



HAL
open science

Courants profonds et conséquences environnementales : l'exemple de la Méditerranée

Isabelle Taupier-Letage

► **To cite this version:**

Isabelle Taupier-Letage. Courants profonds et conséquences environnementales : l'exemple de la Méditerranée. *La Revue maritime*, 2023, 527, pp.90-97. <hal-04291538>

HAL Id: hal-04291538

<https://hal.science/hal-04291538v1>

Submitted on 20 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Courants profonds et conséquences environnementales : l'exemple de la Méditerranée

Isabelle Taupier-Letage

Chargée de recherche CNRS, Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO)

Introduction

En surface on a l'habitude de rencontrer des courants puissants (de l'ordre du mètre par seconde / nœud), allant des courants de marée aux courants induits par les anneaux du Gulf Stream par exemple. On connaît également la circulation, à l'échelle globale, des masses d'eaux profondes qui permettent de faire fonctionner le « tapis roulant » (The COMET program, 2023) en acheminant en profondeur – lentement (~ 1 km/j) – les eaux denses et froides formées en surface au niveau des pôles. Si l'idée que l'océan profond est dénué de courant violent est encore relativement répandue, les progrès réalisés dans les techniques d'observation (*e.g.* Estournel *et al.*, 2016 ; Mourre *et al.*, 2023) ont optimisé l'exploration des couches profondes et démontré qu'il n'en était rien. Or, il est d'autant plus important de les étudier que ces courants profonds ont des conséquences environnementales, et jouent même un rôle fondamental dans le fonctionnement de l'Océan. C'est que nous allons illustrer à partir d'exemples pris en Méditerranée. Nous utiliserons ici le terme « courant » dans un sens large : tout déplacement de masse d'eau, quelle que soit sa vitesse.

1. Courants verticaux

Moins connus car plus difficiles à observer et mesurer, les courants verticaux n'en sont pas moins essentiels dans le fonctionnement des mers et océans.

Malgré sa taille (~ 1 % de l'océan global), la Méditerranée fonctionne comme un océan (Schroeder and Chiggiato, 2022), avec une circulation méridienne de retournement (« tapis roulant ») et la formation – dans ses parties Nord – d'eaux denses profondes en hiver (voir Taupier-Letage *et al.*, 2013 pour une revue simplifiée ; Houpert *et al.*, 2016 ; Testor *et al.*, 2018 pour une information détaillée).

La Méditerranée perd plus d'eau par évaporation qu'elle n'en gagne par les fleuves et les précipitations. Ce déficit (équivalant à une baisse du niveau de la mer de ~ 0.5 - 0.8 m/an) est comblé par une entrée d'eau Atlantique à Gibraltar (débit ~1 million de m³/s).

La Méditerranée fonctionne comme une machine à transformer l'eau chaude légère (peu salée) qui entre en surface à Gibraltar pour compenser les pertes d'eau par évaporation en eaux froides et denses (salées), intermédiaires et profondes (Fig. 1). Ces eaux méditerranéennes ressortent en Atlantique par la partie profonde du détroit de Gibraltar. Cette transformation se réalise dans les parties nord de la Méditerranée (Fig. 1) au cours des hivers rudes, sous l'effet des vents continentaux froids et secs (Mistral, Tramontane, Bora...). Les coups de vents intenses et répétés abaissent la température de l'eau (Atlantique) de surface, et en augmentent la salinité par évaporation : l'eau atteint alors une densité telle qu'elle va littéralement plonger, par convection.

Il y a deux types de convection.

