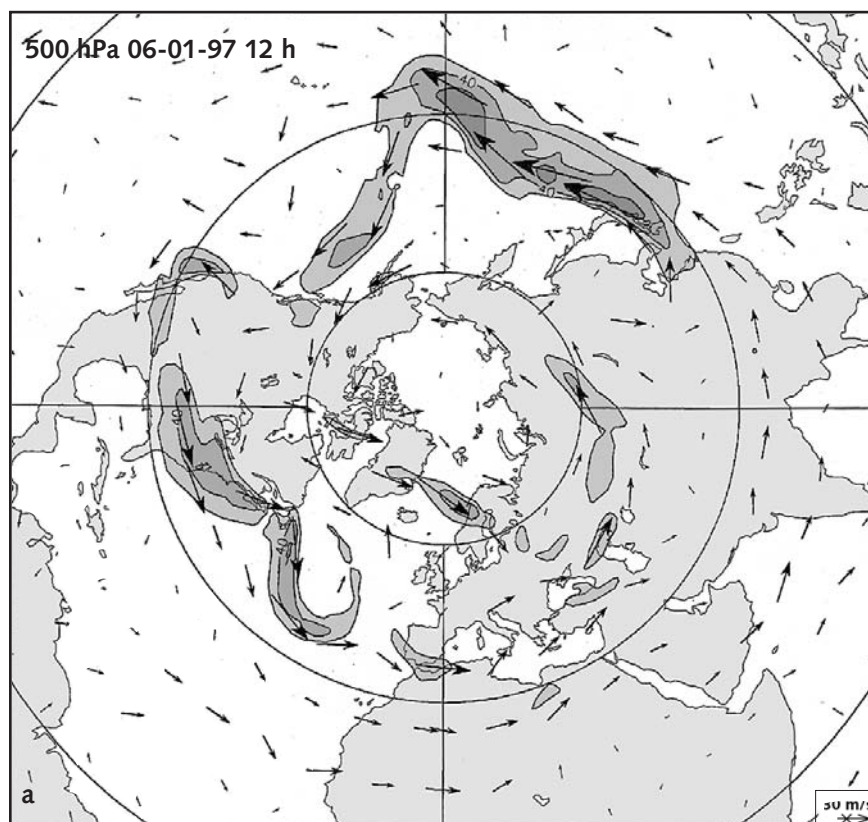
Tableau 1 - Application de la conservation du moment cinétique. Un anneau d'air initialement au repos à la latitude (1) et porté successivement aux latitudes (2) puis (3) acquiert respectivement les vitesses zonales  $v_2$  puis  $v_3$ . Les vitesses sont en m/s. (D'après Exner, 1917, p. 24 et Haurwitz, 1941, p. 121)

conservation du moment cinétique pour un anneau zonal d'air, de mouvement uniforme, et déplacé méridionalement en l'absence de tout couple (Gill, 1982, p. 586 ; Holton, 1992, p. 328 ; Green, 1983, p. 178-180 ; Held, 1993, p. 10).

Malheureusement, ce modèle en anneau n'est pas réaliste. Un anneau au repos sur l'équateur et déplacé à la latitude 30 degrés devrait acquérir une vitesse de 140 m/s en vertu de la conservation du moment cinétique ; en réalité, sa vitesse devrait être de 70 m/s. Si un anneau au repos à 40 degrés était déplacé à 50 puis 60 degrés, la conservation du moment cinétique indique que sa vitesse zonale augmenterait de 125 m/s puis atteindrait 275 m/s. Ce n'est ni vraisemblable ni physiquement possible. Les météorologistes de l'entre-deux guerres savaient cela ; c'est pourquoi ils se méfiaient de l'utilisation du moment cinétique comme modèle de la circulation de grande échelle. Exner (1917) et Haurwitz (1941) ont publié des tables qui montrent comment un anneau d'air déplacé de 10 degrés de latitude vers le pôle peut prendre une vitesse relative de plus de 100 m/s si l'on ne considère que son moment cinétique (tableau 1).

Le météorologiste britannique David Brunt, célèbre à l'époque, considérait que l'hypothèse de conservation du moment cinétique était « trompeuse » : de l'air ne peut changer de latitude que s'il est guidé par « une organisation convenable » du gradient de pression. S'il n'y avait pas de gradient de pression, l'air serait constamment dévié par la force de Coriolis, décrirait une oscillation inertielle qui le ramènerait à sa latitude de départ. De l'air en mouvement méridional avec une vitesse de 20 m/s à 60 degrés de latitude ferait demi-tour au bout de 160 km (Brunt, 1941, p. 404-405).

