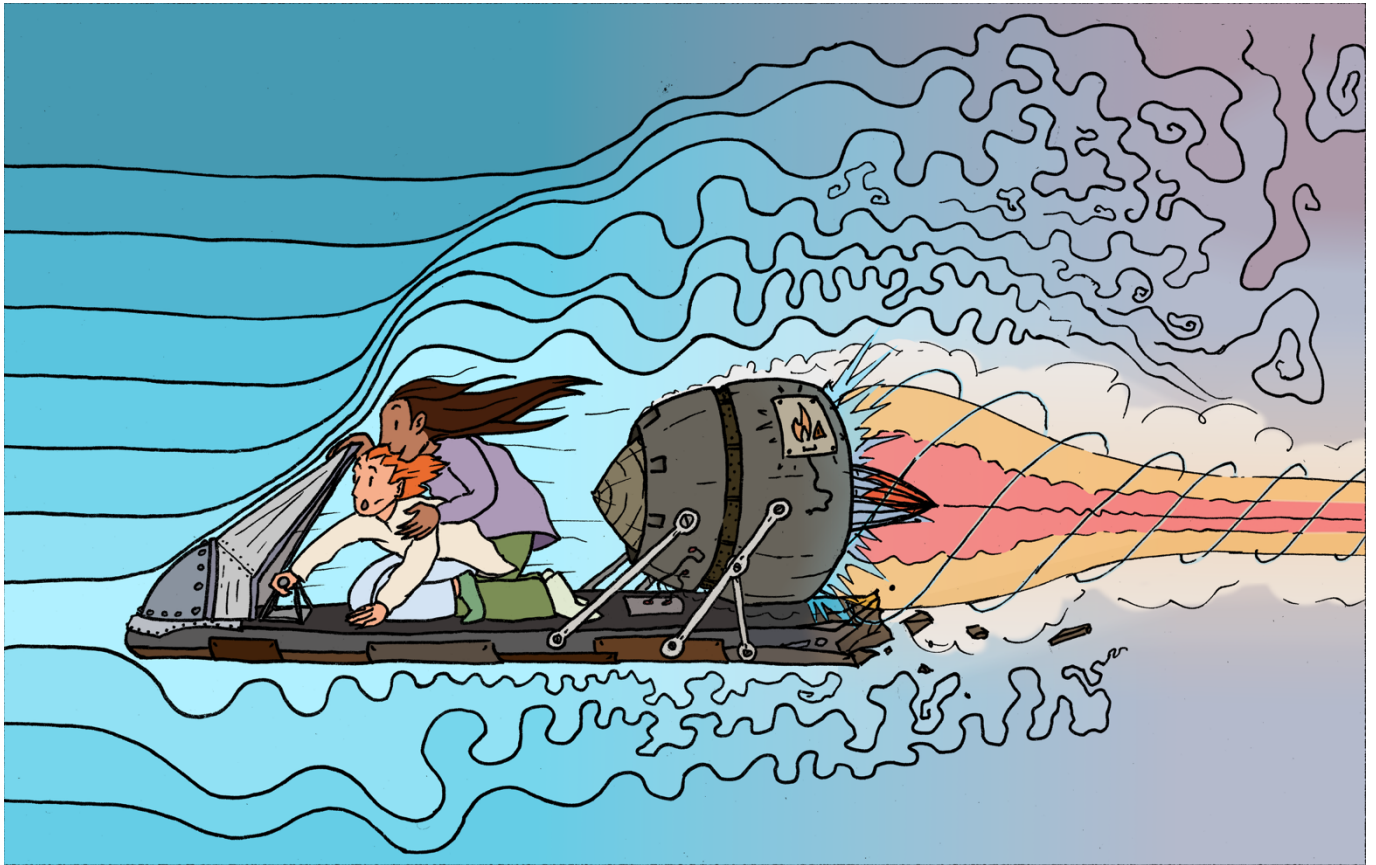




QUAND ALLER PLUS VITE NÉCESSITE MOINS D'ÉNERGIE

Serge Mora^{1*}, Martine Le Berre², Yves Pomeau²

¹ LMGC, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

² LadHyX, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France

FLUIDE. Matériau sans forme spécifique, qui peut s'écouler sous l'effet d'une force, aussi petite soit-elle. Les fluides comprennent les liquides et les gaz.

TRAÎNÉE. En mécanique des fluides, force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un liquide ou un gaz et agit comme un frottement.