Au-dessus du plateau continental, comme c'est le cas par exemple du golfe du Lion, la profondeur maximale est de ~ 200 m, ce qui limite le mélange. Ce sera donc toujours la même eau (d'origine Atlantique) qui sera refroidie par convection, jusqu'à atteindre des minima de 10-11 °C. Cette eau dense (par diminution de sa température principalement) va s'accumuler sur le plateau puis s'écouler en profondeur en cascade, canalisée par les nombreux canyons qui entaillent le plateau du golfe du Lion (Odatis, 2023). Ce processus de formation d'eau dense de plateau est appelé « cascading » (Dense Shelf Water Cascading ; Pinardi *et al.*, 2022), et, cette eau dense est reconnaissable à son minimum de température et de salinité, i) car elle est affectée par les crues du Rhône autres fleuves côtiers, et ii) n'est pas mélangée avec l'eau sous-jacente d'origine orientale, voir paragraphe suivant). Lors des hivers les plus rudes la cascade peut atteindre le fond (~ 2500 m). Ce « cascading » se fait avec des vitesses de courant importantes, avec des maxima de l'ordre de 1 à 2 nœuds (50-80 cm/s). Les sédiments déposés (par les fleuves, notamment) et dans les lits des canyons sont ainsi entraînés en profondeur, formant une couche turbide (néphéloïde) qui va permettre de redistribuer de la matière organique, favorisant ainsi la vie sur le talus, ainsi qu'en pied de pente (populations de crevettes, colonies de coraux froids...). Le corollaire, c'est que les contaminants, notamment ceux apportés par les fleuves, sont ainsi exportés efficacement vers les couches profondes.

Au large (milliers de m de profondeur), le mélange induit par les coups de vent va progressivement affecter une couche d'eau de plus en plus épaisse, jusqu'à atteindre (à partir de ~ 300 m) la couche d'eau intermédiaire en provenance du bassin oriental. En raison de l'intense évaporation qu'elle y a subie, cette eau correspond à un maximum intermédiaire de salinité (~ 300-700 m). Son mélange avec l'eau de surface d'origine Atlantique, dont la température a été diminuée et la salinité augmentée, va créer une eau dense qui va plonger (par convection profonde / « open sea convection »), jusqu'au fond (2 500-4 000 m) lors des hivers rudes.

Une caractéristique importante des eaux profondes formées au large de la Méditerranée (tant dans le bassin occidental que dans le bassin oriental) est leur température. La salinité intervenant plus fortement dans la densité que la température, les eaux mélangées atteignent une densité qui les fait plonger avant d'avoir été refroidies en-deçà de 14-13 °C. Lors des épisodes de convection intense, le mélange affecte la totalité de la colonne d'eau, et la température y est homogène, autour de ~ 13,5°C : même à plusieurs milliers de mètres de profondeur, les hydrocarbures ne seront donc pas solides, et, en cas de problème (*e.g.* marée noire), seront entraînés par les courants loin du point d'émission (au contraire des profondeurs analogues dans l'océan global, où règne une température de ~ 0-4 °C). À noter que la température résultante de cette convection profonde est appelée à augmenter avec le réchauffement climatique, et que l'augmentation de température de eaux les plus profondes en Méditerranée est déjà bien marquée.

Cette plongée se fait avec des vitesses verticales de plusieurs cm/s, ce qui est extrêmement rapide : l'eau qui était en surface, et donc riche en oxygène, peut atteindre le fond (~ 2 500-3 000 m) en ~ 24 heures. Les épisodes de convection, qui se produisent à travers des petites cheminées, sont associés à des courants turbulents de ~ 1 nœud (~ 50 cm/s) sur le fond, participant ainsi à la redistribution de sédiments et de matières organiques et inorganiques.

Les eaux denses s'écoulent et se répandent ensuite dans les couches profondes, approvisionnant les écosystèmes pélagiques et benthiques en oxygène et en matière organique (*e.g.* Coppola *et*

al., 2018). Une vie relativement riche et diversifiée peuple donc les fonds de la Méditerranée (au contraire de la mer Noire, dont les couches profondes sont en anoxie).

Le corollaire, c'est que l'efficacité des échanges océan-atmosphère et des processus de formation d'eaux denses va permettre également la diffusion des contaminants atmosphériques en profondeur. C'est ainsi que la signature du plomb de l'essence (utilisé auparavant pour les véhicules) a été retrouvée dans le foie de requins aux yeux de jade, requins vivant sur le fond à ~ 3 500 m entre les Baléares et la Sardaigne, pourtant loin des sources anthropiques importantes.

