

DYNAMIQUE DES FLUIDES

La turbulence par l'image

Des centaines d'images nous parviennent chaque jour depuis les satellites d'observation de notre biosphère. Les modèles météorologiques et climatiques pourraient tirer grand bénéfice d'une meilleure exploitation de ces images et des informations qu'elles contiennent.

La fiabilité des prévisions dans les domaines océanique, météorologique et climatique dépend pour une part de notre capacité à modéliser correctement les comportements spatio-temporels de l'océan et de l'atmosphère. Or l'un comme l'autre sont le siège de tourbillons à différentes échelles : les écoulements de ces fluides sont dits turbulents. Les échelles caractéristiques de la turbulence atmosphérique varient par exemple entre quelques centimètres et plusieurs centaines de kilomètres, avec des interactions complexes entre échelles. Une évaluation plus précise des phénomènes turbulents devrait permettre de réduire l'un des facteurs d'incertitude des modèles numériques actuels, à condition toutefois de disposer de suffisamment de mesures. D'où l'idée d'utiliser les images satellitaires pour augmenter le nombre de mesures disponibles.

Les enjeux sociétaux de ces travaux sont importants. De grands pans de l'activité économique (pêche, agriculture, transports aériens ou maritimes, etc.) dépendent en effet de prévisions réalisées à différentes échelles. Des échelles spatiales et temporelles fines sont par exemple requises pour la prévention d'événements météorologiques locaux potentiellement dangereux à proximité de lieux sensibles tels que les aéroports.

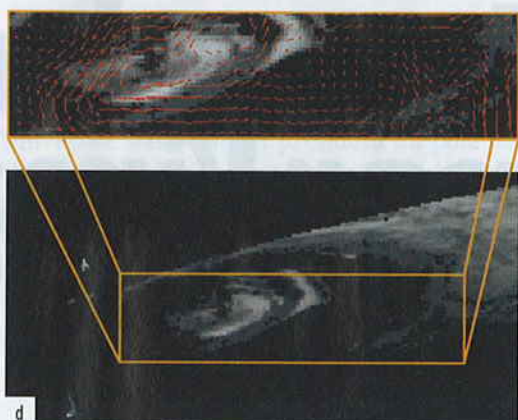
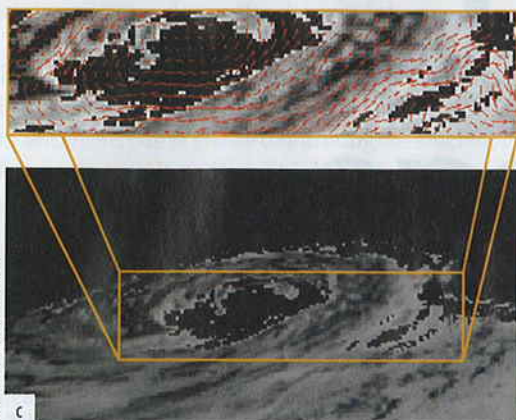
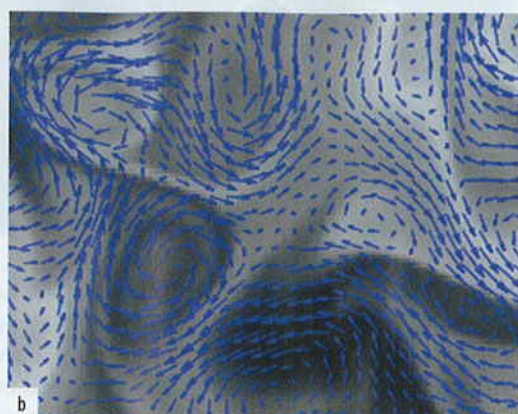
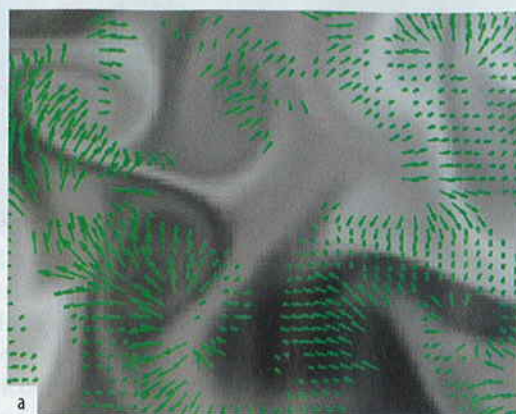
Des simulations à beaucoup plus grande échelle sont nécessaires dans les modèles climatiques afin d'analyser l'évolution sur le long terme de paramètres tels que le vent, la température atmosphérique ou océanique, la direction ou l'amplitude des courants océaniques, la salinité, l'humidité, les nuages, les précipitations, etc. Comment mieux appréhender l'impact de la turbulence (voir l'encadré) ?

