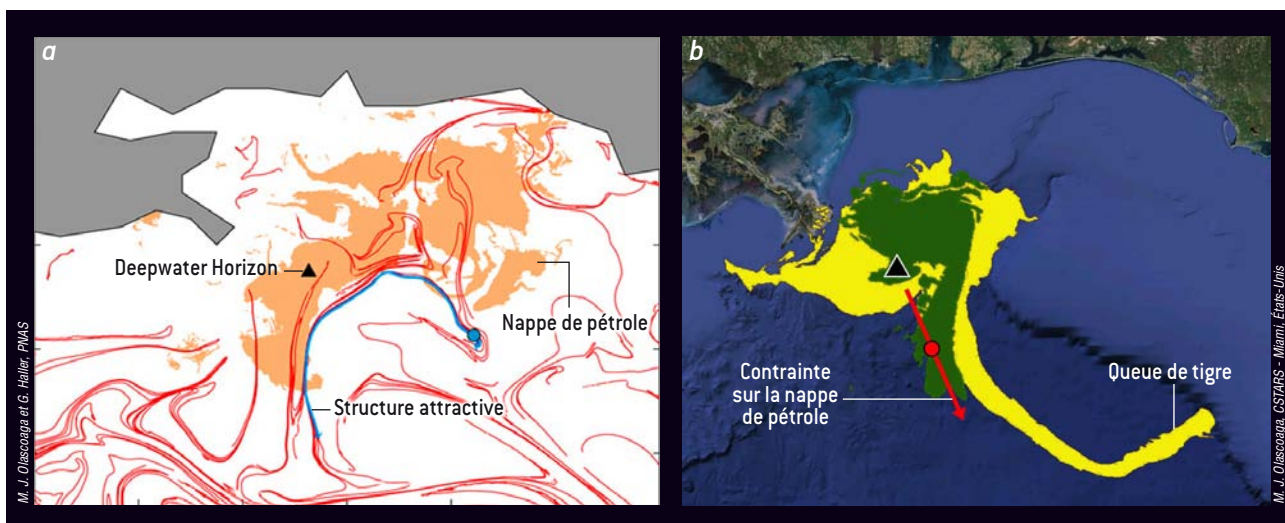




3. LE SUIVI A POSTERIORI de la marée noire de Deepwater Horizon a permis d'expliquer de nombreuses tendances dans le déplacement de la nappe de pétrole [a, en orange]. La structure lagrangienne cohérente attractive [a, en bleu], présente entre les 9 et

19 juin 2010, a poussé le pétrole vers l'Est, vers la Floride. Cette approche a aussi montré comment les conditions, au 15 mai, ont déformé la nappe de pétrole [b, en vert] pour donner, deux jours plus tard, ce qu'on a nommé la « queue de tigre » [b, en jaune].

utilisée dans diverses situations : circulation sanguine et dépôt de plaques d'athérome dans les artères, contrôle aérien, écoulement de l'air autour des ailes d'avion, etc.

Relier les structures lagrangiennes cohérentes aux lignes extrémales des exposants de Lyapunov à temps fini offre une méthode numérique relativement simple. Mais cela soulève des difficultés mathématiques qui n'avaient pas été examinées en détail. En particulier, l'approche des exposants de Lyapunov peut créer des faux négatifs ou des faux positifs dans la détection de structures lagrangiennes cohérentes. Et souvent les lignes extrémales ne sont pas lagrangiennes, dans le sens où le flux de matière à travers elles peut être important.

Pour résoudre les difficultés de l'approche des exposants de Lyapunov, l'un de nous (G. Haller) et Mohammad Farazmand, de l'Université McGill à Montréal, ont montré en 2012 que les structures lagrangiennes cohérentes répulsives sont, en fait, des lignes matérielles dont les positions initiales sont, localement, les « lignes de contraintes » les plus répulsives dans l'intervalle de temps considéré. Ces lignes de contraintes sont obtenues mathématiquement à partir d'une caractérisation du champ des déformations dans le fluide (voir l'encadré page 33). Solutions d'équations différentielles du premier ordre, ce sont des courbes régulières qui sont véritablement lagrangiennes : le fluide ne les traverse pas, elles délimitent des zones du fluide qui ne se mélangent pas.