2. Courants horizontaux

L'eau d'origine Atlantique qui rentre à Gibraltar (Fig.2a-b) est moins salée que les eaux résidentes de Méditerranée : moins dense, elle va donc rester en surface et déterminer les courants (la circulation) de surface. La circulation devrait longer les côtes (la pente continentale) vers l'Est sur sa droite en raison de la rotation de la Terre (Fig.2c), et décrire des circuits anti-horaires à l'échelle des deux bassins. Mais, dans les parties Sud, les courants sont instables et engendrent des méandres et des tourbillons qui perturbent la circulation (Fig.2d-f). Ces structures ont un diamètre de 10-100 km, une extension verticale de 100-1 000 m, pour des durées de vie allant de la semaine à des mois (max observé : ~ 3 ans). Cette succession de méandres et de tourbillons qui se déplacent vers l'Est à quelques km/j et perturbent la circulation de surface forment respectivement le Courant Algérien (Fig.2a, c-d) dans le bassin occidental et le Courant Libyo-Egyptien (Fig.2a, f) dans le bassin oriental. Leur étude par télédétection ainsi que celle de leur rôle sur la dispersion des masses d'eau à l'intérieur des bassins a conduit à modifier les schémas de circulation (Fig.3, Millot et Taupier-Letage, 2005a). Les courants de surface associés à ces tourbillons (principalement anticycloniques) peuvent donc prendre, sur leurs bords, une direction sur 360° (y compris vers l'Ouest, *i.e.* en sens inverse du courant moyen, sur leur bord Sud à la côte), avec des vitesses pouvant atteindre 1 nœud (~ 50 cm/s ; Fig.4). C'est ainsi que les navires, même les plus grands, ont leur route déviée, accélérée ou ralentie lors de la traversée des tourbillons au large des côtes de l'Afrique du Nord.

Lorsqu'ils s'approchent de la pente continentale Ouest Sardaigne (Fig. 2e), les tourbillons sont capables d'arracher des lentilles de la veine d'eau intermédiaire (« LIW », ~ 300-700 m) issue du bassin oriental, et de les rapporter, au cours de leur dérive, à proximité des côtes algériennes. C'est ainsi que, pendant longtemps, des schémas de circulation ont figuré, à tort, une veine d'eau intermédiaire d'origine orientale (« LIW ») circulant vers l'Ouest, en contradiction totale avec l'effet de la rotation de la Terre (Millot et Taupier-Letage, 2005b).

Les tourbillons qui s'étendent jusqu'au fond (~ 2 500 m) perturbent également les couches profondes. Même si c'est avec des vitesses plus faibles, (~ 5-10 cm/s), un tourbillon algérien, qui était coincé à la côte par d'autres tourbillons (Fig. 2a, Fig.4, Millot et Taupier-Letage, 2005b) a renversé les courants (donc vers l'Ouest) dans toute la colonne d'eau pendant plusieurs mois. Après quoi il s'est remis en mouvement et a rétabli la circulation « normale » (vers l'Est) dans toute la colonne d'eau. Les conséquences des courants induits par les tourbillons – et de façon plus générale par toutes les formes d'instabilité – dans les couches profondes sont parfaitement illustrées par la figure 5 (Send et Testor, 2017) et par l'animation

des trajectoires des flotteurs profileurs ARGO dans l'ensemble de la Méditerranée : la réalité est éloignée de la simple théorie qui veut que les masses d'eau, à toutes les profondeurs, soient guidées par la bathymétrie : celle-ci ne s'observe qu'en l'absence de tourbillon (parties Sud principalement) ou d'instabilité (liée à la période hivernale dans les parties Nord).

3. Conclusion

Bien que relativement cryptique la dynamique des couches profondes joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de l'Océan (y compris de la Méditerranée) dans l'établissement d'une vie riche et des conditions de son maintien. Les processus en jeu entraînent une importante variabilité spatiale et temporelle, qui limitent la prévisibilité de courants profonds – au moins au stade actuel des moyens d'observations disponibles, la limitation financière n'étant pas la moindre. Enfin, l'importance et l'efficacité des échanges océan-atmosphère, surface-fond, et côte-large suppriment toute frontière, notamment à la circulation des contaminants. La Méditerranée est donc une mer qu'il conviendrait de gérer comme un patrimoine commun.