Un objet en mouvement dans l'air ou dans l'eau est soumis à une force de ralentissement. Ce ralentissement est responsable de la majeure partie de l'énergie dépensée lorsqu'un véhicule, un athlète ou un autre corps se déplace dans un fluide. On observe souvent que la force de ralentissement augmente avec la vitesse. Cependant, un phénomène totalement contre-intuitif se développe sur une certaine plage de vitesse : la force de ralentissement y diminue considérablement avec la vitesse. Dans cet article, nous t'expliquons que ce comportement étonnant est étroitement associé au phénomène de turbulence dans le fluide. Tu y découvriras aussi que le champ d'applications de cette découverte est vaste et reste à développer.

INTRODUCTION

Se frayer un chemin à travers un **fluide** induit une force de résistance, connue sous le nom de **traînée**, contre laquelle nous devons lutter pour nous déplacer. Le maintien de l'effort musculaire (pour un cycliste ou un nageur, par exemple) ou l'utilisation d'un moteur est donc nécessaire pour maintenir le mouvement. Pour un fluide donné,

VITESSE RELATIVE. Vitesse d'un corps en mouvement par rapport à un autre.

la force de traînée dépend de la forme de l'objet, de la rugosité de sa surface et de sa **vitesse relative**. On estime qu'elle est responsable de 18 % de la consommation mondiale d'énergie : à l'heure où réduire notre consommation d'énergie est un enjeu majeur, savoir prévoir et maîtriser cette force est essentiel.

L'INTRIGANTE BALLE DE GOLF

Au XIX^{ème} siècle, les balles de golf étaient faites avec une résine naturelle. Elles étaient parfaitement lisses lorsqu'elles sortaient de l'atelier. Mais, après quelques parties, elle se marquaient, se cabossaient et se fendaient légèrement. Les joueurs ont remarqué quelque chose d'étrange : les balles abîmées volaient deux à trois fois plus loin que les neuves !

Face à ce constat, les golfeurs sont devenus pragmatiques : ils ont commencé à entailler volontairement leurs balles pour améliorer leur distance de vol. Les fabricants ont suivi en produisant des balles gravées, striées puis piquetées. Et vers 1905, un ingénieur britannique (William Taylor) dépose le premier brevet pour une balle à alvéoles régulières, la forme que nous connaissons aujourd'hui. Pourtant, à l'époque, personne ne savait pourquoi cela fonctionnait. Il aura fallu attendre les travaux de grands physiciens pour percer le secret de ce mystère aérodynamique. Voyons comment.

UNE EXPÉRIENCE HISTORIQUE

Au tout début du XX^{ème} siècle, Gustave Eiffel mesurait les forces de traînée avec une précision remarquable [1, 2]. Avec ses collaborateurs, il a d'abord utilisé le vent ressenti lorsqu'un appareil de mesure tombe dans l'air calme depuis le deuxième étage de la Tour Eiffel (plus de 115 mètres de haut). Les vitesses ont atteint 40 ms⁻¹*. À partir de 1912, Eiffel conçoit une soufflerie à Paris pour mieux contrôler les flux d'air. La **Figure 1** montre une série de mesures pour une sphère de rayon 8,1 cm, soumise à des écoulements d'air de vitesses comprises entre 3 et 32 ms⁻¹. Le principe de l'appareil de mesure est illustré dans l'encart de la figure. Pour les vitesses inférieures à 11 ms⁻¹, la force de traînée F augmente approximativement proportionnellement au carré de la vitesse. Une mesure fiable de la traînée n'était pas possible à des vitesses comprises entre 12 et 15 ms⁻¹, car la sphère ne se stabilise pas à ces vitesses. Ensuite, de manière frappante, la valeur de la force de traînée est plus faible pour une vitesse de 15 ms⁻¹ qu'elle ne l'était pour 11 ms⁻¹ : c'est la manifestation de la **crise de traînée**. La traînée commence ensuite à augmenter progressivement à mesure que la vitesse dépasse 15 ms⁻¹.

À l'époque, beaucoup de gens doutaient de ces résultats, qui ont ensuite été vérifiés de manière indépendante [3]. Cette crise de

* Mètres par seconde

CRISE DE TRAÎNÉE.

Phénomène très contre-intuitif où la traînée d'un corps diminue drastiquement alors que la vitesse de l'écoulement augmente.

TURBULENT. Écoulement qui est partout tourbillonnant et désordonné (avec des tourbillons dont la taille, la vitesse, l'emplacement et l'orientation changent constamment).

