

## L'océanographie physique de la Méditerranée

Auteur : Claude MILLOT  
Ancien directeur de recherche CNRS

L'océanographie physique de la mer Méditerranée, c'est-à-dire son hydrologie et sa dynamique, dépend essentiellement des échanges d'eau entre la mer et l'atmosphère, mais aussi de l'effet Coriolis, dû à la rotation de la Terre et qui est déterminant tant pour la circulation générale que pour les phénomènes turbulents que celle-ci développe parfois [1, 2].

### Hydrologie et circulation générale

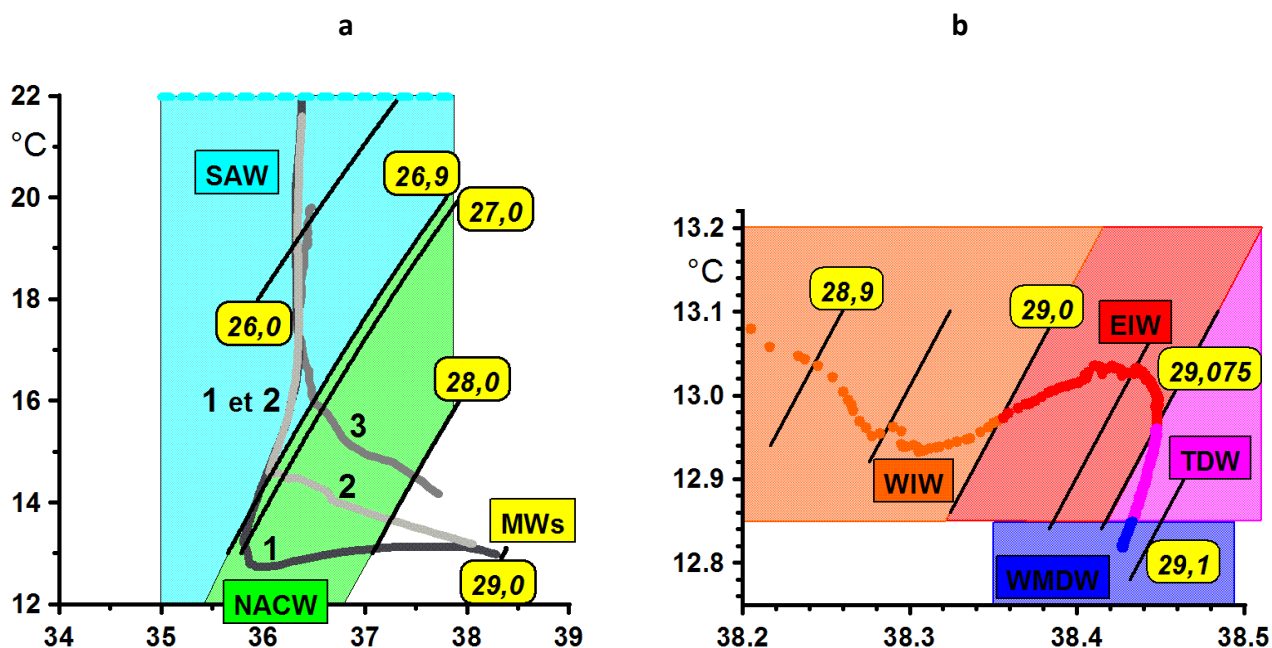
Le climat méditerranéen est relativement sec. Les pertes de la mer par évaporation ne sont pas compensées par les apports des précipitations et des fleuves ; son bilan hydrique est donc déficitaire, et, si elle ne communiquait pas avec l'océan Atlantique, son niveau baisserait d'environ un mètre par an ! Pour combler ce déficit, ce sont un million de mètres cubes d'eaux océaniques (AWs ou *Atlantic waters*, c.-à.-d. SAW, *Surface Atlantic Water*, et NACW, *North Atlantic Central Water*, figure 1a, [3]) qui pénètrent, par seconde, par le détroit de Gibraltar avant de se répandre dans la mer, d'abord dans le bassin ouest puis dans le bassin est, en traversant toute une série de sous-bassins [1]. Ce flux entrant représente mille fois le débit moyen d'un fleuve comme le Rhône et dix fois le déficit en eau par évaporation !