4. Références

Coppola L., L. Prieur, I. Taupier-Letage, C. Estournel, P. Testor, D. Lefevre, S. Belamari, S. LeReste and V. Taillandier (2017). Observation of oxygen ventilation into deep waters through targeted deployment of multiple Argo-O₂ floats in the north-western Mediterranean Sea in 2013. *J. Geophys. Res.*, 2017; 122(8):6325-6341. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JC012594>

Estournel C., P. Testor, I. Taupier-Letage, MN. Bouin, L. Coppola, P. Durand, P. Conan, A. Bosse, PE. Brilouet, L. Beguery, S. Belamari, K. Béranger, J. Beuvier, D. Bourras, G. Canut, A. Doerenbecher, X. Durrieu de Madron, F. D'Ortenzio, P. Drobinski, V. Ducrocq, N. Fourrié, H. Giordani, L. Houpert, L. Labatut, C. Lebeau-pin Brossier, M. Nuret, L. Prieur, O. Roussot, L. Seyfried, S. Somot (2016). HyMeX-SOP2, the field campaign dedicated to dense water formation in the north-western Mediterranean. *Oceanography*, 29(4): 196-206. DOI: 10.5670/oceanog.2016.94

Freeland H. (2023). ARGO website, Animation showing Argo float locations in the Mediterrean Sea: <https://argo.ucsd.edu/wp-content/uploads/sites/361/2021/01/Med.mpg>, accessed 22/09/2023

Houpert L., X. Durrieu de Madron, P. Testor, A. Bosse, F. D'Ortenzio, M. N. Bouin, D. Dausse, H. Le Goff, S. Kunesch, M. Labaste, L. Coppola, L. Mortier, P. Raimbault (2016), Observations of open-ocean deep convection in the northwestern Mediterranean Sea: Seasonal and interannual variability of mixing and deep water masses for the 2007-2013 Period, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 8139–8171, doi:10.1002/2016JC011857

Millot C., and I. Taupier-Letage, 2005a. *Circulation in the Mediterranean Sea. The Handbook of Environmental Chemistry*, Volume 5 Part K, Alain Saliot volume Ed., Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 29-66. doi: 10.1007/b107143. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01191856/document>

Millot C. and I. Taupier-Letage, 2005b. Additional evidence of LIW entrainment across the Algerian Basin by mesoscale eddies and not by a permanent westward-flowing vein. *Progr. In Oceanogr.*, 66, 231-250

Mourre B., Emanuela Clementi, Giovanni Coppini, Laurent Coppola, Gerasimos Korres, Antonio Novellino, Enrique Alvarez-Fanjul, Pierre Daniel, George Zodiatis, Katrin Schroeder, Joaquín Tintoré, (2023). Chapter 10 - Mediterranean observing and forecasting systems, Editor(s): Katrin Schroeder, Jacopo Chiggiato, *Oceanography of the Mediterranean Sea*, Elsevier, 2023, Pages 335-386, ISBN 9780128236925, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823692-5.00001-7>

Odatis, Carte morpho-bathymétrique de la mer Méditerranée. Crédits DOI 10.6096/MISTRALS.1341, <https://www.odatis-ocean.fr/ressources/ressources-thematiques/disciplines-de-recherche/geologie/bathymetrie> . Zoom sur le golfe du Lion : <http://magiraa.blogspot.com/2012/05/la-carte-morpho-bathymetrique-de-la.html>. consulté le 26/09/2023

Pinardi, N., C.Estournel, P.Cessi, R.Escoudier and V.Lyubartsev, 2022. Dense and deep water formation processes and Mediterranean overturning circulation. In: *Oceanography of the Mediterranean Sea*. Edited by: K.Schroeder and J.Chiggiato, Elsevier, ISBN: 9780128236925

Send, U., & Testor, P. (2017). Direct Observations Reveal the Deep Circulation of the Western Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 122, 10091-10098.