Figure 8a - Circulation de grande échelle à 500 hPa le 6 janvier 1997 à 12 h UTC, à peu près au moment où Richard Branson et Per Lindstrand décollèrent en ballon du Maroc pour tenter de faire le tour du monde. Les flèches indiquent la direction du vent et leur longueur est proportionnelle à sa vitesse. Les zones grisées correspondent aux plus fortes vitesses du vent.

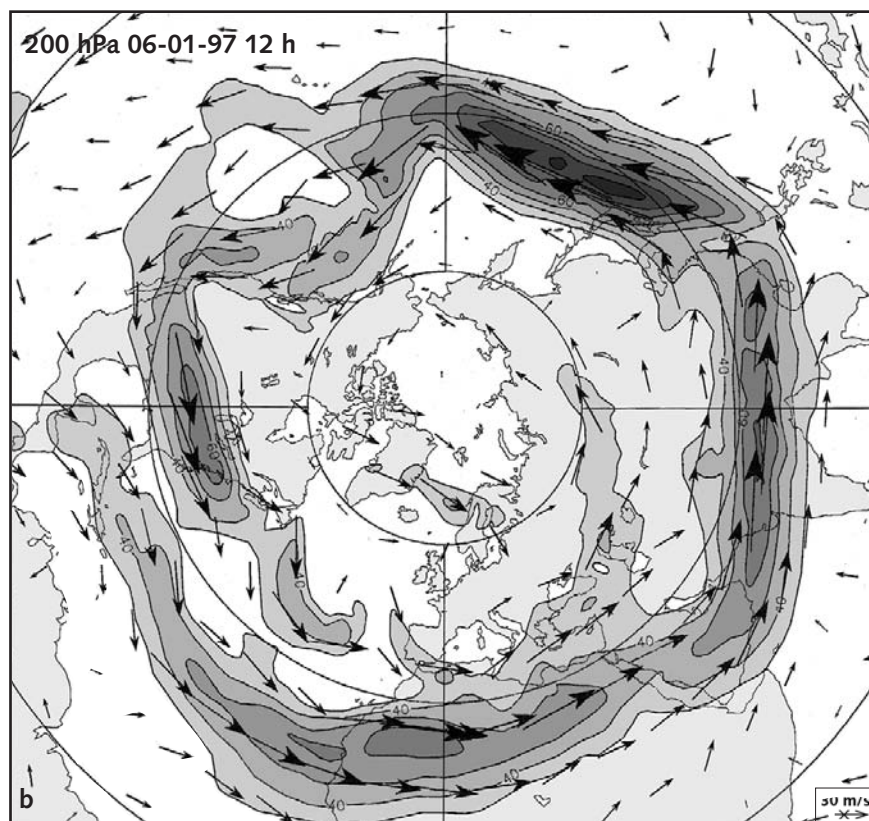


Cela rend douteuse l'explication habituelle des dimensions de la cellule de Hadley à partir de la conservation du moment cinétique. Selon cette explication, la cellule de Hadley ne peut s'étendre au-delà des latitudes subtropicales parce que le vent zonal à des latitudes plus élevées deviendrait très rapide, associé à des cisaillements verticaux et à des gradients thermiques si forts que les instabilités baroclines détruiraient cette cellule de Hadley. Une circulation de Hadley hémisphérique n'est pas possible sur notre planète parce que de l'air conservant son moment cinétique, partant de l'équateur, ne pourrait pas en pratique dépasser les tropiques.

Cette présentation de la circulation de grande échelle ne permet pas d'expliquer les dimensions de la cellule de Hadley ; elle ne donne pas non plus de justification au courant jet subtropical. Comme les aérostats qui cherchent à



Figure 8b - Circulation de grande échelle à 200 hPa le 6 janvier 1997 à 12 h UTC. On constate que les courants jets sont plus forts à 200 hPa qu'à 500 hPa et que le jet subtropical sur l'Afrique du Nord et l'Asie du Sud n'existe qu'à 200 hPa.



faire le tour du monde le savent, l'un des vents les plus forts et les plus réguliers est le jet subtropical sur l'Afrique du Nord (figure 8b). Cinquante ans après sa découverte, il ne semble pas y avoir de consensus pour expliquer sa formation (Wiin-Nielsen et Chen, 1993, p. 151), ni pour comprendre pourquoi il n'est pas plus fort (Hartmann, 1994, p. 153 ; Held, 1993, p. 16).

Et pourtant, la cellule de Hadley comme le jet subtropical peuvent s'expliquer avec le premier théorème de Coriolis (autrement dit, la patineuse portant des haltères) : le gradient de pression nord-sud est le « muscle » de l'atmosphère ; il dirige l'air vers le nord avec une vitesse croissante et, simultanément, la force de Coriolis le dévie vers l'est. L'amplitude de la déviation dépend de la différence de chauffage entre les tropiques et les latitudes moyennes, ainsi que de la vitesse de rotation de la Terre. Cela conduit à une cellule de Hadley jusqu'à une latitude de 30 degrés. L'extension est d'autant plus petite que la différence de chauffage est faible ou que la planète tourne rapidement. C'est le cas de Jupiter ou de Saturne, en rotation rapide et où les différences de chauffage sont faibles : on y observe des jets proches de l'équateur.

