

## **Interaction entre hydrodynamique et biogénèse**

### 3 CHAPITRE 3 : Interaction entre dynamique et biogénèse

Dans un contexte pauvre en sels nutritifs, la biologie de la Méditerranée dépend des apports extérieurs et de la stimulation des processus liés à la formation et à la mise en mouvement des masses d'eaux de sub-surface (Yilmaz et Tugrul, 1998 ; Santinelli et al. 2012 ; Gacic et al. 2012 ; Estrada et al. 2014 ; Séverin et al. 2014 ; DeFommervault et al. 2015), favorisant un enrichissement planctonique en surface (Bethoux, 1989 ; Levy et al. 1999 ; Marty et Chiaverini, 2002 ; D'Ortenzio et Ribera d'Alcalà, 2009). Dans cette partie, nous caractériserons les sels nutritifs en Méditerranée ainsi que l'impact de la convection profonde sur leur répartition. Enfin, nous présenterons l'évolution de la chlorophylle dans la couche de subsurface, ce qui permettra d'identifier les conditions qui seront les plus favorables aux efflorescences lors des évènements que nous modéliserons.

#### 3.1. Les sels nutritifs

Les sels nutritifs tels que le nitrate, le phosphate et le silicate sont distribués suivant un gradient vertical marqué, qui sépare les eaux de surface pauvres en nutriments des eaux de fond. L'ammonium, excrété par les hétérotrophes se trouve uniquement dans les eaux de surface. Cette distribution verticale des sels nutritifs majeurs s'explique en partie par les processus biogéochimiques. Les eaux de surface sont appauvries en sels nutritifs, consommés par le phytoplancton. Les eaux de fond, à l'inverse, sont riches en nutriments et les masses d'eau intermédiaires présentent souvent des valeurs de concentration en sels nutritifs légèrement plus fortes que les eaux de fond, du fait de la reminéralisation préférentielle de la matière organique par les bactéries dans cette couche.

Parallèlement au gradient vertical des concentrations en sels nutritifs, la mer Méditerranée présente des zones oligotrophes, c'est à dire pauvres en nutriments, avec un gradient marqué de l'ouest vers l'est. Les deux bassins occidental et oriental fonctionnent différemment : les concentrations en sels nutritifs dans les eaux intermédiaires et profondes du bassin occidental sont plus fortes que celles des eaux du bassin oriental. Le taux de production primaire, le positionnement vertical des processus biogéochimiques ainsi que leur intensité sont par conséquent différents.

L'étude de la stœchiométrie, en particulier l'étude du ratio stœchiométrique N/P (azote/phosphore) qui représente le rapport de la concentration en nitrate par la concentration en phosphate, est une discipline à part entière en Mer Méditerranée. La mer Méditerranée fonctionne différemment de l'océan global. Les rapports N/P dans les eaux profondes de l'Océan global sont de l'ordre 16:1 (rapport de Redfield). L'utilisation des sels nutritifs par les organismes marins est responsable de ce rapport (Copin-Montegut et Copin-Montegut, 1983). En mer Méditerranée, ce rapport n'est pas le même, il est beaucoup plus fort, estimé en moyenne à N/P = 24:1 (Béthoux et al. 2005). De plus, il présente un gradient horizontal marqué d'ouest en est. A l'ouest, la LIW et la WMDW présentent un rapport de 22:1 (Copin-Montegut, 1986) tandis qu'à l'est, le rapport atteint  $27 \pm 3:1$  en dessous de 200 m de profondeur dans le bassin Levantin et près de 30:1 en surface. Ce rapport est généralement plus élevé au-dessus de la nitracline. Ce fait s'explique par une préférence de consommation du phosphate par rapport au nitrate par les phytoplanctons (Raimbault et Coste, 1990). Ces ratios confirment que la Méditerranée est limitée en phosphate, en particulier dans le bassin est.

### 3.1.1 Les échanges des sels nutritifs

La variabilité spatiale et temporelle des sels nutritifs est par ailleurs liée aux différentes sources d'apport de sels nutritifs.