Schroeder K. and J. Chiggiato Eds (2022). *Oceanography of the Mediterranean Sea: An Introductory Guide*. Elsevier, 561pp. ISBN: 9780128236925 <https://doi.org/10.1016/C2020-0-00371-3>

Taupier-Letage I. (2020). Le circuit 3D des masses d'eau en Méditerranée. <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/le-circuit-3d-des-masses-deau-en-mediterranee> . Accessed 26/09/2023. Schéma complémentaire avec les masses d'eaux identifiées : https://miolaseyne.ifremer.fr/sciences/COURANTS/SCHEMA_3D_MED_LABELS_FR.jpg , consulté le 23/09/2023

Taupier-Letage I. (2023). Site de médiation scientifique sur la Méditerranée : <https://miolaseyne.ifremer.fr/sciences/COURANTS> ; consulté le 23/09/2023.

Taupier-Letage, I., Piazzola J., Zakardjian B., 2013. Les îles d'Hyères dans le système de circulation marine et atmosphérique de la Méditerranée. *Sci. Rep. Port-Cros natl Park*, 27 : 29-52 (2013) <https://www.portcros-parcnational.fr/fr/rapports-scientifiques/les-iles-dhyeres-dans-le-systeme-de-circulation-marine-et-atmospherique-de>

Testor P., A. Bosse, L. Houpert, F. Margirier, L. Mortier, H. Lego, D. Dausse, M. Labaste, J. Karstensen, D. Hayes, A. Olita, E. Heslop, F. D'Ortenzio, N. Mayot, H. Lavigne, O. de Fommervault, L. Coppola, L. Prieur, V. Taillandier, X. Durrieu de Madron, F. Bourrin, G. Many, P. Damien, C. Estournel, P. Marsaleix, I. Taupier-Letage, P. Raimbault, R. Waldman, M.-N. Bouin, H. Giordani, G. Caniaux, S. Somot,, V. Ducrocq, P. Conan (2018). Multiscale observation of deep convection in the northwestern Mediterranean Sea during winter 2012-2013 using multiple platforms. *J. Geophys. Res. Oceans*, 123, 1745-1776. <https://doi.org/10.1002/2016JC012671>

The COMET program/MetEd : Global Meridional Overturning Circulation (MOC) animation:
<https://youtu.be/gOYBY1Pe9Y0>, consulté le 22/09/2023

Session 3 : ITL

Figures

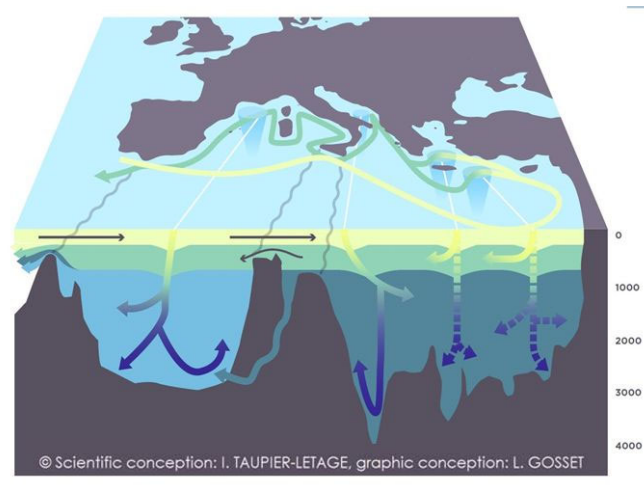


Figure 1 : Schéma simplifié du circuit 3D des masses d'eau en Méditerranée. L'eau d'origine Atlantique (en jaune) rentre en surface à Gibraltar, les eaux intermédiaires formées dans le Bassin Oriental (en vert), et les eaux profondes résultant de la convection en bleus (en pointillés dans le Bassin Oriental car plus épisodiques) ressortent en profondeur à Gibraltar. Les entonnoirs bleus figurent les zones de convection profonde. Taupier-Letage (2020).