## L'ajustement géostrophique

On trouve facilement dans les livres de cours une discussion de la phase dans laquelle le vent (sous-géostrophique) est accéléré par la force du gradient de pression (par exemple, dans un jet ou une circulation isobare convergente). Plus rare est la discussion de la **phase de décélération** dans laquelle le vent pénètre dans une zone ayant un plus faible gradient de pression (figure 9). L'air est dévié vers les zones de haute pression par la force de Coriolis qui entraîne une accumulation d'air, conduisant à un anticyclone sur la droite du jet et à une dépression sur la gauche, jusqu'au point où le gradient de pression compense la déviation (Rossby, 1959, p. 22-23 ; Rossby, 1941, p. 608-609). Cette circulation à l'encontre de la force due au gradient de pression convertit de l'énergie cinétique en énergie potentielle. Le travail n'est pas fourni par la force de Coriolis, mais par la force du gradient de pression ; c'est un travail négatif<sup>(1)</sup>.

(1) Certains auteurs appellent la circulation contre le gradient « travail de la force de Coriolis » (Starr, 1968) ou « énergie cinétique créée par la force de Coriolis » (Starr, 1954, p. 198 et 256 ; Wiin-Nielsen et Chen, 1993, p. 161).

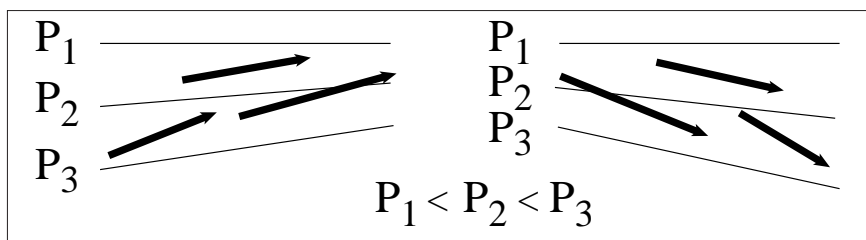


Figure 9 - Représentation schématique de l'accélération d'une parcelle d'air dans une zone de plus fort gradient de pression (à gauche) et de sa décélération lorsqu'elle rencontre un gradient plus faible (à droite). Les isobares sont affectées ; le gradient de pression va se relâcher à l'entrée parce que de l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique, il va se renforcer à la sortie parce que la transformation inverse a lieu.

### La force de Coriolis, force inertielle

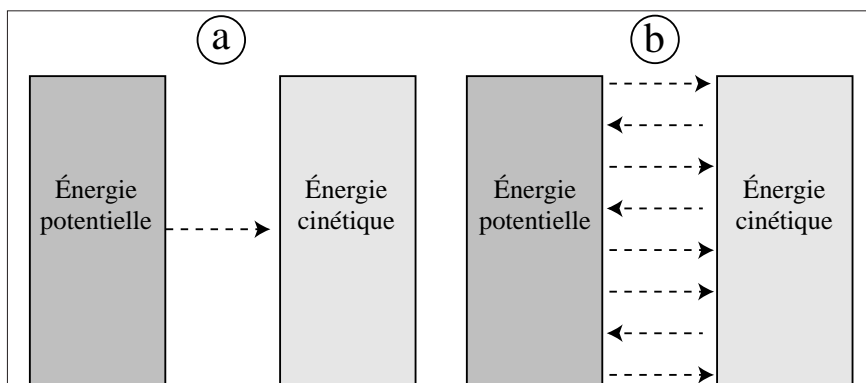
Les livres de cours ont quelques difficultés à expliquer la cause de la circulation contre le gradient de pression évoquée au paragraphe précédent. Le célèbre météorologiste allemand Ernst Kleinschmidt passa les quinze dernières années de sa vie à essayer de prouver que cette circulation agéostrophique était due à une sorte de force nouvelle absente des équations du mouvement (Thorpe, 1993). Aux étudiants de comprendre qu'il n'y a pas de force en jeu – il ne s'agit que d'inertie !

Pour comprendre la relation entre vent et pression, il est essentiel d'avoir conscience du rôle de l'inertie. On imagine trop souvent que c'est un processus à sens unique. Edward Lorenz critiquait la tendance trop fréquente en météorologie « *de croire que le champ de vent est engendré par le champ de masse* » et de ne pas voir que ces champs peuvent en fait interagir (Lorenz, 1967, p. 29 et 65). Il faut bien voir qu'il n'y a pas simplement des forces qui accélèrent ou ralentissent le vent ; le vent lui-même est un **déplacement inertielle**. Une indication de l'importance de l'inertie est donnée par le succès du modèle barotrope dans la prévision de la circulation de grande échelle sur des échéances de 12 à 36 heures au milieu de la troposphère. Seule l'inertie « pousse » l'air à travers le cœur du courant jet où la force de Coriolis est en équilibre avec la force du gradient de pression.