Dès le détroit, les eaux océaniques entrantes ont tendance à être plaquées sur leur droite par l'effet Coriolis et à former un courant superficiel qui a, lorsqu'il ne développe pas d'instabilités, quelques dizaines de kilomètres de large, et qui, du fait de son épaisseur de 200-400 mètres, va circuler le long de la pente continentale dans le sens antihoraire.

À cause de l'évaporation, les AWs voient, lors de leur progression dans la mer et tout au long de l'année, puisqu'elles s'écoulent en permanence, leur salinité et donc leur densité augmenter. En période hivernale, les AWs qui se trouvent alors dans le nord de chacun des deux bassins, plus particulièrement dans le nord de certains sous-bassins, subissent de profondes modifications par suite d'échanges intenses avec l'atmosphère, dus à des vents violents de nord (*i.e.* le mistral ou la bora) qui entraînent des masses d'air continental froides et sèches. Un surcroît d'évaporation, donc une nouvelle augmentation de salinité, et une baisse de température font augmenter la densité de ces AWs à un point tel qu'elles plongent jusqu'à des niveaux soit intermédiaires, soit profonds.

Ces eaux alors devenues méditerranéennes (MWs ou *Mediterranean waters*) vont d'abord s'accumuler aux profondeurs où elles sont en équilibre de densité, avant de se répandre et, toujours à cause de l'effet Coriolis, d'abord circuler le long des isobathes dans le sens antihoraire.

Les eaux intermédiaires (IWs) s'écouleront ainsi, et, pour la plupart, directement par le canal de Sicile pour celles formées dans le bassin est, puis dans l'océan par le détroit de Gibraltar pour celles-ci ainsi que pour celles formées dans le bassin ouest. Les eaux profondes (DWs) vont d'abord être piégées dans chacun des deux bassins avant d'être, plus ou moins rapidement, soulevées par des eaux encore plus denses et ainsi déborder de chaque bassin. Toujours à cause de l'effet Coriolis, les IWs plus rapides s'écoulent sur le côté droit du canal de Sicile et du détroit de Gibraltar, alors que les DWs sortent plutôt sur le côté gauche, l'interface entre les IWs et les DWs ayant une pente de quelques % [1, 3].



**Figure 1.** La densité est la seule variable caractérisant une particule d'eau, qui intervient dans les équations du mouvement ; elle dépend des variables température, salinité et pression, cette dernière ne modifiant que la température. Des diagrammes représentant la densité en fonction de la température potentielle ( $\theta$ , la température *in situ*  $T$  corrigée de l'effet de la pression) et de la salinité ( $S$ ) fournissent donc des informations essentielles. Ces diagrammes  $\theta$ - $S$  représentent en fait les isolignes d'anomalie de masse volumique ( $\sigma_t$ , en  $\text{kg/m}^3$  ; une anomalie de 26,0 correspond à une densité de 1,026) dans le détroit de Gibraltar [3]. La forme d'un tel diagramme révèle la présence de telle ou telle masse d'eau, tandis que les valeurs numériques associées permettent de préciser le degré de mélange de ces eaux entre elles tout au cours de leur circulation, c.-à-d. la région dans laquelle ce profil vertical a été obtenu.

**a.** AWS : les trois profils verticaux numérotés 1, 2 et 3 (1 et 2 étant quasiment identiques dans la couche SAW) obtenus au même point indiquent la présence de SAW et NACW en pourcentages variables (le profil 3 ne révèle aucune trace de NACW, le profil 1 révèle une NACW pratiquement pure, le profil 2 révèle de la NACW relativement mélangée).

**b.** Profil vertical identifiant toutes les eaux intermédiaires (IW) et profondes (DW), formées dans les bassins est et ouest, qui ont circulé jusque-là sans se mélanger complètement.