VORTEX. Motif tourbillonnant de mouvement fluide, où le fluide se déplace dans une trajectoire circulaire ou en spirale autour d'un point ou d'un axe central.

LAMINAIRE. En couches qui suivent des trajectoires parallèles

PRESSION. Force exercée par un fluide par unité de surface ; cette force agit perpendiculairement (ou normalement) à toute surface avec laquelle elle entre en contact.

traînée se produit pour d'autres rayons de sphères, pour d'autres formes d'objets et dans d'autres fluides (l'eau, par exemple). La vitesse à laquelle le phénomène se produit change alors.

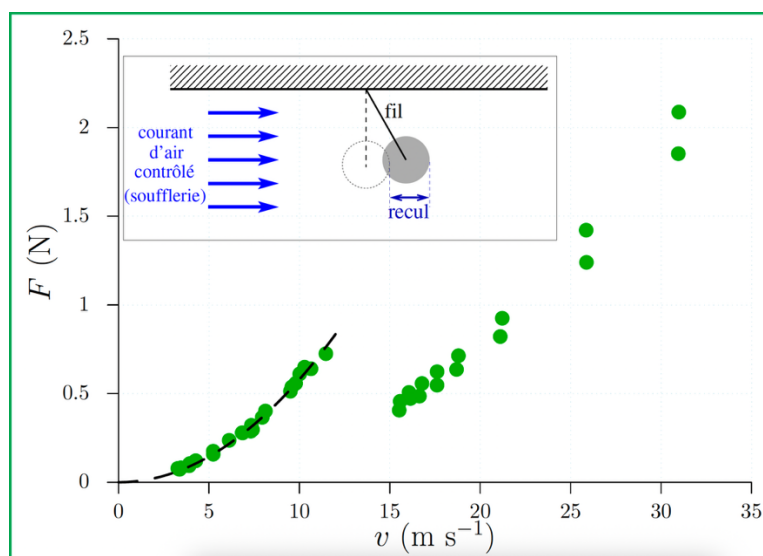


Figure 1. Résultats des mesures de la force de traînée (F) en fonction de la vitesse (v) effectuées par les collaborateurs d'Eiffel en 1912 à l'aide d'une sphère lisse de rayon 8,1 cm. La ligne pointillée indique une variation de F proportionnelle au carré de la vitesse. Encadré : principe de l'appareil utilisé pour ces mesures. Une sphère, maintenue par deux fils (un seul fil est visible sur le schéma, car le second est caché par le premier), est placée dans une soufflerie. Le déplacement vers l'aval de la sphère est utilisé pour déterminer la force de traînée.

LE RÔLE DE LA PRESSION

Les deux images de la **Figure 2** montrent une sphère dans une soufflerie. L'ajout de fumée en amont permet une visualisation partielle de l'écoulement. Dans la photo de gauche, la vitesse est inférieure à celle à laquelle la crise de traînée commence à se produire (cas 1), tandis que dans la figure de droite (cas 2), elle est supérieure à celles pour lesquelles la crise de traînée se produit. Une fine boucle de fil, collée symétriquement sur le côté amont de la sphère dans la figure de droite (cas 2), a eu pour effet de réduire la vitesse à laquelle la crise de traînée s'est produite, facilitant ainsi sa visualisation.

Dans les deux cas, on distingue deux régions. La région en aval correspond au sillage de la sphère. Ce sillage est **turbulent** : il est constitué d'un mélange de **vortex** de taille, d'orientation, de vitesse et de position désordonnées. En dehors de cette zone, l'écoulement est plus rapide et se produit en couches régulières et ordonnées (appelées couches **laminaires**).

La **pression** dans le fluide n'est pas uniforme, car la vitesse du fluide autour de la sphère varie. Elle est plus basse dans le sillage de la sphère que dans la zone symétrique en amont : la sphère est donc aspirée en aval, produisant l'essentiel de la force de traînée (l'autre contribution étant la force de frottement du fluide).

Les mesures ont montré que la pression dans le sillage ne varie pas beaucoup lorsque la crise de traînée se produit. Quand la taille du sillage se contracte (cas 2 de la figure 2), sa section transversale diminue, l'aspiration en aval est donc plus faible, ce qui provoque la chute de la force de traînée lorsque la crise de traînée se produit. À ce stade, nous avons vu que la réduction de la force de traînée est le résultat d'une réduction de la taille du sillage de la sphère. Reste à identifier l'origine de cette transition de taille.