### Un puits d'énergie cinétique

Il faut comprendre que le ralentissement du vent par le gradient de pression est le mécanisme par lequel l'énergie cinétique diminue, tout comme elle augmente lorsque le vent accélère. Bien que le processus soit adiabatique et réversible, il ne se produit pas exactement avec la même intensité dans les deux sens, comme le montrent les diagrammes de « boîtes » d'énergie globale qui représentent le flux net entre énergie potentielle et énergie cinétique (Peixoto et Oort, 1992, p. 311 et 318 ; Uccellini, 1990, p. 125 ; Kung, 1971, p. 61 ; Kung, 1977, p. 1365 ; Van Mieghem, 1973, p. 157). Une croyance répandue mais erronée, probablement due à une mauvaise interprétation des boîtes d'énergie, est que la dissipation par turbulence et frottement est le seul puits d'énergie cinétique. Cela n'est vrai que dans les basses couches de l'atmosphère. Dans l'atmosphère libre, le puits le plus important est la conversion en énergie potentielle<sup>(1)</sup> (figure 10).

Figure 10 - Les boîtes d'énergie ① reproduites dans la plupart des textes peuvent faire croire que les flux sont à sens unique. La représentation ② est plus pédagogique, car elle montre que les flux se font dans les deux sens, même si le bilan n'est pas nul.



(1) L'effet sur l'énergie potentielle du réchauffement dû au frottement, suggéré par Pettersen et Smedby (1971) et Carlson (1991, ch. 5), ne saurait avoir qu'une importance mineure.





Lors de cet ajustement géostrophique, les gradients zonaux de pression exercent un couple qui peut augmenter temporairement le moment cinétique de l'atmosphère, alors même que l'énergie cinétique diminue, comme dans l'exemple de la patineuse.

Ainsi, un aspect remarquable des deux théorèmes de Coriolis est qu'ils fournissent, non seulement un socle pour une meilleure compréhension de l'atmosphère, mais aussi des explications cohérentes avec la mécanique conventionnelle.

## DYNAMIQUE ET CINÉMATIQUE

En 1834, au moment où Coriolis préparait ses démonstrations, l'un de ses collègues, le non moins célèbre André-Marie Ampère (1775-1836), proposa de faire l'étude des mouvements mécaniques sans se préoccuper des forces qui les produisent (Smith et Wise, 1989, p. 360-372 ; Koettsier, 1994, p. 994-1022). Ampère appela cela **cinématique** et décrit ainsi son objectif :

*« Cette science doit renfermer tout ce qu'il y a à dire des différentes sortes de mouvements, indépendamment des forces qui peuvent les produire. Elle doit d'abord s'occuper de toutes les considérations relatives aux espaces parcourus dans les différents mouvements, aux temps employés à les parcourir, à la détermination des vitesses d'après les diverses relations qui peuvent exister entre ces espaces et ces temps. Elle doit ensuite étudier les différents instruments à l'aide desquels on peut changer un mouvement en un autre ; en sorte qu'en comprenant, comme c'est l'usage, ces instruments sous le nom de machines, il faudra définir une machine, non pas comme on le fait ordinairement, comme un instrument à l'aide duquel on peut changer la direction et l'intensité d'une force donnée, mais bien comme un instrument à l'aide duquel on peut changer la direction et la vitesse d'un mouvement donné. [...] Après l'étude du mouvement sans les forces, et des forces sans le mouvement, il reste à les considérer simultanément, à comparer les forces aux mouvements qu'elles produisent, et à déduire de cette comparaison les lois connues sous le nom de lois générales du mouvement. »* (Ampère, 1834).

Grâce à Ampère, la cinématique devint une discipline reconnue qui trouva des applications dans d'autres domaines, en particulier en mécanique des fluides. Déjà, Leonhard Euler (1707-1783) avait fait faire de gros progrès à la mécanique des fluides en ignorant les forces et en ne considérant que les mouvements des « *particules de fluide* », des corps infinitésimaux, assez petits pour être traités comme des points mathématiques, mais néanmoins possédant des propriétés physiques telles que le volume, la masse, la densité, l'inertie, etc. Vers 1845, la cinématique avait acquis droit de cité auprès des mathématiciens de Cambridge, dont le plus important était Stokes qui, par des considérations de géométrie pure, construisit ses équations pour les fluides et les solides homogènes et isotropes (Smith et Wise, 1989, p. 199).