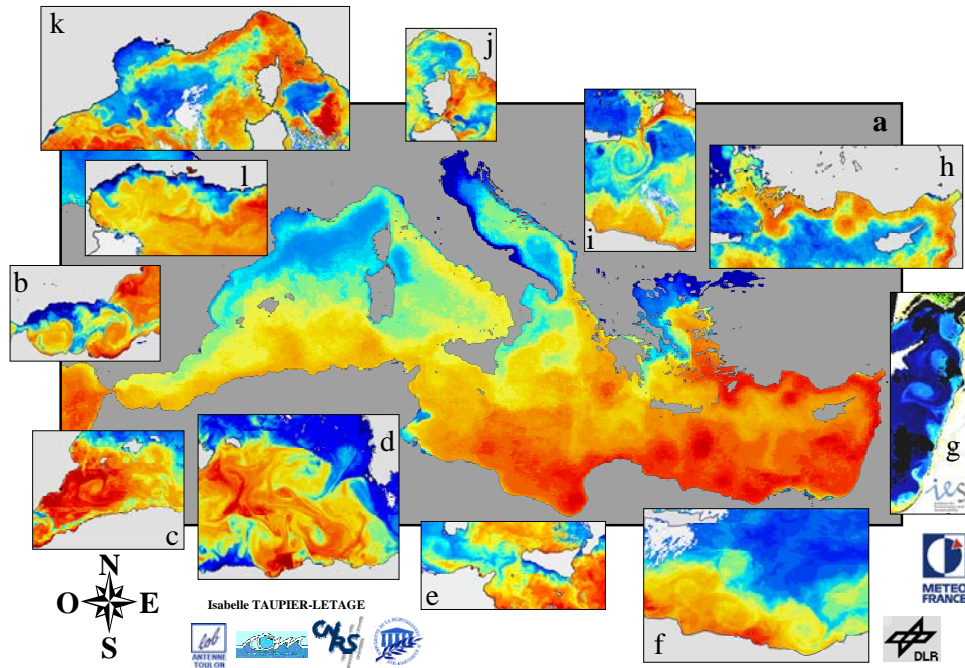


Figure 2 : La circulation de surface de la Méditerranée visualisée par l'imagerie satellitale thermique (sauf (g) ; la température augmente du bleu au rouge). (a) L'eau d'origine Atlantique (plus chaude) peut être suivie le long des pentes continentales des deux bassins dans son circuit antihoraire; (b-l) La dynamique de moyenne échelle et la variabilité associée. Crédits Images: (a, h) composite mensuelle des températures de surface pour janvier 1998 (DLR); (b-f and i-l) images individuelles AVHRR (SATMOS); (g) concentrations en chlorophylle SeaWiFS (JRC). Tiré de Taupier-Letage I., 2008. On the use of thermal infrared images for circulation studies: applications to the eastern Mediterranean basin. In: "Remote sensing of the European Seas", V. Barale and M. Gade Eds., Springer Verlag, 153-164.