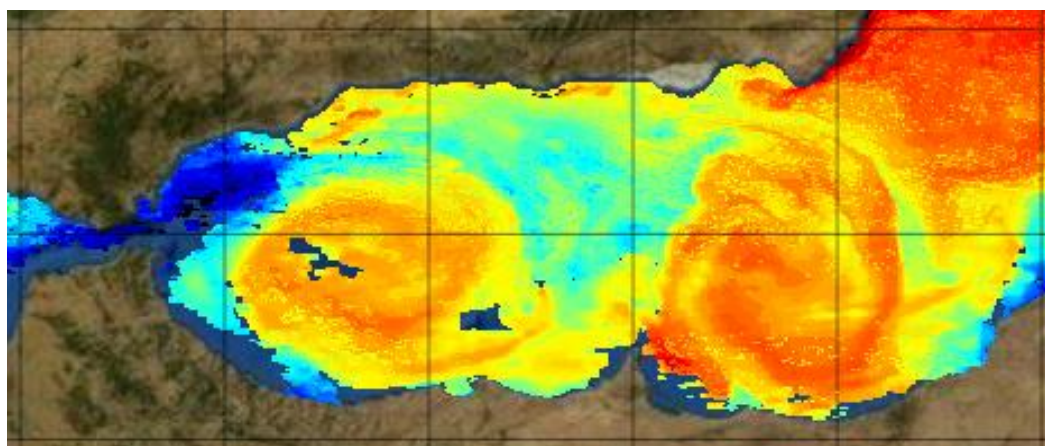
Avant de plonger dans un sous-bassin, chacune des MWs acquiert des caractéristiques (température, salinité, densité) propres à ce sous-bassin ; par exemple, celles formées dans le Levantin sont relativement chaudes et salées, alors que celles formées dans l'Adriatique sont relativement froides et peu salées. Mais, une fois formées, ces MWs ne sont plus en contact avec l'atmosphère, et, leurs caractéristiques n'étant modifiées que par mélange avec les eaux environnantes, l'on peut suivre chacune d'entre elles pendant une partie plus ou moins longue de leur circuit dans la mer. Plusieurs IWs et DWs sont formées dans le bassin est mais elles ne sont plus différenciables dans le canal de Sicile où l'on n'identifie qu'une seule IW (EIW, *Eastern Intermediate Water*, [4]) et une DW qui cascade jusque vers 2 000 m dans le sous-bassin tyrrhénien (TDW, *Tyrrhenian Dense Water*, [1]). Ces deux eaux peuvent néanmoins être différenciées de l'IW (WIW, *Western Intermediate Water*) et de la DW (WMDW, *Western Mediterranean Deep Water*), formées dans le bassin ouest, jusque dans le détroit de Gibraltar (figure 1b), voire jusque dans l'océan [3].

On retiendra donc que la « machine Méditerranée » transforme des eaux océaniques ayant des caractéristiques relativement variables (AWs, figure 1a), en une série d'eaux, plus froides et plus salées, aux caractéristiques relativement spécifiques (MWS, figure 1a,b), et que le flux sortant vaut environ 0,9 fois le flux entrant (la différence représentant le déficit) !