BIBLIOGRAPHIE

M. J. Olascoaga et G. Haller, **Forecasting sudden changes in environmental pollution patterns**, *PNAS*, vol. 109, n° 13, pp. 4738-4743, 2012.

M. Farazmand et G. Haller, **Computing Lagrangian coherent structures from variational LCS theory**, *Chaos*, vol. 22, 013128, 2012.

T. Peacock et J. Dabiri, **Introduction to Focus Issue : Lagrangian coherent structures**, *Chaos*, vol. 20, 017501, 2010.

S. C. Shadden et al., **The correlation between surface drifters and coherent structures based on high-frequency radar data in Monterey Bay**, *Deep-Sea Research, Part II*, vol. 56, n° 3-5, pp. 161-172, 2009.

Par comparaison, l'obtention des lignes extrémales des exposants de Lyapunov s'est révélée être un problème complexe de traitement d'images, ne reposant pas sur un édifice mathématique précis.

La marée noire de Deepwater Horizon a permis de tester l'approche des structures lagrangiennes cohérentes et la recherche des lignes de contraintes. L'image satellitaire enregistrée le 17 mai 2010 a révélé un long filament de pétrole qui s'est étiré au Sud-Est de la nappe principale. Ce filament a été surnommé « queue de tigre » (voir la figure 3). Une simulation numérique du golfe du Mexique à cette période nous a permis d'identifier la structure lagrangienne cohérente attractive qui est à l'origine de la queue de tigre.

Un outil pour prendre des décisions

Les résultats de l'étude des structures lagrangiennes cohérentes dans le golfe du Mexique relèvent d'une démarche que l'on peut qualifier de « rétrovision » où, au contraire de la « prévision », on analyse et explique un phénomène qui s'est déjà produit. C'est un outil important pour expliquer pourquoi le phénomène a évolué de la façon observée et pas d'une autre. Mais les structures lagrangiennes cohérentes sont-elles un outil utilisable pour faire des prévisions et anticiper un comportement tel que la formation de la queue de tigre ?

Pour ce faire, il est nécessaire de mesurer avec une grande précision l'état du système. Cela implique de pouvoir intégrer presque en temps réel les données des satellites et des stations locales aux simulations numériques de grande échelle, afin de déterminer la position des barrières de transport.

L'analyse de la marée noire de *Deepwater Horizon* montre qu'une barrière de transport a poussé la nappe de pétrole vers la côte Ouest de la Floride pendant deux semaines en juin 2010. Si cette information avait été disponible à l'époque, la décision des autorités pour contenir ou disperser le pétrole aux endroits critiques aurait pu être prise avec plus d'assurance.

La théorie des structures lagrangiennes cohérentes est aujourd'hui mathématiquement bien établie. Le défi est d'optimiser les temps de calcul pour des applications concrètes. Parmi les pistes possibles, de nouveaux travaux montrent que un pour cent des structures lagrangiennes parmi les plus attractives sont à l'origine des phénomènes

les plus marqués dans un écoulement. Le développement d'une méthode pour repérer ces éléments permettrait de gagner du temps. Des outils généraux d'extraction de structures attractives et répulsives, mais aussi d'autres configurations telles que des tourbillons ou des jets, sont en cours de développement.