## LA CINÉMATIQUE EN MÉTÉOROLOGIE

Les descriptions cinématiques sont une tradition ancienne dans la science météorologique, à cause de la parenté de celle-ci avec l'hydrodynamique et à la suite des méthodes graphiques utilisées en prévision synoptique. La plus grande partie de l'enseignement de la météorologie dynamique relève en fait de la cinématique atmosphérique : les tourbillons absolu, potentiel et relatif, l'équation Oméga, l'équation de Sutcliffe, le vecteur Q, etc. Plusieurs de ces concepts cinématiques reposent sur des contraintes d'équilibre ou sur des propriétés de conservation ; elles sont très utiles pour analyser et prévoir les mouvements atmosphériques. Malheureusement, un mauvais emploi de la cinématique peut conduire à des erreurs.

La présentation académique de la colonne d'air qui franchit une chaîne de montagnes en conservant son tourbillon potentiel est incorrecte, car elle n'est pas valable pour des écoulements vers l'ouest (Holton, 1993). Des interprétations erronées de la relation quasi géostrophique standard ont pu faire conclure à tort que, devant une dépression atmosphérique en mouvement, l'air s'élève pour redescendre derrière, alors que l'inverse se produit fréquemment (Persson, 1997a). On entend souvent dire que les ondes de Rossby sont créées par la force de Coriolis, alors que Rossby lui-même (1950a, p. 190 ; 1950b, p. 175 ; 1950c, p. 203-204) spécifiait bien que ces ondes planétaires sont créées par des processus non barotropes, et que seule leur propagation peut s'expliquer cinématiquement





dans un cadre barotrope. D'autres livres fournissent une description mathématique correcte de l'onde de Rossby, mais utilisent l'image incorrecte d'une « trajectoire à tourbillon absolu constant » comme illustration (Persson, 1997a).

Une tendance malheureuse s'est développée durant les trente dernières années : la discussion des causes et des effets à partir de considérations cinématiques, d'où des descriptions anthropomorphes du genre : « *La particule d'air sent l'influence des basses latitudes et augmente sa rotation afin de conserver le tourbillon absolu... Les circulations verticales modifient le champ de température afin de maintenir l'équilibre du vent thermique...* » Ce n'est pas seulement fantaisiste, cela camoufle les vrais mécanismes physiques. Une utilisation judicieuse des approches cinématiques et dynamiques peut au contraire être constructive, les premières décrivant « comment », les secondes expliquant « pourquoi ».

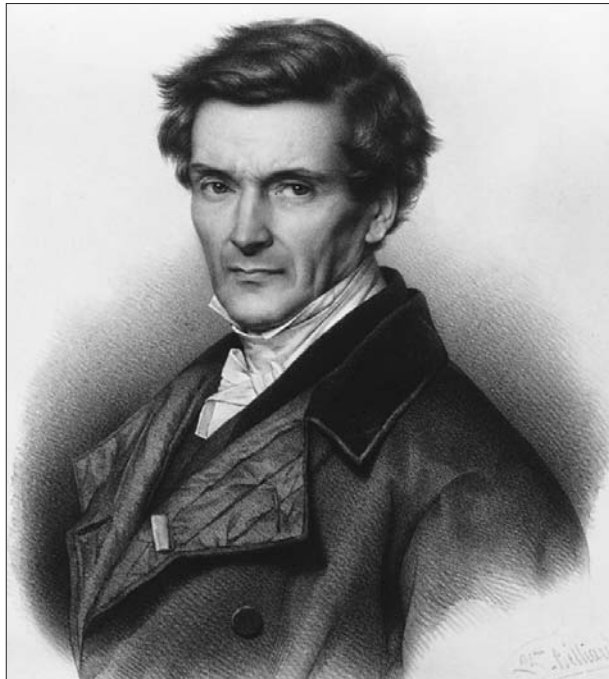


Figure 11 - Gaspard Gustave Coriolis (1792-1843) fut, semble-t-il, un professeur très apprécié. Il laissa le souvenir d'un grand dévouement pour l'école, d'une grande connaissance de toutes les branches de l'éducation, d'un profond sens du devoir et de la justice mêlé d'une présence sympathique et bienveillante. Les élèves respectaient sa gentillesse et sa simplicité qui touchait parfois à une honnêteté ingénue (de Lapparent, 1895). (Document Archives de l'Académie des Sciences, Paris)

Au jargon ci-dessus s'ajoute l'application à la dynamique de grande échelle des concepts de la théorie de la turbulence (les transports de quantité de mouvement, les flux de tourbillon, les contraintes de Reynolds). On devrait se rappeler que la plupart des concepts relatifs à la turbulence proviennent de la thermodynamique statistique qui traite de la modélisation du comportement des molécules. L'idée de base est que l'énergie cinétique se distribue entre les différentes échelles, qu'elle ne diminue que par frottement (ou viscosité). Cela ne s'applique pas aux grandes échelles où la conversion en énergie potentielle constitue un puits tout aussi important.