### Phénomènes turbulents

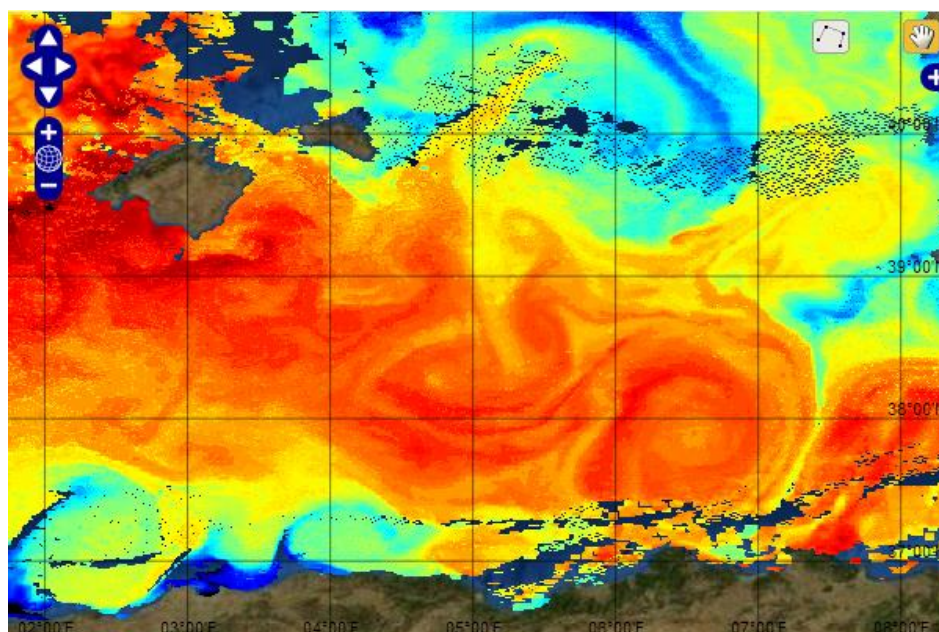
Cette brève description du fonctionnement de la mer (bilan hydrique et circulation générale), facile à comprendre, ne permet pas à elle seul d'expliquer la relative complexité qui apparaît, par exemple, dans la distribution de la température des eaux superficielle (données en temps réel accessibles sur [www.view.myocean.eu](http://www.view.myocean.eu), voir figure 2). Essentiellement, une autre conséquence majeure de l'effet Coriolis est à prendre en compte dans le développement de phénomènes turbulents, dits « de moyenne échelle » (quelques dizaines à 100-300 kilomètres et de quelques mois à deux-trois années) qu'il est relativement difficile d'expliquer simplement dans une note aussi courte, mais qui sont désormais clairement identifiés et relativement bien compris [1, 2].

L'effet Coriolis et l'orientation du détroit, ainsi que les irrégularités de la ligne de côte, permettent d'expliquer la présence quasi-permanente de deux circuits anticycloniques de moyenne échelle relativement stables dans le sous-bassin Alboran (figure 2a).



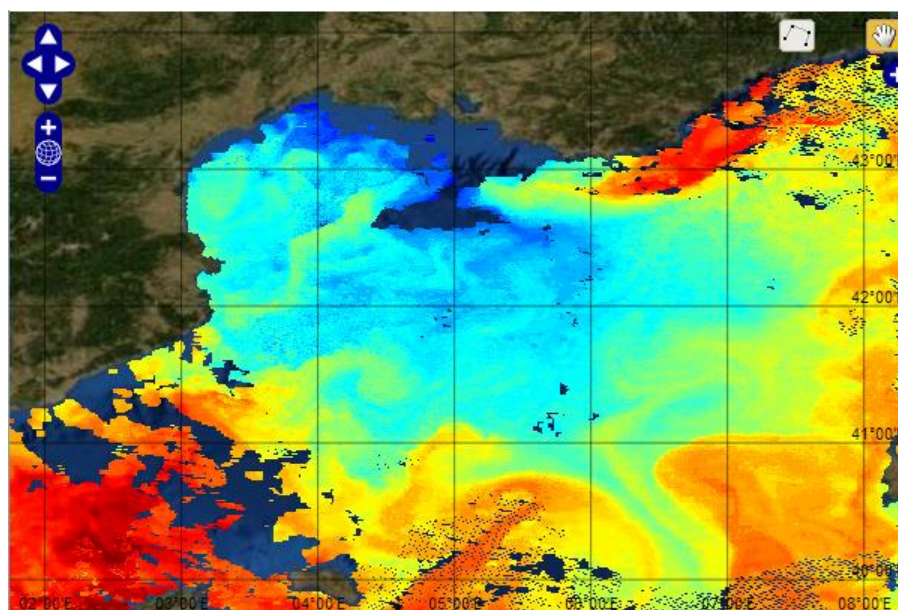
**Figure 2a.** Exemple de mesures satellitaires de la température superficielle en Alboran.