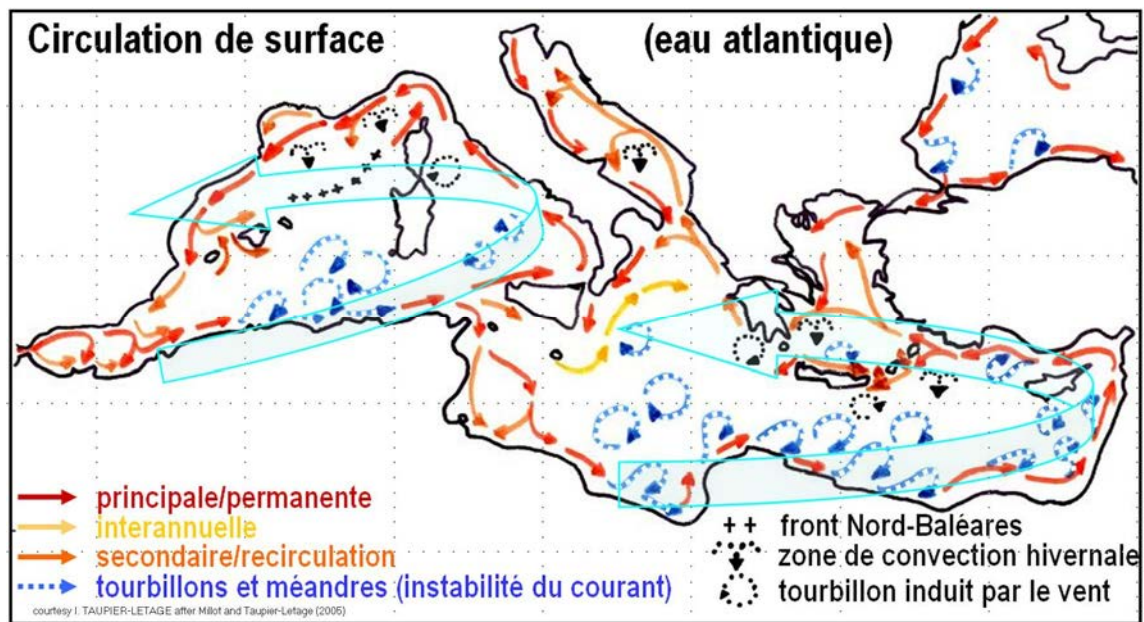


Figure 3: Schéma des courants de surface (circulation de l'eau d'origine Atlantique), d'après Millot et Taupier-Letage (2005a). Taupier-Letage, 2023
https://miolaseyne.ifremer.fr/sciences/COURANTS/schema_circ_AW_coul_F_refITL.jpg