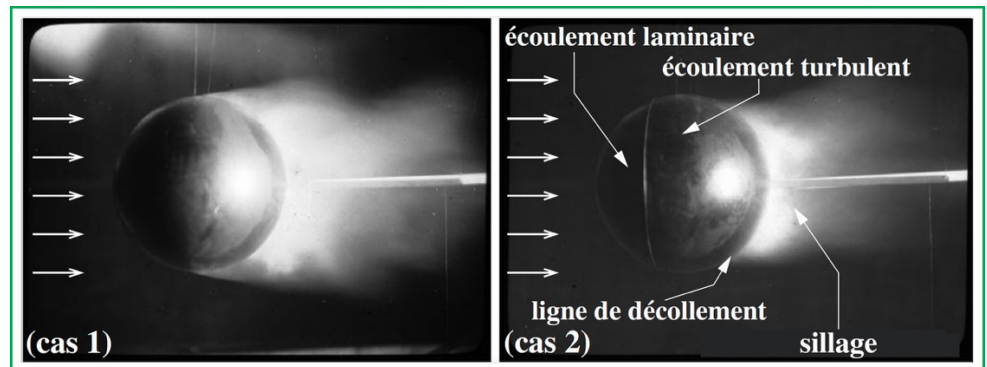


Figure 2. Images d'archives capturées dans les airs (avec de la fumée ajoutée), en 1914 à Göttingen. À gauche : la vitesse est inférieure à celle à laquelle la crise de traînée se produit pour cette sphère. À droite : la vitesse relative de cette sphère, avec une boucle symétriquement collée à sa surface, est supérieure à celle à laquelle se produit la crise de traînée. Les flèches sur la gauche de chaque figure indiquent le sens du vent. D'après [4].

LE RÔLE DE LA TURBULENCE

Considérons d'abord le cas plus simple d'une grande plaque mince rectangulaire alignée avec un flux d'air, avec le bord d'attaque perpendiculaire au flux d'air incident, comme le montre la **Figure 3a**. On observe alors que l'écoulement est laminaire sur une distance au bord d'attaque inférieure à une certaine valeur L qui est à peu près inversement proportionnelle à la vitesse (la valeur de L est de quelques dizaines de centimètres pour une plaque lisse lorsque la vitesse est de 10 ms^{-1}). Pour les distances supérieures à L , l'écoulement au voisinage de la surface de la plaque devient turbulent. De plus, moins la surface est lisse, plus la distance L est petite.

Revenons maintenant au cas de la sphère : un schéma similaire se produit, sauf que la courbure de la sphère induit en certains points le décollement (séparation) des lignes de courant, générant un sillage (**Figure 2**). Partons d'un scénario où la vitesse d'écoulement est suffisamment faible pour que la longueur L - qui, comme précédemment, marque la transition de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent le long de la surface de la sphère - soit supérieure à la distance séparant le point d'attaque de la sphère de la ligne de décollement, comme le montre la **Figure 3b**. Cela signifie que le décollement s'effectue selon un régime laminaire.

Augmentons progressivement la vitesse d'écoulement. La distance L diminuera alors (comme ci-dessus avec la plaque) et, au-delà d'une certaine vitesse, deviendra plus petite que la distance séparant le point d'attaque de la sphère de la ligne de décollement : le décollement se produira donc à l'intérieur d'une zone de turbulences.