Ce phénomène est régi par des équations non linéaires, à comportement dit chaotique : contrairement à un système linéaire, dont les seules conditions initiales permettent d'anticiper l'évolution dans le temps, l'hypersensibilité des systèmes turbulents aux conditions initiales rend leur prédiction délicate dans le cas général. Ces difficultés nécessitent la mise en place de modèles approchés décrivant l'écoulement de la façon la plus précise possible à l'échelle de l'application cible : échelle climatologique, synoptique (échelle planétaire) ou méso-synoptique (échelle intermédiaire entre l'échelle synoptique et les petites échelles). La résolution numérique de ces modèles

La turbulence en très bref

Un écoulement turbulent est caractérisé par une imbrication de structures tourbillonnaires dont la taille caractéristique décroît jusqu'à une échelle minimale, celle-ci étant fixée par deux paramètres physiques caractéristiques (viscosité du fluide et flux d'énergie cinétique entre échelles). Dans le modèle de cascade dit de Richardson-Kolmogorov, du nom de leurs auteurs, ce flux est constant sur une large gamme d'échelle, la plage inertielle : pour l'atmosphère, elle s'étend du millier de kilomètres au centimètre. Dans le cas des écoulements atmosphériques ou océaniques, assimilables à des écoulements en deux dimensions du fait de leur structure stratifiée (en couches pouvant être considérées comme homogènes), on observe des « cascades » d'énergie particulières : une cascade d'énergie indirecte des petites échelles vers les plus grandes échelles et une cascade directe de l'énergie des tourbillons des grandes échelles vers les petites.

Fig. 1 : En vision par ordinateur, une technique dite de « flot optique » permet d'estimer la vitesse de déplacement des points d'une image. Ce flot optique est estimé à partir d'un couple d'images *via* une équation aux dérivées partielles qui relie la vitesse des points aux variations spatiales et temporelles de l'image. Mais, comme l'illustre l'image (a), seule la composante normale aux contours des objets peut être directement mesurée. D'où la nécessité d'introduire des contraintes additionnelles pour « fermer » le problème : l'image (b) visualise le même champ de vitesses obtenu avec une contrainte descriptive de la turbulence. Quant aux images (c) et (d), elles visualisent les champs de vitesse estimés selon la technique employée en (b) à partir d'images satellite de deux couches de l'atmosphère d'altitudes différentes.



© INRIA-FLUMINANCE

non linéaires et instables, qui a bénéficié de la formidable augmentation de la puissance de calcul des dernières décennies, reste malgré tout un défi scientifique majeur du fait d'incertitudes de modélisation, de l'étendue des échelles concernées et de leurs interactions.

C'est en raison de ces incertitudes qu'il est nécessaire de disposer de mesures des différentes variables d'état mises en jeu (vitesse d'écoulement, pression, température...). Ces mesures sont fournies par des capteurs, fixes ou embarqués : des radars, des ballons sondes, des bouées, des anémomètres, etc. L'un des problèmes tient à l'hétérogénéité de leur répartition géographique : la densité des capteurs autour du globe et leur sophistication dépendent de la puissance économique et technologique des pays impliqués. À cette variabilité de la densité des réseaux de mesures s'ajoute une autre difficulté : les données disponibles ne constituent que des informations locales. Si des interpolations à une échelle *ad hoc* sont possibles lorsque la densité des mesures est suffisante, on est confronté à une source d'incertitude supplémentaire dans le cas contraire. Or depuis une vingtaine d'années, de très nombreux satellites géostationnaires ou défilants fournissent des mesures photométriques (mesures d'intensité lumineuse) à différentes longueurs d'onde. Celles-ci permettent une observation de l'intégralité du globe terrestre avec une précision de l'ordre du kilomètre pour un intervalle entre deux images de 15 à 30 minutes : une mine d'informations si l'on parvient à en extraire des grandeurs physiques pertinentes. L'une d'entre elles est déterminante, à savoir la mesure de la vitesse des écoulements à partir d'une série d'images.

Les séquences d'images satellite permettent de suivre des grandeurs scalaires (température, pression, densité de vapeur d'eau, densité de phytoplancton, etc.) transportées par l'écoulement. Ce processus de transport est décrit par une équation reliant les variations spatiales et temporelles de l'image au champ, inconnu, des vitesses. Cette équation définit une contrainte reliant ce qui est observable (les variations du scalaire) à ce que l'on cherche à estimer (les vitesses de l'écoulement). Mais, problème : le nombre d'inconnues (les deux ou trois composantes du vecteur vitesse) est supérieur au nombre d'équations. Cette limitation nécessite d'introduire des contraintes additionnelles sur la solution à estimer afin de « fermer » le problème, c'est-à-dire de lever son indétermination.

