

Dans l'Océan, la turbulence ne mélange pas le phytoplancton mais le concentre.

On pourrait croire que le phytoplancton qui peuple les mers et les océans se disperse lorsqu'il est soumis à la turbulence des eaux dans lesquelles il évolue. Une équipe internationale, dont un membre de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, a démontré que le phénomène inverse se produit pour les micro-organismes nageurs : ils s'accumulent dans des zones préférentielles. Cette étude a notamment donné lieu à deux publications dans Nature Communications et Physical Review Letters.

Le phytoplancton est à l'origine d'environ la moitié de la production d'oxygène à l'échelle planétaire et constitue l'élément de base de la chaîne alimentaire en milieu marin. La distribution spatiale de ces micro-organismes unicellulaires est très hétérogène quelle que soit l'échelle d'analyse. On observe l'accumulation de phytoplancton sur des échelles caractéristiques allant de quelques millimètres jusqu'à la centaine de kilomètres. Une compréhension détaillée des mécanismes physiques qui conduisent à cette accumulation préférentielle est nécessaire pour la régulation de la pêche, la prédiction de la croissance spectaculaire d'algues toxiques et plus généralement pour quantifier les flux biogéochimiques à travers l'Océan.

Une équipe internationale se penche sur le comportement des micro-organismes mobiles du phytoplancton :

- William M. Durham: Dept. of Civil and Environmental Engineering, MIT, USA et Dept. of Zoology, University of Oxford, UK
- Eric Climent: Institut de Mécanique des Fluides, INPT-UPS-CNRS, France.
- Michael Barry et Roman Stocker: Dept. of Civil and Environmental Engineering, MIT, USA
- Filippo De Lillo: DICCA, Università di Genova, et Dipartimento di Fisica et INFN, Italie.
- Guido Boffetta: Dipartimento di Fisica and INFN, Italie.
- Massimo Cencini: Istituto dei Sistemi Complessi, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italie

Parmi les micro-organismes unicellulaires du phytoplancton, certains sont mobiles et ont tendance à s'accumuler sous l'effet de la turbulence :

De nombreux micro-organismes qui forment le plancton ont la faculté de se déplacer de façon autonome. Ces cellules nagent avec des vitesses allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de microns par seconde. Cette mobilité individuelle a rarement été prise en compte pour expliquer le phénomène d'accumulation préférentielle.

La gyrotaxie, nage directionnelle des cellules mobiles, joue un rôle déterminant dans le comportement du phytoplancton :

Les résultats de cette étude ont permis de montrer expérimentalement, de prédire numériquement et d'expliquer théoriquement le rôle de la gyrotaxie (nage directionnelle des cellules) lors de l'accumulation du phytoplancton dans les petites échelles de la turbulence.

En l'absence de tourbillon, les cellules gyrotactiques nagent vers le haut. En présence de tourbillons, leur nage est réorientée.

En effet, l'orientation de la nage des micro-organismes considérés n'est pas aléatoire. Sans écoulement, les cellules gyrotactiques nagent vers le haut (du fait de l'asymétrie de la répartition spatiale de la masse intracellulaire). Mais elles sont aussi soumises à la rotation locale du fluide dans un écoulement turbulent. C'est cette interaction qui conduit à l'accumulation préférentielle observée dans la figure 1.

Première étape : une étude expérimentale a permis de démontrer que des micro-organismes gyrotactiques nageant dans des tourbillons ont une forte tendance à s'accumuler dans les zones de fluide descendant, au cœur et en périphérie des tourbillons.

Seconde étape : l'étude expérimentale a été complétée par une modélisation numérique dans un réseau périodique de tourbillons, montrant ainsi la richesse des interactions hydrodynamiques issue de trois ingrédients très simples : la nage des micro-organismes, les tourbillons et la réorientation gyrotactique que provoquent ces derniers.

Troisième étape : étude de l'interaction entre la nage directionnelle et les structures turbulentes de petite échelle que l'on trouve dans l'Océan. La base du modèle de simulation est constituée du couplage entre la résolution numérique directe des équations qui gouvernent le mouvement d'un écoulement turbulent et le suivi de trajectoires de plusieurs centaines de milliers de cellules (calcul scientifique haute-performance sur le supercalculateur CalMiP à Toulouse). L'analyse statistique des données révèle que l'accumulation de phytoplancton aux petites échelles de la turbulence peut atteindre cent fois la concentration moyenne de la suspension (figure 2).