Le long de la pente continentale algérienne (figure 2b), c'est le seul effet Coriolis qui conditionne l'instabilité de l'écoulement des AWs, connu désormais sous le nom de courant algérien [1]. Lorsqu'il est déstabilisé, ce courant entraîne la formation de tourbillons anticycloniques d'abord de taille réduite (quelques dizaines de kilomètres), qui sont associés à un phénomène d'upwelling sur leur bord sud-ouest et qui se propagent vers l'est à une vitesse de quelques kilomètres par jour. Ces tourbillons pouvant atteindre des diamètres de près de 300 kilomètres (certains ayant même été bloqués entre la pente algérienne et les Baléares) et s'étendre jusqu'au fond (> 2 000 m), ils ne peuvent franchir le canal de Sardaigne et errent dans le sous-bassin algérien où certains ont pu être suivis pendant plus de 3 ans. Ils peuvent interagir avec le courant dont ils sont issus et entraîner des IWs depuis la pente continentale sarde vers la partie centrale du sous-bassin : c'est la présence d'IWs à cet endroit qui avait conduit à des schémas montrant des IWs qui traversaient le sous-bassin depuis le canal de Sardaigne directement vers le détroit de Gibraltar !!! [1].



**Figure 2b.** Exemple de mesures satellitaires de la température superficielle au large des côtes algériennes (28 juin 2013, échelle bleu-rouge de 18 °C à 23 °C).

C'est également l'effet Coriolis qui permet de comprendre la dépendance entre les zones de formation d'eau dense (figure 2c) et la circulation générale des AWs qu'elles aspirent et qui en font donc le tour en permanence, même si leur signature superficielle peut être localement et temporairement masquée par celle des eaux froides issues des upwellings côtiers induits par les vents de nord [1].

