



En avril 2010, de fines particules de cendres émises par un volcan islandais en éruption ont perturbé le trafic aérien européen. Le même mois, l'explosion de la plate-forme pétrolière *Deepwater Horizon*, dans le golfe du Mexique, a provoqué la marée noire la plus importante de l'histoire des États-Unis. Un an plus tard, un tsunami a frappé la côte de la région de Tohoku, au Japon. En plus des nombreuses pertes humaines, il a provoqué le désastre de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, accident qui a conduit au déversement de nombreux débris et éléments radioactifs dans l'océan Pacifique.

Ces trois événements d'importance partagent une même problématique : dans chaque cas, des matériaux sont libérés dans l'environnement à partir d'une source ponctuelle. Or, prévoir où les débris sont transportés par les courants atmosphériques ou marins est crucial pour rediriger le trafic aérien, les missions de nettoyage, etc.

Distinguer de l'ordre dans le chaos

Pour suivre des polluants ou des débris à la dérive et prévoir où ils vont s'accumuler, l'approche usuelle consiste à faire des simulations numériques des écoulements atmosphériques ou marins et à utiliser la carte des vitesses des courants. Cette approche permet en principe d'estimer le devenir des débris. La difficulté est que de telles prévisions sont très sensibles aux conditions initiales. En d'autres termes, deux simulations d'une même situation peuvent donner des résultats très différents si les positions ou les vitesses initiales diffèrent, même de façon infime. On peut remédier à ce problème de sensibilité aux conditions initiales en effectuant plusieurs simulations pour le même scénario. L'ensemble des résultats indique alors une tendance générale sur la trajectoire des débris, mais cela ne permet pas d'obtenir un résultat précis.

En outre, l'analyse classique consiste souvent à déterminer l'histoire complète d'une trajectoire. On obtient ainsi des figures complexes « en spaghettis » qu'il est difficile d'interpréter. Pour améliorer la compréhension et les prévisions du comportement d'un fluide, de nouveaux concepts et méthodes sont à développer.

Récemment, des idées se situant à l'interface de la dynamique non linéaire – domaine

L'ESSENTIEL

■ Les méthodes d'analyse classiques permettent difficilement de suivre le devenir de débris transportés par un écoulement irrégulier.

■ L'approche des structures lagrangiennes cohérentes consiste à identifier des lignes attractives et répulsives au sein du fluide.

■ Ces lignes invisibles constituent des « barrières de transport » qui permettent de mieux comprendre la dynamique de l'écoulement.

■ Cette approche serait applicable au sauvetage en mer, à la cardiologie, au suivi des pollutions...

Andrew Banerjee

Article reproduit avec l'autorisation de T. Peacock et G. Heller, *Physics Today*, vol. 66(2), pp. 41-47, 2013. ©2013, AIP Publishing LLC.

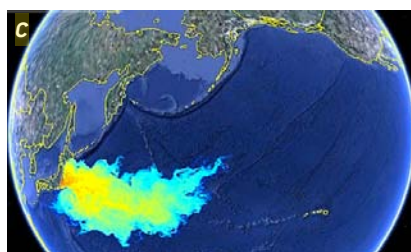
des mathématiques et de la physique qui sous-tend la théorie du chaos – et de la mécanique des fluides ont donné naissance au concept dit de structures lagrangiennes cohérentes. Il s'agit de lignes matérielles dans les fluides s'écoulant en deux dimensions et de surfaces dans les fluides à trois dimensions, qui forment une sorte d'ossature pour l'écoulement. Elles sont qualifiées de « barrières de transport », car elles déterminent le déplacement du fluide et délimitent des zones qui n'échangent pas de matière. Plus précisément, les structures lagrangiennes cohérentes sont des lignes matérielles vers lesquelles le fluide se trouvant à proximité est attiré ou d'où il est repoussé. Cette approche fournit un nouvel outil pour, entre autres, mieux comprendre le mouvement de débris charriés par un fluide.

