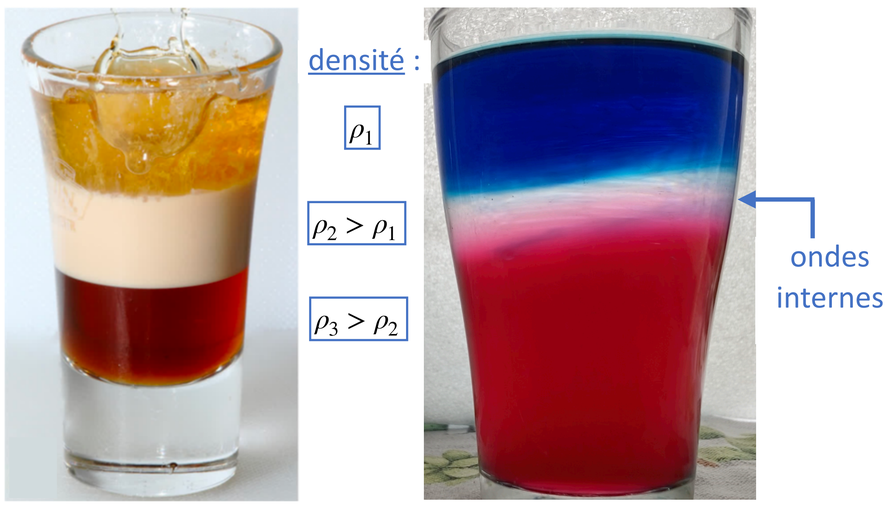
La cuisine des fluides

La cuisine est un extraordinaire laboratoire de mécanique des fluides. On y retrouve une énorme variété de phénomènes de base d'intérêt pour nombre de domaines scientifiques et techniques : sciences de l'océan et de l'atmosphère, sciences des matériaux, aérodynamique et ingénierie des transports, chimie industrielle et production pharmaceutique ou cosmétique. ***Nous allons en présenter certains selon l'ordre d'un menu***.

Cocktail apéritif : effets de densité

Un exemple classique de fluide multiphasique est un cocktail en couches. Ceci est un fluide stablement stratifié, car chaque couche est moins dense que celle du dessous, de sorte que la flottabilité (principe d'Archimède) maintient les couches séparées. La stratification est aussi couramment observée dans les écoulements environnementaux (atmosphère, océan), avec des impacts sur la formation des nuages, la circulation des courants marins et la biologie marine.



A gauche : cocktail B-52 (Kahlua, Bailey's Irish Cream, Grand Marnier) [Mathijssen et al., Rev. Mod. Phys. 95, 025004 (2023)]. A droite : expérience maison avec un fluide à trois couches réalisé en rajoutant des proportions différentes de sel dans l'eau. Lorsque le verre est légèrement perturbé, on peut observer des ondes de gravité, qui se propagent à l'intérieur du fluide plutôt qu'à sa surface (ondes internes).

Soupes et sauces : fluides non-newtoniens

Tout fluide possède une difficulté à s'écouler, due à des forces d'origine moléculaire appelées forces de viscosité. Au niveau macroscopique cela génère du frottement entre deux couches de fluide en contact, ce qui en ralentit le mouvement. Certains aliments, comme les soupes et les sauces, ont un comportement intermédiaire entre celui des liquides et celui des solides ; on les appelle fluides non-newtoniens, ou complexes. Ceci est dû à l'ajout d'ingrédients qui modifient les propriétés moléculaires du fluide et donne lieu à une viscosité qui dépend la contrainte appliquée. Si elle augmente suite à une sollicitation externe, le matériau durcit et se rapproche d'un solide, alors que si elle diminue, le matériau se fluidifie pour s'écouler avec moins d'effort. Ces propriétés complexes influencent fortement notre perception du goût, car elles sont directement liées à la texture des aliments et à la sensation en bouche.





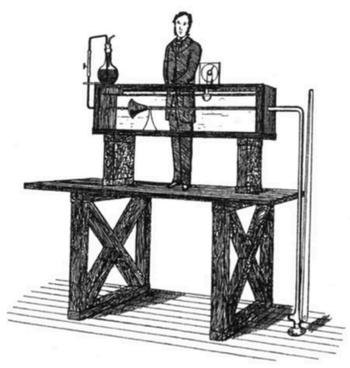


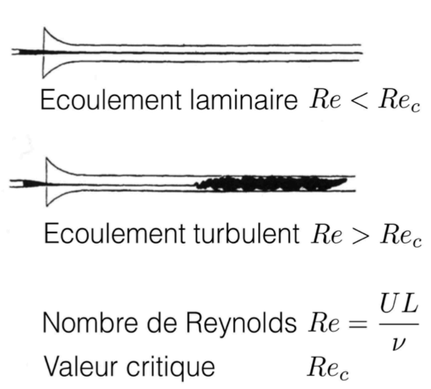
En haut : les fluides de faible viscosité (eau) s'écoulent plus facilement, dans les fluides de plus grande viscosité (miel) la résistance à l'écoulement est plus importante. En bas : une solution de maïzena (fluide non-newtonien), peut se comporter à la fois comme un liquide visqueux ou un solide, selon la sollicitation appliquée.