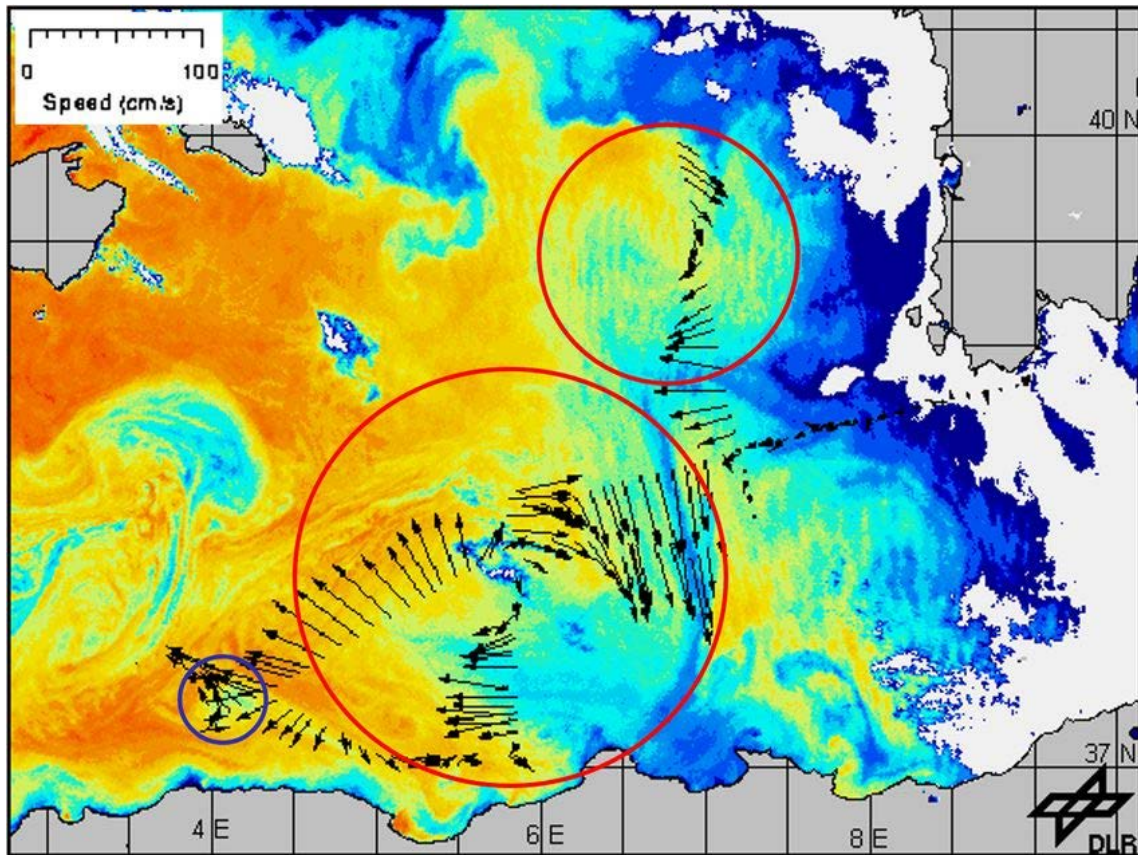


Figure 4 : Courants de surface (flèches noires) mesurés lors de sections dans des tourbillons Algériens (contours figurés en rouge pour les anticyclones, en bleu pour le cyclone), détectés par leur signature sur l'imagerie satellitaire infrarouge. L'intensité maximum est de ~ 1 nœud.

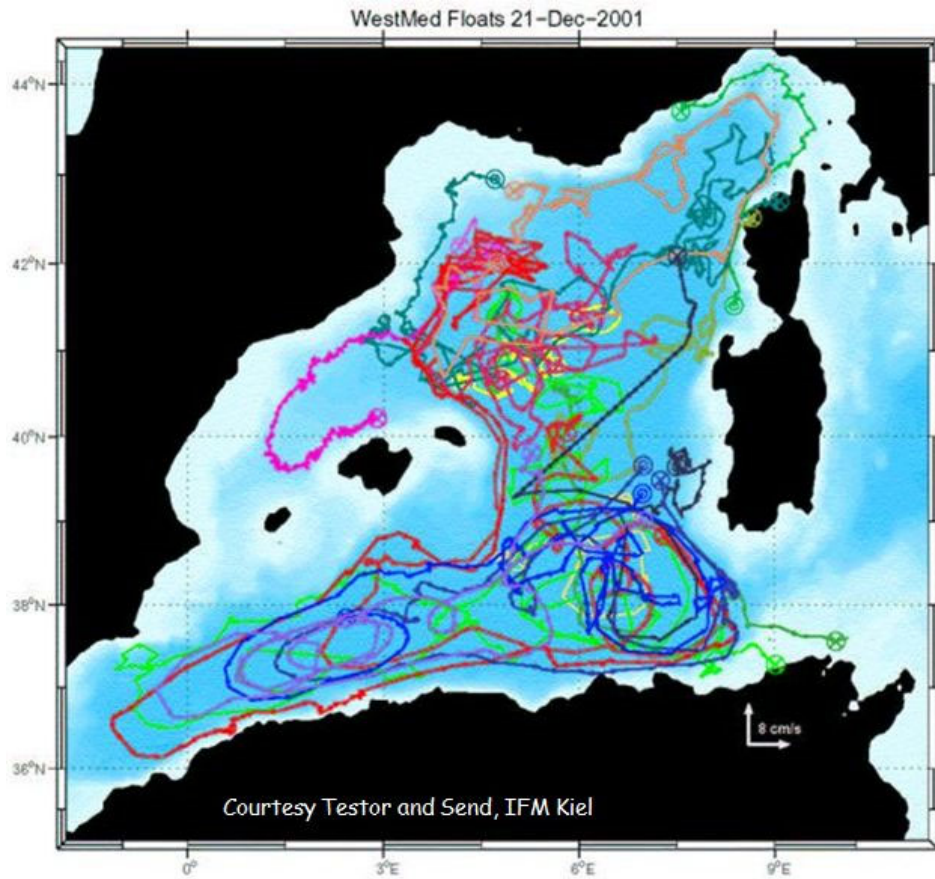


Figure 5 : Trajectoires de flotteurs profileurs dérivant dans la couche 1200-1900m (1 couleur/profileur) entre 1997 et 2002. (Courtoisie P.Testor and U. Send, IFM Kiel)