

L'air et l'eau sculptent notre monde

Par **Frédéric Moisy¹, Etienne Guyon², Jean-Pierre Hulin¹, Marc Rabaud¹**

¹ Université Paris-Saclay

² École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris

Les fluides, et en premier lieu l'air et l'eau, sont essentiels à la vie sur Terre. L'eau est la matrice qui a rendu possible la formation des premières cellules, puis leur locomotion. Elle irrigue les plantes, y transporte les nutriments. L'air pénètre nos poumons, y transporte l'oxygène, qui continue son voyage dans le sang. Ainsi, au fil de l'évolution, le vivant a été façonné, sculpté, par les fluides.

On retrouve de telles sculptures à toutes les échelles autour de nous. Les mouvements d'air font vaciller la flamme d'une bougie, lèvent les vagues à la surface de la mer, dessinent les formes changeantes des nuages... À des échelles de temps plus longues, l'eau creuse le lit des rivières, y façonne des méandres. À des échelles plus longues encore, le manteau terrestre, cette pâte très visqueuse, se déforme, se plisse, dessine nos montagnes. Qui ensuite seront érodées par le lent travail de l'eau...

La science qui décrit les mouvements de l'air et de l'eau, et plus généralement des fluides (qu'il s'agisse de gaz ou de liquides), est la dynamique des fluides. L'éclairage du physicien permet de comprendre son influence sur le monde qui nous entoure. C'est ce que nous proposons dans le livre *L'impermanence du monde : la physique de l'éphémère*, paru récemment chez Flammarion : une promenade à travers quelques pages de sciences, promenade au cours de laquelle les forces fluides et les rythmes du temps sont nos guides, discrets mais omniprésents. Penchons-nous ici sur quelques-unes de ces fascinantes « sculptures fluides »...



L'impermanence du monde, Edition Flammarion (2022)

Des rivières qui se tortillent

Si l'on observe le cours d'une rivière vu du ciel, on s'aperçoit que les méandres ne sont pas une exception mais la règle. Comment se forment-ils ? Pourquoi la gravité ne dirige-t-elle pas simplement l'écoulement de l'eau selon la ligne de plus grande pente, et donc en ligne droite ? Étrange, si l'on compare à une procession de fourmis reliant une source de nourriture à leur fourmilière : le chemin initial est souvent sinueux, résultat de l'errance des premières exploratrices, mais en quelques heures les ouvrières redressent progressivement les courbes, et le chemin devient de plus en plus

rectiligne. Pour une rivière, c'est exactement l'inverse ! En quelques années, siècles ou millénaires, le trajet devient de plus en plus sinueux : les déformations s'amplifient. La cause en est l'érosion du sol, mais le mécanisme, subtil, a été expliqué pour la première fois en 1926 par le physicien Albert Einstein !

Dès que l'eau rencontre une zone plus résistante, par exemple une roche plus dure ou un sol plus cohésif, elle dévie de sa trajectoire initiale, disons vers la droite. En aval de cette déviation, la gravité tend naturellement à ramener le cours d'eau dans le droit chemin, et donc vers la gauche. Or, qui dit virage dit force centrifuge : l'eau se trouve déportée vers l'extérieur du virage. L'écoulement induit par cette force centrifuge, plus fort vers la surface, va donc éroder la berge extérieure, et ainsi augmenter l'amplitude du méandre. Cet écoulement est compensé par un écoulement au fond du lit vers l'intérieur du virage, qui ramène les sédiments érodés vers l'intérieur : c'est pourquoi on observe souvent une berge assez abrupte à l'extérieur du virage et une plage bien moins pentue à l'intérieur.

Ce mécanisme s'observe en accéléré sur certaines plages traversées par un ruisseau. Sur un sable facilement érodable, quelques heures suffisent, à marée descendante, pour former des méandres. À l'inverse, ce mécanisme s'étale sur plusieurs milliers d'années sur des sols durs, par exemple dans les vallées calcaires encaissées. Mais inexorablement les courbes s'amplifient, jusqu'à former de grandes boucles qui peuvent se reconnecter, laissant de côté des bras morts. Temporairement la rivière se retrouve alors plus rectiligne... mais elle ne tardera pas à se tortiller de nouveau comme une anguille !



Méandres d'un ruisseau traversant une plage en Bretagne (Cliché M. Rabaud)

Des vagues sur la mer comme au ciel

Autres sculptures éphémères de l'eau : les vagues. D'où viennent-elles et comment se propagent-elles ? Là encore, tout est histoire de gravité et de courbure.