Les difficultés de la science météorologique ne proviennent pas seulement de la complexité de l'atmosphère. Elles sont aussi dues à la manière dont des générations de météorologistes ont pensé, parlé et enseigné. Il n'est pas étonnant que les apprentis météorologistes et océanographes aient « *l'esprit troublé* » (Genty, 1994) et « *un sentiment de frustration* » (Stommel et Moore, 1989) lorsqu'ils tentent de comprendre les explications des phénomènes naturels. L'approche mathématique et physique de Coriolis est un remède simple.

## L'HÉRITAGE DE CORIOLIS

En 1836, Coriolis remplaça Navier aux Ponts et Chaussées puis à l'École polytechnique. Cette année-là, Coriolis appliqua son principe de travail-énergie au problème hydrodynamique relatif à l'écoulement de l'eau au-dessus d'un obstacle et introduisit un coefficient  $\alpha$  qui est connu en hydraulique sous le nom de **coefficient de Coriolis** (Rouse et Ince, 1957, p. 150-151). Après la mort de Navier en 1836, Coriolis fut élu à l'Académie des sciences et devint directeur des études de l'École polytechnique en 1838. Il était un professeur apprécié (figure 11) et sa gentillesse vis-à-vis des élèves alla jusqu'à faire installer des rafraîchisseurs d'eau dans les salles de classe, surnommés pendant longtemps des *corios*. En 1843, il travaillait à des retouches sur son livre de 1829, mais sa santé se dégrada et il voulut démissionner. Le général refusa, de telle sorte que Coriolis put faire partie de l'École jusqu'à ses derniers jours, et il ne cessa pas de travailler sur son livre. Il décéda le 19 septembre et fut inhumé au cimetière Montparnasse. L'année suivante son livre fut publié : le *Traité de la mécanique des corps solides*.

Comme le rappela Dugas (1955, p. 383), ce n'est pas Coriolis qui inspira l'expérience de Foucault. Il n'intervint pas non plus dans les développements météorologiques qui en découlèrent. L'importance de son article de 1835 ne semble avoir été reconnue qu'en 1859, lorsque l'Académie des sciences organisa une discussion approfondie sur l'impact de la rotation terrestre sur l'écoulement dans les canaux et les rivières (Khrigian, 1970, p. 222 ; Kutzbach, 1979, p. 92 ; Gill, 1982, p. 210, 371 ; Rochas et Javelle, 1993, p. 19-20). Le nom de Coriolis ne commença à apparaître dans la littérature météorologique que vers la fin du



Figure 12 - Le souvenir de Coriolis est bien présent à Météo-France dont l'implantation principale se situe à Toulouse, avenue Gaspard-Coriolis. (Photo Météo-France, J.-M. Destruel)



XIX<sup>e</sup> siècle, et l'expression force de Coriolis ne fut utilisée qu'à partir des années vingt. Le qualificatif original de « force déviatrice » fut parfois utilisé jusque dans les années cinquante (Haurwitz, 1966 ; Jordan, 1966).

Toutes les grandes découvertes en circulation générale, y compris la relation entre les champs de pression et de vent, se firent sans aucune référence à Coriolis. Rien dans la météorologie moderne ne serait changé si son travail était tombé dans l'oubli. L'expression « force déviatrice » serait toujours en vogue, ou bien l'on ferait référence à Foucault. Néanmoins, si son travail avait été lu et si l'on avait compris comment il pouvait séparer cinématique et dynamique dans ses articles de 1832 et de 1835, l'enseignement de la météorologie aujourd'hui serait différent. On aurait pu éviter la confusion qui règne jusque dans les livres de cours sur la nature et le rôle de la force de Coriolis à cause d'une mauvaise utilisation de la cinématique, de la conservation du moment cinétique et des concepts de turbulence en météorologie dynamique. Gaspard Gustave Coriolis méritait donc bien de donner son nom à la force de Coriolis. S'il était encore avec nous aujourd'hui, il serait l'une des rares personnes à vraiment la comprendre !