La mer Méditerranée représente une source nutritive pour l'Océan Atlantique (Ribera d'Alcalà et al. 2003). En effet, les eaux intermédiaires et une partie des eaux profondes de la mer Méditerranée, riches en sels nutritifs, sortent du bassin, grâce à la circulation thermohaline par le détroit de Gibraltar à hauteur de  $1 \pm 0.04$  Sv. A l'inverse, la masse d'eau au-dessus de la thermocline est quasi-dépourvue de nutriments sur une très longue période de l'année (entre mars et décembre) sur l'ensemble de la mer Méditerranée pélagique. Au niveau du détroit de Gibraltar, ce sont les eaux de l'Océan Atlantique qui entrent en surface dans la Mer Méditerranée. Les sels nutritifs entrant ainsi par le détroit de Gibraltar sont rapidement consommés en mer d'Alboran et le long de la côte algérienne (Crise et al. 1999). L'eau de surface se disperse ensuite vers le nord et vers le bassin oriental très appauvri en nutriments.

Outre l'apport de nutriments en surface depuis le détroit de Gibraltar, d'autres sources potentielles de sels nutritifs ont été déterminées : les apports terrigènes par les fleuves et par les dépôts atmosphériques (Markaki et al. 2010 ; Coste et al. 1998). Les apports de nutriments des fleuves créent en général une forte productivité observée par images satellites par exemple à l'embouchure du Pô en Adriatique (Polimene et al., 2006). Les apports les plus importants sont fournis par le Rhône (débit moyen  $Q_m = 1721 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) dans le Golfe du Lion, l'Ebre ( $Q_m = 416 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) dans la mer des Baléares, l'Adige ( $Q_m = 200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) et le Pô ( $Q_m = 1569 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) dans l'Adriatique, le Tevere ( $Q_m = 216 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) dans la mer Tyrrhénienne. Ludwig et al. (2010) montrent que la variabilité des débits des rivières est très forte, entraînant une variation importante des apports en sels nutritifs, en particulier pour les apports en nitrate. Depuis les années 1980 et suite à la réduction imposée des phosphates dans les lessives sur la rive nord, les apports en phosphate à la mer par les fleuves ont beaucoup diminué conduisant probablement à un déséquilibre supplémentaire de la stœchiométrie du bassin.

Les apports atmosphériques pourraient également expliquer les rapports N:P élevés. D'après (Krom et al. 2004), les dépôts atmosphériques se composent de 60% d'azote et 30% de phosphore dans le bassin oriental Méditerranéen. D'un point de vue général, les apports atmosphériques jouent un rôle dans la fertilité des eaux de surface (Migon et al. 2002). Cet impact sur la fertilité est plus important en été pendant la période oligotrophe. Guerzoni et al (1999) montrent que l'impact des dépôts de la matière inorganique atmosphérique est plus important lorsqu'on s'éloigne des côtes vers le large, région moins variable et oligotrophe, loin des apports par les rivières et des zones dynamiquement actives par les processus d'upwelling et par la dynamique frontale.

### 3.1.2 Impact du mélange sur les échanges verticaux de sels nutritifs

#### ***Les périodes automnale et hivernale***

La mer Méditerranée enregistre chaque année des évènements de vents impressionnants. Tout d'abord en automne, les premiers coups de vent ont une conséquence importante sur les écosystèmes planctoniques. Le vent mélange les eaux de subsurface. Les nutriments mis à disposition induisent des efflorescences automnales

dans le bassin nord occidental et nord oriental. Le vent engendre un préconditionnement pour la convection profonde de la zone du Gyre Nord (GN) et celle du Gyre de Rhodes pour la convection profonde.

L'impact des forçages atmosphériques sur la mer est présenté sous forme de série temporelle du flux de l'énergie à l'interface air/mer (Fig. 2.1). Il s'agit du calcul du bilan radiatif. C'est l'énergie perdue par la mer ( $Q_{net}$ ,  $W.m^{-2}$ ) sous l'influence des masses d'air hivernales froides et sèches. Le bilan radiatif calculé est obtenu à partir des paramètres obtenus du La mer Méditerranée enregistre chaque année des événements de vents intenses. Tout d'abord en automne, les premiers coups de vent ont une conséquence importante sur les écosystèmes planctoniques. Le vent mélange les eaux de subsurface. Les nutriments mis à disposition induisent des efflorescences automnales dans tout le bassin.

La convection hivernale en Méditerranée nord occidentale représente la source la plus importante de sels nutritifs. Elle a été estimée pour l'hiver 2011 par Séverin et al (2014) à  $1.3 \cdot 10^{13}$  moles de  $NO_3+NO_2$ . L'enrichissement lors de la convection profonde a été mesuré à  $8.9 \mu M$  de nitrate, de  $0.4 \mu M$  de phosphate et de  $7.7 \mu M$  de silicate en surface au centre du gyre nord en Méditerranée NW. Par ailleurs, Defommervault et al (2015) estiment que la concentration de surface résultant de la convection dépend de l'intensité de cette convection. Ils ont par conséquent estimé des valeurs de concentrations de nitrate et de phosphate en fonction de la MLD. Comme exemple, la concentration serait, pour respectivement le nitrate et le phosphate, de  $6.93$  et  $0.28 \mu M$  pour une MLD de  $110$  m et de  $7.78$  et  $0.37 \mu M$  à  $1000$  m dans le sous-bassin Ligure en Méditerranée nord-occidentale.