Les techniques d'estimation de vitesse proposées en mécanique des fluides expérimentale ou dans les sciences environnementales⁽¹⁾ s'appuient généralement sur des méthodes dites de corrélation locale. Mais ces dernières comportent divers inconvénients. En particulier, les données de vitesse obtenues sont relativement éparpillées et approximatives dès lors que l'on sort des expériences de laboratoire. En outre, elles ne permettent pas de prendre en compte les petites échelles car elles supposent un mouvement localement constant. Dans le domaine de la vision par ordinateur, les techniques dites de « flot optique », utilisées pour mesurer le déplacement d'objets d'une scène, permettent d'estimer un champ de vitesse pour l'ensemble des points de l'image⁽²⁾. Ces méthodes ne concernent néanmoins que des objets rigides ou faiblement déformables. Enfin, aucune de ces méthodes ne garantit une solution cohérente sur une série temporelle d'images car elles procèdent toutes

* Les mouvements de l'air atmosphérique et des eaux océaniques sont décrits par des équations aux dérivées partielles non linéaires : les équations de Navier-Stokes.

* Les techniques d'assimilation de données sont des méthodes permettant de coupler un modèle dynamique d'une variable d'état avec des observations éventuellement partielles et bruitées de cette variable. Ces techniques sont définies, soit dans un cadre stochastique de filtrage, soit dans le cadre déterministe du contrôle optimal.

* Un prix d'un million de dollars américains sera décerné à chacun de ceux qui résoudront l'un des sept « problèmes du millénaire ». L'un de ces problèmes consiste précisément à trouver une solution générale aux équations de Navier-Stokes décrivant les écoulements fluides.

par paires d'images. Il fallait donc imaginer des techniques autorisant une mesure à la fois précise et cohérente dans le temps avec la physique des écoulements⁽⁵⁾. Une première solution consiste à imposer des contraintes sur le champ des vitesses à estimer qui soient adaptées aux écoulements fluides. Pour notre part, nous avons mis au point des techniques permettant notamment de préserver les tourbillons, quantité essentielle en turbulence, et de prendre en compte les déplacements perpendiculaires au plan de visualisation⁽³⁾.

Plus récemment, nous avons encore affiné la démarche en concevant une méthode permettant d'estimer un champ des vitesses en contraignant la solution à suivre des modèles statistiques décrivant les échanges d'énergie qui s'opèrent entre les différentes échelles d'un écoulement turbulent⁽⁴⁾ (fig. 1). Cette nouvelle méthode présente l'avantage de structurer la solution à toutes les échelles, en respectant les modèles de cascades d'énergie (voir l'encadré), et de fournir une mesure plus précise des petites échelles du mouvement.

La seconde solution sur laquelle nous travaillons consiste à introduire des contraintes de nature dynamique^(6,7). Ces méthodes couplent un modèle descriptif de la dynamique de l'écoulement, décrite par les équations de l'écoulement à l'échelle considérée*, et des mesures extraites de la séquence d'images : par exemple des champs de vitesses (estimés au moyen des techniques décrites plus haut), une courbe délimitant une région d'intérêt, un histogramme photométrique ou

inhérentes à l'établissement du modèle dynamique. Ce problème de modélisation est d'autant plus délicat lorsque l'on s'intéresse à l'évolution de variables non physiques telles que des courbes enserrant une région particulière de l'image ou encore l'histogramme photométrique d'une région donnée^(8,9).

Ce couplage entre modèles dynamiques et images ouvre en tout cas de nombreuses perspectives dans le domaine de l'analyse des écoulements géophysiques et plus généralement dans les sciences environnementales. Mais un certain nombre de défis reste à relever. Le premier est un problème d'échelle. Par exemple, comment concilier une mesure de vitesse ou une donnée image de petite échelle avec des modèles dynamiques définis à une plus grande échelle ? Soit on réussit, à partir des images, à décrire astucieusement l'interaction entre les échelles résolues numériquement et celles non résolues. Soit on s'efforce de coupler à diverses échelles des hiérarchies de modèles dynamiques et des mesures adaptées.

Le second défi consiste à étendre les méthodes actuelles de mesure dans un cadre bidimensionnel (2 D) ou quasi-2 D à l'estimation volumique de champs de vitesses tridimensionnels (3 D). Le troisième défi concerne la définition de modèles dynamiques à partir des images mêmes. L'idée serait de définir de tels modèles pour des variables extraites des images et caractérisant par exemple des lignes de front ou des systèmes nuageux particuliers. On peut également imaginer de spécifier, à partir de séquences d'images, des modèles dynamiques

dont le nombre de variables indépendantes (degrés de liberté) soit réduit et qui permettent une sorte d'apprentissage du comportement dynamique d'« événements » trop complexes à modéliser physiquement.