## Remerciements

Cette article fut inspiré par de longues discussions avec George Platzman et Adrian Simmons, qui m'ont réconcilié avec l'outil puissant que sont les mathématiques. Je remercie David Anderson, François Bouttier et James R. Holton qui m'ont patiemment convaincu que certaines idées peuvent être traditionnelles sans pour autant être fausses. J'ai une dette envers le professeur Enzo O. Macagno de l'université d'Iowa, qui a publié une introduction à l'histoire de la cinématique sur Internet (enzo-macagno@uiowa.edu). Enfin, je remercie Jean-Pierre Javelle pour m'avoir communiqué des copies des articles de Coriolis, ainsi que Frédéric Atger et François Bouttier qui ont adapté cet article pour le monde francophone.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ampère A. M., 1834 : *Essai sur la philosophie des sciences ou exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines*. Paris.
- Atkinson B. W. (Ed.), 1981 : *Meso-scale atmospheric circulations*. Academic Press, Londres, Royaume-Uni, 495 p.
- Bolin B. (Ed.), 1959 : *The atmosphere and the sea in motion. The Rossby memorial volume*. The Rockefeller Inst. Press, États-Unis, 509 p.
- Brunt D., 1941 : *Physical and dynamic meteorology*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 428 p.
- Burstyn H. L., 1966 : The deflecting force and Coriolis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 47, 890-893.
- Carlson T. N., 1991 : *Mid-latitude weather system*. Harper Collins, Londres, Royaume-Uni, 507 p.



- Coriolis G. G., 1832 : Mémoire sur le principe des forces vives dans les mouvements relatifs des machines. *J. de l'École polytechnique*, 13, Cahier 21, 268-302.
- Coriolis G. G., 1835 : Mémoire sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps. *J. de l'École polytechnique*, 15, Cahier 24, 142-154.
- Coriolis G. G., 1990 : *Théorie mathématique des effets du jeu de billard*. Éditions Jacques Gabay, Paris, 230 p. (Contient une reproduction des mémoires de 1832 et 1835).
- Costabel P., 1961 : Coriolis, Gaspard Gustave de. Dans *Dictionary of Scientific Biography* vol. 3, New York, États-Unis, 416-419.
- De Lapparent A., 1895 : Coriolis. Dans *Livre du centenaire de l'École polytechnique 1794-1894*. Gauthier-Villars, Paris.
- Dugas R., 1955 : *Histoire de la Mécanique*. Griffon, Neuchâtel, Suisse.
- Eliassen A. et K. Pedersen, 1977 : *Meteorology, an introductory course*, vol. 1. Physical processes and motion. Universitetsforlaget, Oslo, Norvège, 204 p.
- Exner F. M., 1917 : *Dynamische Meteorologie*. J. Springer, 421 p.
- Feynman R. P., R. B. Leighton et M. Sands, 1977 : *The Feynman lectures on physics*, vol. 1. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, États-Unis.
- Genty R., 1994 : À propos de Coriolis. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, 8, 36-42.
- Gill A. E., 1982 : *Atmosphere-ocean dynamics*. Academic Press, Londres, Royaume-Uni, 661 p.
- Grattan-Guinness I., 1981 : Mathematical physics in France 1800-1840. Dans *Mathematical Perspective Papers in honour of Kurt Biermann*, 95-138.
- Grattan-Guinness I., 1994 : *Companion encyclopedia of the history and philosophy of the mathematical sciences*. Deux volumes. Routledge, Grattan-Guinness I. (Ed.), Londres, Royaume-Uni.
- Grattan-Guinness I., 1997 : *The Fontana History of the Mathematical Sciences*. Fontana, 817 p.
- Green J. S. A., 1983 : Trough-ridge systems as slant-wise convection. Dans *Meso-scale atmospheric circulations*. B.W. Atkinson Ed., Academic Press, 176-193.
- Hadley G., 1735 : On the cause of the general trade-winds, *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 39, 58-62. Dans Shaw (1979).
- Hartmann D. L., 1994 : *Global physical climatology*. Academic Press, Londres, Royaume-Uni, 411 p.
- Haurwitz B., 1941 : *Dynamic meteorology*. McGraw-Hill, 365 p.
- Haurwitz B., 1966 : Coriolis and the deflective force. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 47, 659.
- Held I. M., 1993 : Lectures on the general circulation of the atmosphere. Dans *Atmosphere-ocean dynamics and interannual climate variability*. Friday Harbor Laboratories, University of Washington.
- Holton J. R., 1992 : *Introduction to dynamic meteorology*. Academic Press, Londres, Royaume-Uni, 511 p.
- Holton J. R., 1993 : Stationary planetary waves: The second Haurwitz memorial lecture. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1735-1742.
- James I. N., 1994 : *Introduction to circulating atmospheres*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 422 p.
- Jordan C. L., 1966 : On Coriolis and the deflection force. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 47, 401-403.
- Khrgian A., 1970 : *Meteorology. A Historical Survey*, vol. 1, Keter Press, 387 p.
- Koettsier T., 1994 : Kinematics. Dans *Companion encyclopedia of the history and philosophy of the mathematical sciences*. Grattan-Guinness Ed., Routledge, 994-1022.
- Kuhn T. S., 1977 : Energy conservation as an example of simultaneous discovery. Dans *The essential tension, selected studies in scientific tradition and change*. The University of Chicago Press, 66-104.
- Kung E. C., 1971 : A diagnosis of adiabatic production and destruction of kinetic energy by the meridional and zonal motions of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 97, 61-74.
- Kung E. C., 1977 : Energy sources in middle-latitude synoptic-scale disturbances. *J. Atmos. Sci.*, 34, 1352-1365.
- Kutzbach G., 1979 : *The thermal theory of cyclones*. American Meteorological Society, Boston, États-Unis, 254 p.
- Lančzos C., 1949 (réédition 1986) : *The variational principles of mechanics*. Dover, 418 p.