Unité Mécanique Lille
Stefano Berti stefano.berti@polytech-lille.fr
Enrico Calzavarini enrico.calzavarini@polytech-lille.fr

Plat principal : diffusion turbulente des odeurs

Les types d'écoulement fluide diffèrent grandement selon l'importance des effets visqueux. Le rapport entre les forces d'inertie (ou accélération) et les forces de viscosité définit un paramètre contrôlant le regime d'écoulement, appelé nombre de Reynolds ; son expression fait intervenir le produit de la taille de la région de l'espace intéressée par l'écoulement (p.ex. la dimension d'un conteneur) et de la vitesse du fluide, divisé par la viscosité du fluide même. Quand ce nombre est petit on observe un écoulement laminaire (régulier) et stable alors que s'il est suffisamment grand l'écoulement se déstabilise jusqu'à devenir imprévisible et désordonné dans l'espace, c'est à dire turbulent. Le régime turbulent est accompagné par une forte augmentation de l'efficacité des processus de mélange et dispersion, avec des conséquences importantes dans beaucoup des secteurs en ingénierie (de la production d'énergie à la protection de l'environnement). Grâce aux mouvements turbulents de l'air autour des plats chauds, leur parfum se diffuse rapidement et atteint nos narines.



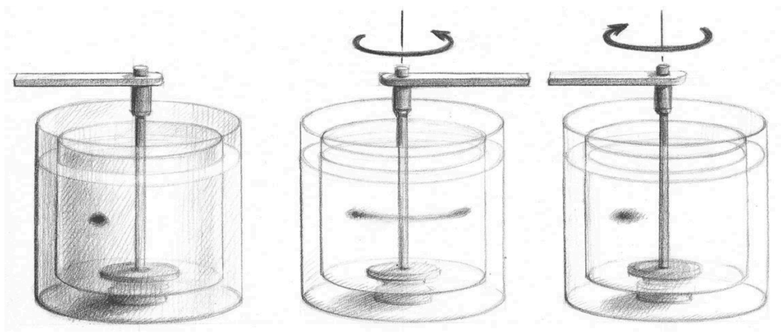




A gauche : expérience de Reynolds (1883) sur la transition à la turbulence dans une conduite [https://en.wikipedia.org/wiki/Osborne_Reynolds, adaptation]. A droite : pendant la cuisson, les vapeurs chauds se diffusent rapidement avec des mouvements turbulents.

Dessert : mélange dans les fluides visqueux

Une goutte de lait met longtemps à se mélanger dans une tasse de café en l'absence d'écoulement fluide. Remuer réduit considérablement le temps de mélange, jusqu'à quelques secondes, car les tourbillons turbulents étirent la goutte en fins filaments, ce qui permet à la diffusion d'agir efficacement. Toutefois, la turbulence ne se produit pas dans les fluides très visqueux. Le mélange peut alors être obtenu en combinant la diffusion et l'advection chaotique. On peut imaginer un morceau de pâte que l'on étire puis que l'on replie sur lui-même. La répétition de ces étapes crée de nombreuses couches à chaque fois plus fines, qu'une quantité minimale de diffusion suffit à mélanger entre elles. Un exemple culinaire d'advection chaotique est la préparation des macarons, où une pâte très visqueuse doit être mélangée délicatement afin de préserver sa structure mousseuse. Le choix du protocole de mélange a un effet considérable : si l'on déplace une tige d'agitation d'avant en arrière aucun mélange ne se produit en raison de la réversibilité cinématique, chaque mouvement dans un sens est compensé par un mouvement en sens inverse. Il faut donc rompre cette symétrie, par exemple avec des trajectoires circulaires (mélange possible mais lent), ou encore en forme de huit, ce qui augmente l'étirement du fluide et, donc, accélère le mélange. Des stratégies similaires, mais avec des trajectoires plus complexes sont utilisées dans les batteurs commerciaux. Au-delà du domaine de l'alimentation, l'advection chaotique est appliquée dans un grand nombre de disciplines, ci-inclus la cryptographie.





En haut à gauche: expérience du mélange réversible dans le dispositif de Taylor–Couette [Guazzelli & Morris]. En haut à droit : macarons. En bas à droite : expérience (gauche) et simulation numérique (droite) du protocole de mélange selon des trajectoires en forme de huit, utilisé pour mélanger une goutte de colorant dans un sirop sucré [Thiffeault et al., Phys. Rev. E 84, 036313 (2011)].