Résultat : Les cellules se concentrent dans les zones de fluide localement descendant lorsque le temps caractéristique de réorientation gyrotactique est proche de celui des petites structures de l'écoulement.

Ces résultats suggèrent que ce mécanisme est sans aucun doute un élément important conduisant aux interactions proches des cellules telles que la prédation ou la reproduction. Il est donc à la base de l'organisation à petite échelle du paysage écologique de l'Océan.

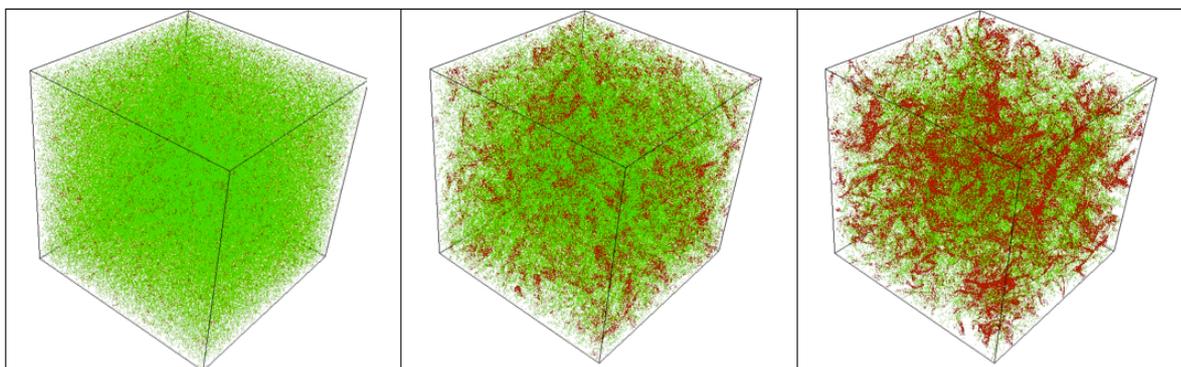
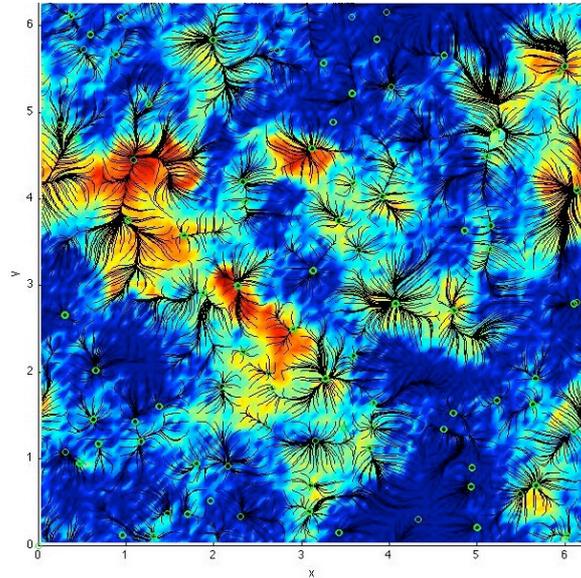


Figure 1 : Visualisation 3D de particules représentant du phytoplancton de caractéristiques gyrotactiques différentes dans un écoulement turbulent donné. Les zones en rouge correspondent aux zones de concentration préférentielle (de gauche à droite : le temps caractéristique de réorientation des micro-organismes est de mieux en mieux adapté aux petites échelles de la turbulence ce qui augmente leur capacité à s'accumuler).

Figure 2 :

Plan de coupe vertical d'un écoulement turbulent peuplé en micro-organismes gyrotactiques. Les lignes noires sont les chemins préférentiels par lesquels les micro-organismes vont s'accumuler dans les zones en rouge qui sont fortement concentrées en cellules. Dans les zones d'accumulation, la concentration en phytoplancton peut atteindre cent fois la concentration moyenne.



Publications :

- W. M. Durham, E. Climent, M. Barry, F. De Lillo, G. Boffetta, M. Cencini and R. Stocker, 2013, Turbulence drives microscale patches of motile phytoplankton, Nature Communications (2013), 4 : 2148; DOI: 10.1038/ncomms3148.
- W.M. Durham, E. Climent, 2011R. Stocker Gyrotaxis in a steady vortical flow, Physical Review Letters, 106: 238102. DOI:10.1103/PhysRevLett.106.238102

▪ **Contact:** eric.climent@imft.fr