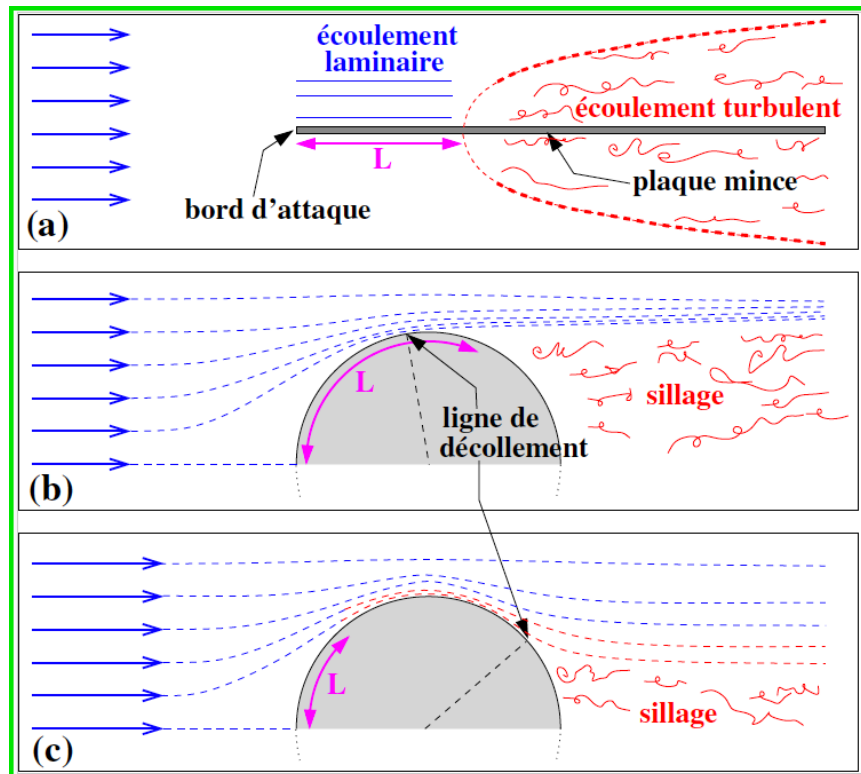


Figure 3. (A) : Plaque mince placée parallèlement à un flux d'air. La longueur L caractérise la zone de transition entre l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent le long de la plaque. (B) et (C) : représentations de la partie supérieure de sphères placées dans un flux d'air. L correspond à la distance au-delà de laquelle l'écoulement le long de la surface devient turbulent. Le cas B représente une situation d'écoulement où la vitesse est inférieure à la vitesse à laquelle de crise de traînée commence, contrairement au cas C, où la crise de traînée s'est produite. Les zones d'écoulement laminaire sont indiquées en bleu et les zones d'écoulement turbulent en rouge.

Il a été établi que l'écoulement turbulent « tient » mieux à une paroi que l'écoulement laminaire. Par conséquent, une fois que la vitesse d'écoulement dépasse un certain seuil, le décollement se produit soudainement beaucoup plus loin, ce qui réduit la taille du sillage. Cette explication de l'origine de la crise de la traînée a été avancée par le physicien allemand Ludwig Prandtl en 1927 [4].

QUELQUES APPLICATIONS

Comprendre la crise de la traînée est crucial dans une variété d'applications. Les ingénieurs peuvent optimiser les formes et les caractéristiques de la surface des véhicules, des navires et des avions pour tirer pleinement parti de l'effet de la crise de traînée, en minimisant la traînée à certaines vitesses et en améliorant à la fois l'efficacité énergétique et les performances.

Les applications dans le domaine du sport sont nombreuses.

- Revenons à la balle de golf : grâce aux alvéoles, l'air qui frotte contre la surface devient turbulent à des vitesses beaucoup plus faibles que sur une surface lisse. Cette turbulence permet à l'air de « coller » plus longtemps à la forme arrondie de la balle. Le sillage d'air perturbé laissé derrière la balle est alors beaucoup plus étroit, ce qui réduit drastiquement la force de succion qui la freinait : les alvéoles ont permis de déclencher la crise de traînée dès le moment du swing, divisant la résistance de l'air par plus qu'un facteur deux. Elles permettent ainsi à la balle de s'envoler pour atteindre le green !
- Les balles de baseball : lorsqu'une balle présente des irrégularités plus localisées (comme les coutures d'une balle de baseball), l'apparition de la zone turbulente se produit de manière non symétrique. Cela introduit une force déséquilibrée. Mais lorsque le ballon tourne légèrement, ce déséquilibre peut être inversé, ce qui fait que le ballon zigzague, ce qui rend plus difficile pour un adversaire de l'intercepter (c'est l'effet « balle papillon »).

CONCLUSION

La crise de traînée est un exemple de la façon dont la science peut tirer parti d'un phénomène complexe et contre-intuitif pour concevoir des solutions utiles : grâce à la crise de traînée, nous pouvons voyager plus vite, consommer moins d'énergie et même battre des records sportifs. De nombreuses autres applications restent encore à inventer. Mais certaines questions restent sans réponse. Par exemple, lorsque la vitesse de crise de traînée est atteinte, le sillage se rétrécit-il d'un seul coup ou seulement par intermittence ? Et reprend-il la même forme qu'avant lorsque la vitesse redescend en dessous de ce seuil ?

L'explication proposée par Prandtl est basée sur l'observation que la réduction de la traînée se produit lorsque l'écoulement est forcé d'être turbulent par une perturbation (avec un fil, par exemple). Mais est-ce vraiment la turbulence en surface qui induit le retard de décollement, et non la présence de perturbations qui déstabilisent directement le sillage, le rendant plus étroit ?