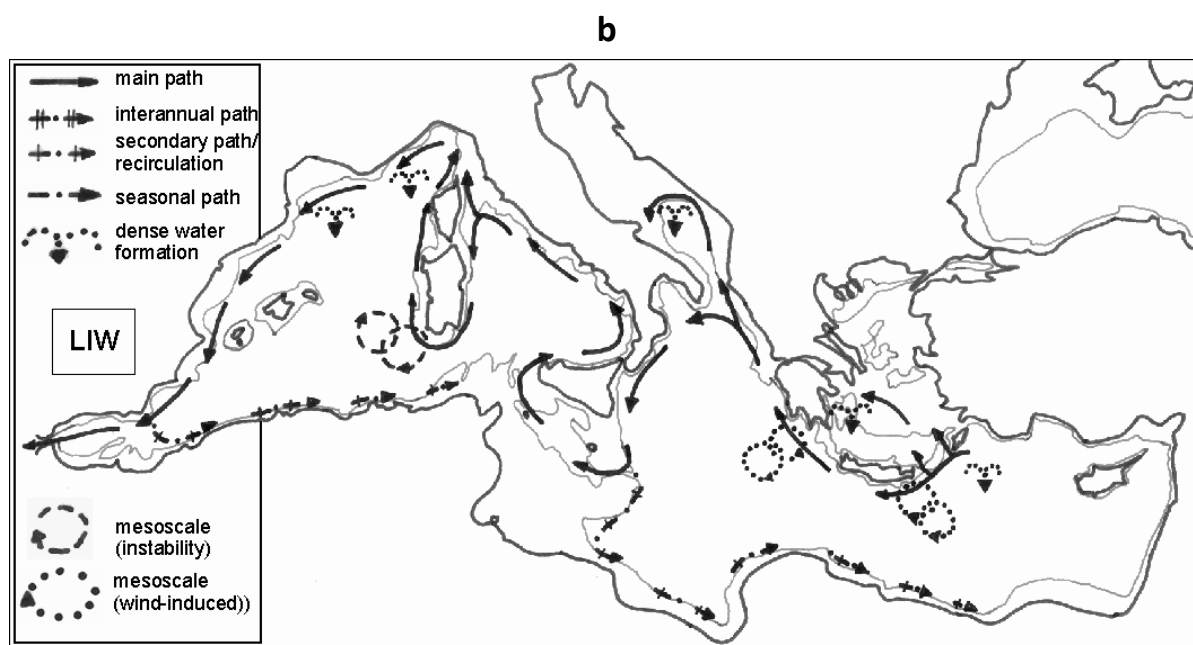
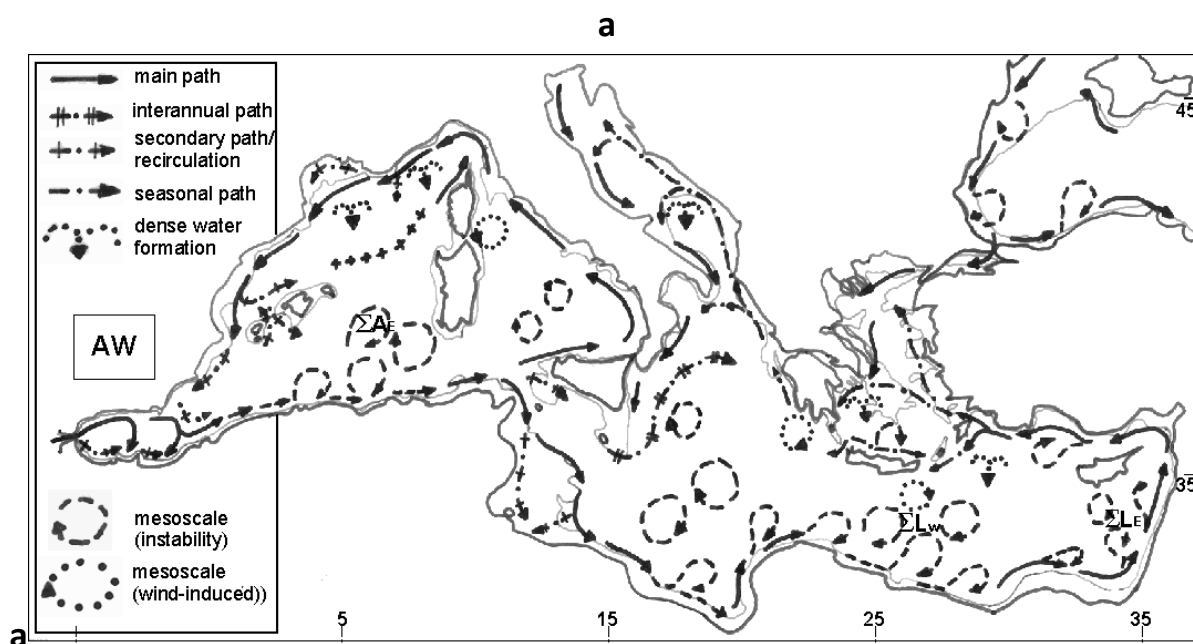