- Landsberg H. E., 1966 : Why indeed Coriolis ? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 47, 887-889.
- Laplace P.-S., 1846 : Exposition du système du monde. Dans *Œuvres de Laplace*, livre IV, chap. XIII. Imprimerie royale, Paris.
- Le Tourneur S., 1961 : Coriolis. Dans *Dictionnaire de biographie française*, vol. 9, Paris.
- Lorenz E. N., 1967 : *The nature and theory of the general circulation of the atmosphere*. Organisation météorologique mondiale, WMO 218 TP 115, Genève, Suisse, 161 p.
- Lorenz E. N., 1969 : The nature of the global circulation of the atmosphere: A present view. Dans *The global circulation of the atmosphere*, Royal Meteorological Society, Londres, 3-23.
- Lorenz E. N., 1983 : A history of the prevailing ideas about the general circulation of the atmosphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 64, 730-734.
- Marion J. B., 1970 : *Classical dynamics of particles and systems*. Academic Press, Londres, Royaume-Uni, 573 p.
- Neumann J., 1984 : The Coriolis force in relation to the sea and land breezes. A historical note. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 65, 24-26.
- Peixoto J. P. et A. H. Oort, 1992 : *Physics of Climate*. American Institute of Physics, New York, États-Unis, 520 p.
- Persson A., 1997a : How to visualise Rossby waves. *Weather*, 52, 98-99.
- Persson A., 1997b : The Coriolis force and the veering of the sea-breeze. *Weather*, 52, 264.
- Petterssen S. et S. J. Smedby, 1971 : On the development of extratropical cyclones. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 97, 457-482.
- Rochas M. et J.-P. Javelle, 1993 : *La météorologie. La prévision numérique du temps et du climat*. Syros, Paris, 262 p.
- Rossby C.-G., 1941 : The scientific basis of modern meteorology. Dans *U.S. Yearbook of Agriculture, Climate and Man*, 599-655.
- Rossby C.-G., 1950a : Discussion. *Weather*, 5, 190.
- Rossby C.-G., 1950b : Discussion. *Meteorological Magazine*, 6, 175.
- Rossby C.-G., 1950c : Discussion. *Meteorological Magazine*, 7, 202-203.
- Rossby C.-G., 1959 : Current problems in meteorology. Dans *The atmosphere and the sea in motion. The Rossby memorial volume*. B. Bolin Ed., The Rockefeller Inst. Press, 9-50.
- Rouse H. et S. Ince, 1957 : *History of Hydraulics*. Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, 269 p.
- Shaw D. B. (Ed.), 1979 : *Meteorology over the tropical oceans*. Royal Meteorological Society, 278 p.
- Simpson J. E., 1985 : *Sea breeze and local winds*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 234 p.
- Smith C. S. et N. Wise, 1989 : *Energy and Empire. A Biographical study of Lord Kelvin*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- Snelders H. A. H. et C. J. E. Schurrmans, 1980 : *Buys-Ballot 1817-1890*. KNMI memo. 80-DM 008, Pays-Bas.
- Starr V. P., 1954 : Comments concerning Research on the General Circulation. *Tellus*, 6, 269-271.
- Starr V. P., 1968 : *Physics of negative viscosity phenomenon*. McGraw-Hill, 256 p.
- Stommel H. M. et D. W. Moore, 1989 : *An introduction to the Coriolis force*. Columbia University Press, 297 p.
- Thorpe A., 1993 : An appreciation of the meteorological research of Ernst Kleinschmidt. *Meteor. Z.*, 2, 3-12.
- Uccellini L. W., 1990 : The relationship between jet streaks and severe convective storm systems. Preprint volume of the 16th Conference on Severe Local Storms and the Conference on Atmospheric Electricity, Oct. 22-26 1990, American Meteorological Society, Boston, États-Unis.
- Van Mieghem J., 1973 : *Atmospheric energetics*. Clarendon Press, Oxford, Royaume-Uni, 306 p.
- Wiin-Nielsen A. et T.-C. Chen, 1993 : *Fundamentals of atmospheric energetics*. Oxford University Press, Oxford, Royaume-Uni, 375 p.