Des applications diverses

Le suivi des débris dérivants et, à plus long terme, la surveillance des pollutions ne sont pas les seules applications possibles pour les structures lagrangiennes cohérentes. Cette approche pourrait être utile aux opérations de sauvetage en mer après un naufrage, en permettant de localiser plus rapidement dans quelle direction les victimes vont dériver. David Schmale et Shane Ross, de l'Institut polytechnique de Virginie, aux États-Unis, ont étudié le transport par le vent de spores du champignon *Fusarium*, un phytopathogène res-

ponsable de maladies dans les récoltes. Ils ont montré que des barrières de transport attractives et les régions encadrées de deux barrières répulsives piègent les spores et peuvent les transporter sur des centaines de kilomètres. Le mathématicien Shawn Shadden, de l'Institut de technologie de l'Illinois, a étudié la circulation sanguine dans les ventricules du cœur. Il a montré que chez certains patients dont le cœur est volumineux, le sang reste plus longtemps dans le ventricule, ce qui peut entraîner une thrombose avec formation de caillots.

Ces exemples montrent que l'approche des structures lagrangiennes cohérentes peut être utile dans des contextes variés. Cette méthode a aussi révélé une vision plus pertinente du transport de débris dans des écoulements complexes. Les barrières de transport révélées par les structures lagrangiennes cohérentes constituent un squelette autour duquel s'organisent les flux et, à ce titre, sont un aspect fondamental de la compréhension des mouvements au sein d'un fluide. ■



france culture

LA MARCHE DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélie Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE

Jean-Marc Delaunay - 2013. Photo: Marc Durand - 8. Philippe Bessière - Couverture galerie Nippon - ADAGP Paris 2013

La structure en réseaux du langage

Ricard Solé, Bernat Corominas-Murtra et Jordi Fortuny

Des techniques d'analyse issues des mathématiques et de la physique révèlent les structures du langage et renseignent ainsi sur son origine et son évolution.

Seule l'espèce humaine emploie un système de communication symbolique capable de transmettre une information complexe. Certains animaux semblent avoir maîtrisé quelques éléments rudimentaires d'un tel système, mais leur mode de communication est beaucoup moins développé que notre langage. De même, aucune machine ne parvient à l'imiter pour l'instant. Comment avons-nous développé ce système de communication ?

Comme l'a signalé le linguiste américain Derek Bickerton, le langage ne laisse pas de fossiles. On doit donc recourir à des données indirectes. On étudie, par exemple, les changements culturels liés à l'art ou à la fabrication d'outils, qui traduisent des améliorations cognitives et, suppose-t-on, des facultés de communication. Ces dernières années, la génétique a aussi apporté quelques éléments. On a ainsi découvert un gène noté *FoxP2*, dont la mutation provoque des troubles de la parole. Sa séquence est identique chez l'homme moderne et chez les Néandertaliens, qui maîtrisaient peut-être certains aspects d'une communication orale.

Ces indices corroborent une autre affirmation de D. Bickerton : « Rien ne survient dans le monde sans laisser une trace, aussi ténue ou indirecte soit-elle. » En linguistique, l'analyse de ces traces a donné lieu à de grands débats, souvent très théoriques, concernant leur nature et leur origine (génétique, culturelle ou les deux).

Certaines recherches en linguistique ont récemment fait appel à des outils associés d'habitude aux mathématiques et à la physique statistique, tels que l'analyse de systèmes complexes. Celle-ci porte sur des systèmes composés d'un grand nombre d'éléments et qui présentent des propriétés dites émergentes : les propriétés du système global sont plus riches que la simple sommation des propriétés de chaque composante.

Le langage humain est un système de ce type. De même qu'une fourmière est plus qu'un simple agrégat d'insectes, le langage ne se limite pas à la juxtaposition de mots.

Dans une série de travaux récents, nous avons abordé l'étude quantitative du langage du point

« Naturellement destiné à l'exploitation de la pension bourgeoise, le rez-de-chaussée se compose d'une première pièce éclairée par les deux croisées de la rue, et où l'on entre par une porte-fenêtre. »

la rue

le père

on entre

il avait

monument

toi

sur

rude

droite

donne

deux

homme

jaune

pouvoir

maison

douze

pa

fa

no

si

es

bi

do

de

ti

ma

bu

lo

m

o

a

l

e

f

r

d

i

c