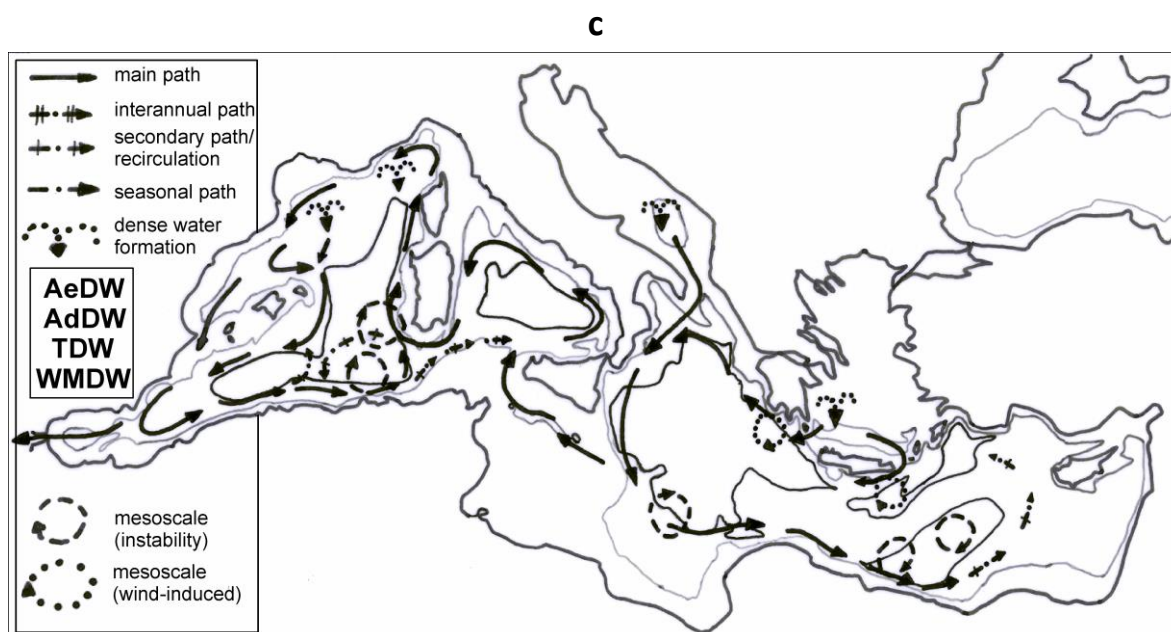
**Figure 2c.** Exemple de mesures satellitaires de la température superficielle dans le nord du bassin ouest (28 juin 2013, échelle de 15 °C à 23 °C).

Enfin, cet effet est essentiel dans la genèse de tourbillons anticycloniques par le vent avec une orographie marquée, en particulier quand soufflent les étésiens (vents de nord soufflant en été) sur le bassin est.

## Schématisation de la circulation

Ces différents éléments permettent de préciser les grandes lignes des schémas de circulation récemment proposés [1] aux niveaux superficiel (figure 3a), intermédiaire (figure 3b) et profond (figure 3c).





**Figure 3.** Schéma de circulation des eaux : **a.** océaniques, AWs, **b.** intermédiaires, IWs (LIW est l'eau intermédiaire formée dans le Levantin ; les IWs formées dans les autres sous-bassins suivent le même circuit), **c.** profondes, DWs (AeDW est l'eau dense formée dans l'Égéen, AdDW celle formée dans l'Adriatique). Source [1].

*Main path* : circuit principal

*Interannual path* : circuit interannuel

*Secondary path/recirculation* : circuit secondaire/recirculation

*Seasonal path* : circuit saisonnier

*Dense water formation* : formation d'eau dense

*Mesoscale (instability)* : moyenne échelle (instabilité)

*Mesoscale (wind-induced)* : moyenne échelle (induite par le vent)

### Pour en savoir plus

[1] Millot C. & Taupier-Letage I. (2005). Circulation in the Mediterranean Sea. In : *The Handbook of Environmental Chemistry*. Vol. 5 : *Water Pollution*, Part K. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg : 29-66, doi: 10.1007/b107143. <http://dx.doi.org/10.1007/b107143>.

[2] Fieux M. (2010). *L'océan planétaire*. Presses de l'ENSTA, Paris, 422 p.

[3] Millot C. (2013a). The Mediterranean Sea in- and out-flows' heterogeneities. *Progress in Oceanography*, 120, 254-278. doi.org/10.1016/j.pocean.2013.09.007.

[4] Millot C. (2013b). Levantine Intermediate Water characteristics: an astounding general misunderstanding! *Scientia Marina*, 77(2), 217-232. doi:10.3989/scimar.03518.13A

Nb : tous les documents de l'auteur sont disponibles sur [www.ifremer.fr/lobtln/](http://www.ifremer.fr/lobtln/)