On quitte dans ce dernier cas une logique de modélisation purement physique au profit de processus guidés par les données et seulement en parti connus. De toute évidence, une telle démarche est assez inconfortable pour le géophysicien. Elle l'est tout autant pour le spécialiste de traitement d'images dans la mesure où c'est la physique des phénomènes observés qui doit garantir la cohérence des solutions. Le mathématicien n'est pas plus à son aise puisqu'il est ni plus

ni moins confronté à un problème qui constitue encore à ce jour l'un des sept défis mathématiques du millénaire*. L'issue est bien évidemment dans une coopération étroite entre ces domaines. Cette nécessité bouscule l'inertie des différents domaines de recherche vis-à-vis de problèmes qui débordent du cadre strict de leurs contours scientifiques originels.

Patrick Héas est chercheur Inria dans l'équipe Fluminance. **Dominique Heitz** est chercheur Cemagref dans l'équipe Fluminance.

Étienne Mémin, directeur de recherche Inria, est responsable scientifique de l'équipe Fluminance (www.irisa.fr/fluminance/).

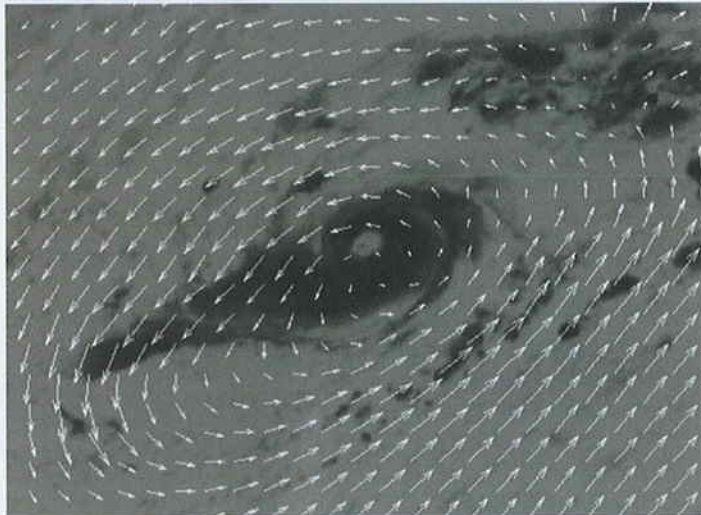


Fig. 2 : Le champ de vitesses représenté ici est généré par une tempête sur l'Atlantique nord : s'agit d'une estimation de ce champ de vitesses par une technique dite d'assimilation de données qui réalise un couplage entre un modèle dynamique et une séquence d'images satellite.

encore directement l'intensité lumineuse. Le couplage entre la dynamique physique de l'écoulement et ces mesures est réalisé via des techniques d'assimilation de données* (fig. 2).

Contrairement aux méthodes d'estimation précédentes, ces techniques d'assimilation garantissent l'obtention de solutions cohérentes avec la dynamique de l'écoulement. Le caractère approché des dynamiques considérées nécessite en revanche de spécifier de manière précise les erreurs d'approximation

⁽¹⁾ R. Adrian, Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annal Rev. Fluid Mech.* 23, pp. 261-304, 1991.

⁽²⁾ B.K.P. Horn and B.G. Schunck. Determining optical flow. *Artif. Intell.*, 17, pp. 185-203, 1981.

⁽³⁾ T. Corpetti et al., A. Santa Cruz. Fluid experimental flow estimation based on an optical-flow scheme. *Exp. Fluids*, 40 (1), pp. 80-97, 2006.

⁽⁴⁾ P. Héas et al., Bayesian selection of scaling laws for motion modeling in images. in International Conference on Computer Vision (ICCV'09), Kyoto, october 2009.

⁽⁵⁾ D. Heitz, E. Mémin, C. Schnörr. Variational fluid flow measurements from image sequences: synopsis and perspectives. *Exp. Fluids*, 48 (3): 369-393, 2010.

⁽⁶⁾ A. Cuzol et E. Mémin. A stochastic filtering technique for fluid flows velocity fields tracking. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31 (7), pp. 1278-1293, 2009.

⁽⁷⁾ T. Corpetti et al., Pressure image assimilation for atmospheric motion estimation. *Tellus Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 61 (1), pp. 160-178, 2009.

⁽⁸⁾ C. Thomas et al., Data assimilation for convective cells tracking on meteorological image sequences, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote sensing*, 2010.

⁽⁹⁾ N. Papadakis et E. Mémin. A variational technique for time consistent tracking of curves and motion, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 31 (1), pp. 81-103, 2008.