Bien que la détection de structures lagrangiennes cohérentes dans des fluides en trois dimensions ait fait des progrès, cet article se concentre sur le cas des écoulements bidimensionnels. Les structures lagrangiennes cohérentes sont alors des courbes régulières et continues d'éléments fluides. Elles sont plus simples à manier que leur équivalent dans un fluide tridimensionnel, tout en gardant une importance pratique : les écoulements bidimensionnels décrivent de façon pertinente le transport de polluants qui restent à la surface de l'océan ou dans une couche de densité constante de l'atmosphère.

Des barrières qui canalisent les débris

Les barrières de transport reflètent une certaine organisation de l'écoulement du fluide. Dans les trois événements que nous avons mentionnés, elles permettent d'expliquer l'aspect allongé et étroit du nuage de cendres volcaniques, la structure étirée de la nappe de pétrole et l'aspect filamenteux de la répartition des contaminants radioactifs (voir la figure 1). L'approche novatrice des structures lagrangiennes cohérentes a montré son efficacité sur le terrain, en particulier lors d'une expérience réalisée dans la baie de Monterey et consistant à suivre la dérive de bouées, ainsi que lors de l'analyse *a posteriori* de la marée noire de *Deepwater Horizon* dans le golfe du Mexique.

Pour en comprendre les principes essentiels, il est nécessaire de présenter quelques notions de dynamique des fluides et des



1. LE NUAGE DE CENDRES de l'éruption du volcan islandais Eyjafjöll en 2010 *[a]*, la nappe de pétrole très étirée lors de la marée noire de la station pétrolière *Deepwater Horizon* dans le golfe du Mexique en 2010 *[b]*, l'étirement vers l'Est de déchets radioactifs issus de la centrale de Fukushima en 2011 *[c]* : des structures invisibles guident les débris au sein des océans et de l'atmosphère.

méthodes utilisées pour les étudier, ainsi que leurs limites.

Il existe deux points de vue pour étudier le mouvement d'un fluide. Le point de vue dit eulérien considère les propriétés du fluide en chaque point fixe de l'espace et du temps. On peut par exemple quadriller la surface du fluide et, en chaque nœud du maillage, spécifier la vitesse du fluide, en grandeur et en direction. On cartographie ainsi le champ des vitesses à un instant donné, ce qui est un exemple typique de la description eulérienne. Dans ce point de vue, l'identité et la provenance de l'élément fluide présent au point considéré n'ont pas d'importance.

À l'inverse, le point de vue dit lagrangien s'intéresse aux éléments de fluide et définit de petits volumes de fluide dont on suit le parcours et les variations de vitesse au gré de l'écoulement. Cette approche est la plus naturelle pour étudier la dérive de débris dans un fluide.

Pour élaborer une méthode efficace d'analyse d'un fluide, un point important est la notion d'objectivité, ou d'invariance par changement de référentiel. Cela signifie qu'une propriété attachée à un élément de fluide ne doit pas dépendre du référentiel dans lequel le système est étudié ; sinon, des structures ou des caractéristiques sans pertinence physique risquent d'apparaître. Ainsi, les champs eulériens tels que le champ des vitesses ne sont pas invariants lorsqu'on effectue une translation ou une rotation à vitesse non nulle du système de coordonnées utilisé pour décrire la situation.

Par exemple, pour visualiser un écoulement, on utilise souvent les lignes de courant, lignes qui suivent la direction locale du vecteur vitesse à un instant donné. Ce sont, par construction, des entités eulériennes. Or, si l'on translate à une certaine vitesse le système de coordonnées utilisé, les vecteurs vitesse du fluide sont modifiés et, par conséquent, les lignes de courant aussi. Par exemple, les tourbillons sont identifiés comme des régions du fluide dont les lignes de courant sont fermées. Mais un tourbillon observé d'un référentiel peut se présenter de façon très différente, et ne plus correspondre à un tourbillon.

Pour les écoulements instables, qui sont plus souvent la règle que l'exception dans la nature, il n'existe pas *a priori* de référentiel privilégié. C'est pourquoi les