En l'absence de vent et sous l'action de la gravité, la surface d'un lac ou de la mer est lisse. Jetons un caillou dans l'eau : celui-ci va temporairement former un creux, mais peu après l'eau déplacée va revenir en force, formant l'instant d'après une bosse au même endroit, qui à son tour va s'abaisser pour former de nouveau un creux. Il s'ensuit une oscillation périodique de la surface de l'eau, qui va se propager, transportant au loin l'énergie communiquée par le caillou. Ce transport d'énergie est atténué par la viscosité du liquide, c'est-à-dire par sa propension à convertir l'énergie mécanique en chaleur. Ainsi, les ronds dans l'eau peuvent parcourir plusieurs mètres avant de s'évanouir, tandis qu'ils ne dépasseraient pas un mètre dans de l'huile... Et qu'ils ne se formeraient même pas du tout dans du miel !

En dehors de causes « accidentelles » — un caillou jeté dans l'eau, le sillage d'un bateau ou un séisme sous-marin — pour l'essentiel les vagues présentes à la surface de l'eau sont issues de l'action du vent. Plus le vent souffle fort, longtemps et sur une grande zone, plus les vagues acquièrent une grande amplitude. Le détail des mécanismes en jeu fait encore l'objet de recherches, mais on peut quand même dégager les mécanismes de base. Dès qu'il existe du vent au-dessus de l'eau, son écoulement est turbulent, c'est-à-dire fluctuant en direction et en force, ce qui va déformer légèrement la surface, mais de manière désordonnée. Au-dessus de ces petites bosses initiales, d'une fraction de millimètre, le vent se trouve localement renforcé, de la même façon que le vent est plus fort au sommet d'une colline que dans la plaine. Or depuis Daniel Bernoulli, un des pères fondateurs de la mécanique des fluides au 18^{ème} siècle, on sait que vitesse et pression sont liées : là où la vitesse est plus forte, la pression est plus faible. Il existe donc une légère dépression au-dessus de la crête des vagues, ce qui la tire vers le haut. Cette force s'oppose à la gravité et peut donc augmenter la hauteur de la

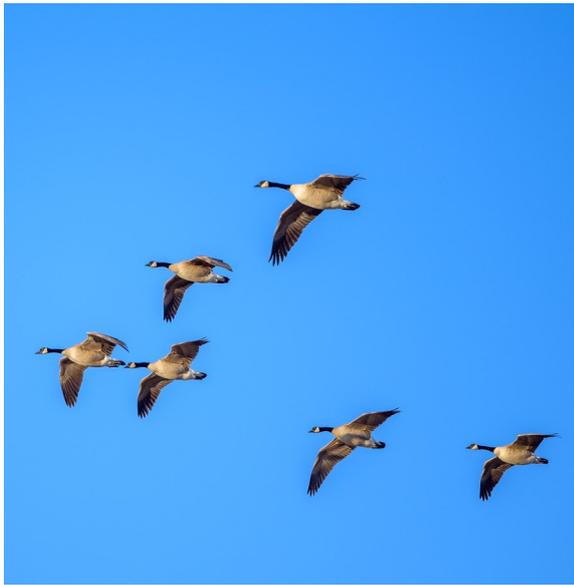
vague, à condition que le vent soit suffisant. La hauteur des vagues augmente alors, mais aussi la distance entre les crêtes, ce qui conduit à une vitesse de propagation plus élevée. En conséquence, les vagues « ressentent » un vent relatif moins fort que si elles étaient immobiles, ce qui explique pourquoi elles ne croissent pas indéfiniment. Même longtemps après leur formation par le vent, ces vagues continuent à se propager — c'est qu'on appelle la houle — en perdant peu à peu de leur amplitude.

En pleine mer, la vitesse des vagues ne dépend que de la distance entre leurs crêtes (appelée longueur d'onde) : elles avancent d'autant plus vite que cette distance est grande. En revanche, lorsque la profondeur de l'eau devient nettement inférieure à cette longueur d'onde, la vitesse des vagues ne dépend plus que de la profondeur de l'eau : elles ralentissent à mesure qu'elles s'approchent de la côte. Ainsi, en s'approchant d'une plage, les vagues ralentissent tout en conservant leur énergie, ce qui implique l'augmentation progressive de leur amplitude. Ce raidissement des vagues près de la côte est le prélude à leur déferlement... et au plaisir des surfeurs !

On trouve parfois dans le ciel des bandes nuageuses qui évoquent irrésistiblement un champ de vagues. Cette ressemblance n'est pas fortuite : lorsque deux masses d'air de densité différentes s'écoulent l'une au-dessus de l'autre, il peut se former des ondulations analogues à celles qui se forment à la surface de l'eau. L'évolution de ces ondulations est toutefois bien plus lente, car l'effet de la gravité est bien moins prononcé entre deux masses d'air de densité similaire. Ces « vagues de nuages » sont fréquentes, mais elles ne sont pas forcément visibles : il faut de surcroît que l'air soit humide pour venir se condenser au bon endroit et ainsi rendre apparentes les ondulations !