RÉFÉRENCES

- [1] J.E. Wesfreid. La Tour Eiffel : le premier laboratoire d'aérodynamique en France. *Reflets phys.*, 65:30–33, 2020.
- [2] F. Charru. La mécanique des fluides en France dans la première moitié du XXe siècle. *Revue annuelle de mécanique des fluides*, 55:11-44, 2023.
- [3] E. Achenbach. Expériences sur l'écoulement au-delà des sphères à des nombres de Reynolds très élevés. *Journal de mécanique des fluides*, 54(3) :565-575, 1972.
- [4] E. Bodenschatz et M. Eckert. Un voyage à travers les turbulences, volume 65, chapitre 2, pages 40-100. Cambridge University Press, 2011.

ARTICLE ORIGINAL (VERSION FRANÇAISE)

SOUMIS le 15 juin 2025 ; ACCEPTÉ le 26 mai 2026;

PUBLIÉ EN LIGNE le 21 juin 2026

ÉDITION : Manouk Abkarian, CBS Montpellier.

MENTORS SCIENTIFIQUES : [Manouk Abkarian](#) et [Serge Mora](#)

CITATION : Mora, S., Le Berre, M., Pomeau, Y. 2026. Quand aller plus vite nécessite moins d'énergie. Jeunes Francophones et la Science. <https://www.jeunesfrancophonesetlascience.fr/>

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2026 Mora, Le Berre, Pomeau.

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

REMERCIEMENTS : « Jeunes Francophones et la Science » remercie Marianne Entrevan et Mohamed Bensmili pour leur accueil et leur implication dans l'édition de cet article par leurs élèves.

JEUNES ÉDITRICES ET ÉDITEURS



CAPUCINE, RÉMI, ESTELLE, LUCIE, 16 ANS

Nous nous appelons Capucine, Rémi, Estelle et Lucie, nous avons 16 ans, et depuis notre petite enfance, nous sommes passionnés par le sport d'équipe. Adorant l'entraide et la coopération, la recherche nous intéresse particulièrement, et nous souhaitons en faire notre métier.

AUTEURS

SERGE MORA



Je suis professeur à l'Université de Montpellier et mène mes recherches au Laboratoire de Mécanique de Génie Civil. Mes travaux s'inscrivent dans le domaine de la "Mécanique-Physique" : j'étudie des systèmes simplifiés dont le comportement est principalement régi par des forces, pour mettre en évidence de nouveaux phénomènes et les expliquer à partir de lois générales. Les

ingénieurs pourront ensuite en tirer profit pour concevoir des dispositifs plus complexes. Mes recherches se concentrent sur l'étude expérimentale d'écoulements de différents types de matériaux (liquides, gaz, matériaux pâteux, ou les milieux granulaires tels que le sable). [*serge.mora@umontpellier.fr](mailto:serge.mora@umontpellier.fr)

MARTINE LE BERRE



J'ai été chercheuse au CNRS jusqu'à ma retraite officielle en 2008. J'ai travaillé à la faculté d'Orsay, dans 3 laboratoires différents, d'abord sur la statistique de la lumière, puis sur les interactions entre lumière et atomes, qui est le domaine de l'optique quantique. Mes travaux sont théoriques, mais souvent en collaboration avec des expérimentateurs, en particulier avec le groupe d'optique de Tucson en Arizona. Depuis une vingtaine d'années j'ai élargi mes recherches vers des problèmes divers dits de physique non linéaire, en collaboration avec Yves Pomeau, par exemple le déferlement des vagues, le patinage, l'explosion des étoiles, le vent, les inondations, et plus récemment l'écoulement de flots turbulents.

YVES POMEAU



Je suis chercheur en physique, et j'ai travaillé de nombreuses années au CNRS. J'ai aussi été professeur titulaire au département de mathématiques de l'Université d'Arizona (Etats-Unis), et je suis membre correspondant de l'Académie des sciences. Mes travaux couvrent des domaines variés comme la mécanique des fluides, le chaos, la supraconductivité, la mécanique quantique, ou encore la mécanique du solide. Mon objectif est de mieux comprendre des phénomènes complexes en utilisant des modèles simples, pour faire apparaître les grandes idées qui les gouvernent. J'ai étudié par exemple comment un écoulement régulier peut devenir soudain très complexe, ou comment des formes étonnantes peuvent apparaître à la surface d'un liquide. Ces recherches permettent d'expliquer des comportements que l'on retrouve dans la nature ou dans des applications techniques.