Vagues de nuages dans le ciel de Paris (Cliché M. Rabaud)



Les oiseaux migrateurs adoptent cette formation en « V » afin de minimiser leur dépense énergétique

Oiseaux mécaniciens des fluides

Autre spectacle fascinant dans le ciel : celui du vol coordonné des oiseaux. Là encore, la mécanique des fluides nous fournit des clefs pour décrypter ces formes étonnantes, qu'il s'agisse du vol en V des oiseaux migrateurs, ou des nuées mouvantes des étourneaux.

Pour voler, un oiseau (tout comme un avion !) doit propulser de l'air à la fois vers l'arrière pour avancer, et vers le bas pour contrer la gravité. Il peut le faire soit en battant des ailes, soit en planant - il s'agira alors de perdre le moins d'altitude possible, ou de se maintenir en profitant d'un courant air ascendant.

Du fait de l'existence d'un flux d'air envoyé vers le bas, il n'est pas conseillé à un deuxième oiseau de suivre exactement le premier. Mais ce courant d'air vers le bas est accompagné par un courant d'air latéral vers le haut apparaissant au bout des ailes : aussi est-il intéressant pour le second oiseau de se décaler latéralement, d'une envergure d'aile environ par rapport à l'axe du premier. Il en va de même pour un troisième congénère, qui ne devra se placer ni derrière le premier ni derrière le second. C'est cet effet aérodynamique qui explique l'organisation en « V » des migrateurs, comme les oies, les pélicans ou les ibis... Le gain énergétique, qui peut dépasser les 10%, a pu être confirmé en équipant ces oiseaux d'un cardio-fréquence-mètre !

Cette organisation en V semble bien différente de la forme que prend un groupe de cyclistes, qui préfèrent soit s'aligner en file indienne, soit en peloton dense. D'où vient cette différence ? Contrairement à un oiseau, un cycliste n'avance pas en s'appuyant sur l'air, mais en s'appuyant sur la route... Il n'expulse donc pas l'air derrière lui, mais au contraire l'emmène avec lui dans sa course ! Ainsi, un second cycliste, en se plaçant juste à l'arrière du premier, se protégera du vent relatif et bénéficiera d'un effet d'entraînement. Les professionnels ou les amateurs confirmés savent profiter au mieux de cet effet d'aspiration. Économie et coopération expliquent là encore la forme du groupe !

Qu'en est-il des fascinantes chorégraphies que dessinent dans le ciel les étourneaux ? Ce sont parfois plusieurs milliers d'oiseaux qui se retrouvent pour former des nuées aux formes changeantes, qui s'étirent, se condensent, se scindent et se reforment sans cesse. Il ne s'agit pas ici de gain énergétique, mais plutôt d'une stratégie collective pour échapper aux prédateurs – l'union fait la force !

Ces nuées mouvantes font irrésistiblement penser à un fluide... La mécanique des fluides serait-elle encore derrière ce phénomène ? D'une certaine façon, oui : tout comme le mouvement coordonné des molécules d'eau sous-tend, à une échelle supérieure, le déplacement macroscopique d'un fluide, on peut voir les étourneaux comme les constituants élémentaires d'une « matière » déformable et animée. Ce concept de « matière active », dont les physiciens étudient actuellement les propriétés, s'applique également aux bancs de sardines ou aux troupeaux de brebis... Certains outils mathématiques qui ont permis de comprendre à la fin du 19^{ème} siècle les propriétés de la matière, comme l'ébullition de l'eau, sont ainsi réemployés pour décrire ces fascinants ballets.

La nature nous offre bien d'autres exemples de telles « sculptures » éphémères, sur des échelles de temps très diverses. Citons les galets aux formes bien lisses, taillés dans le fracas d'un éboulement avant d'être patiemment polis par le lent travail des vagues, ou l'« écoulement » intermittent d'un incendie sur les flancs d'une colline boisée, ou encore la danse hypnotique des blés murs dans le vent... Comprendre les mécanismes physiques à l'origine de ces formes mouvantes ne nuit en rien à la fascination que procure leur contemplation, bien au contraire !

Pour en savoir plus :

Étienne Guyon, Jean-Pierre Hulin, Frédéric Moisy, Marc Rabaud, *L'impermanence du monde : La physique de l'éphémère*, Flammarion 2022.