Dans les régions où la convection ne se produit pas, l'hiver voit principalement un épaissement de la couche de mélange qui en perçant les nutriclines se traduit par des remontées de sels nutritifs limitées. Il semble cependant qu'au contraire des zones de convection où les sels nutritifs s'accumulent, ces nutriments soient rapidement consommés.

### ***Les périodes printanière et estivale***

La période de fin d'hiver début de printemps est une période clé pour la zone de convection de la Méditerranée nord-occidentale. C'est à ce moment-là que les sels nutritifs sont consommés. Les conditions de déclenchement du bloom sont encore controversées. Les images satellites ont montré que l'efflorescence phytoplanctonique en surface varie également d'une année à l'autre. Elle était par exemple intense en 2012 et en 2013, années de forte convection, et faible et courte en 2014, année caractérisée par un hiver chaud.

A partir du mois de mai, les flux de chaleur à la surface de la mer deviennent positifs. Cette dernière est réchauffée par la température de l'air. La température de surface passe de 13 °C à plus de 24 °C en été. Le mélange induit par le vent est réduit à de courtes périodes. En surface, les images des satellites ne détectent pas beaucoup d'activités mis à part aux embouchures de rivières. On observe une sorte « d'estivation » du plancton. C'est en subsurface que le maximum de chlorophylle (DCM) vient en fait se positionner. L'étude récente de Lavigne et al (2015) ont bien résumé l'hétérogénéité de leur répartition géographique.

### 3.1.3 Enrichissement de surface par la convection profonde

La convection profonde en Méditerranée nord occidentale représente la source la plus importante en les nutritifs, estimé par Séverin et al (2014) à  $1.3 \cdot 10^{13}$  mole de  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ . L'enrichissement lors de la convection profonde a été mesuré à 8.9  $\mu\text{M}$  de nitrate, de 0.4  $\mu\text{M}$  de phosphate et de 7.7  $\mu\text{M}$  de silicate en surface au centre du gyre nord en Méditerranée NW.

Defommervault et al (2015) estiment que la concentration de surface résultante de la convection profonde dépend de l'intensité de la convection. Ils ont par conséquent estimé des valeurs de concentrations de nitrate et de phosphate en fonction de la MLD. Comme exemple, la concentration serait, pour respectivement le nitrate et le phosphate, de 6.93 et 0.28  $\mu\text{M}$  pour une MLD de 110 m et de 7.78 et 0.37  $\mu\text{M}$  à 1000m dans le sous-bassin ligure en Med NW.

## 3.2. La couche de mélange et le cycle de la chlorophylle

La chlorophylle en surface ou en subsurface est distribuée d'une manière hétérogène en mer Méditerranée. Cette distribution obéit à différents facteurs abiotiques (mélange vertical, lumière, température, disponibilité de nutriments...) et à des facteurs biotiques (prédation par le zooplancton, compétition interne et externe avec les bactéries). La variabilité de la couche de mélange, associée à l'exposition des cellules à la lumière et à l'enrichissement en sels nutritifs sont des paramètres clés pour les cycles des éléments nutritifs et la dynamique de la production planctonique. Ces paramètres sont donc également probablement les clés de la délimitation des biorégions en mer Méditerranée. C'est ce qu'a expliqué Lavigne (2014) dans son manuscrit de thèse après avoir repris une base de données historiques en se focalisant sur la biorégionalisation précédemment établie par D'Ortenzio et Ribera d'Alcalà (2009). Elle montre que le régime « no-bloom », est caractérisé par une efflorescence hivernale dès le mois de novembre, qui croît avec le mélange hivernal ; celui-ci enrichit la couche de surface en sels nutritifs et n'entraîne pas de limitation par la lumière : c'est la théorie de "Entrainment Bloom" d'après Cullen et al. (2002). Au contraire, les régimes de bloom sont caractérisés par une décroissance phytoplanctonique pendant l'hiver ; dans ces régimes qui se situent dans les zones de convection, le mélange profond transporte les cellules végétales hors de la zone euphotique ce qui ralentit le processus de photosynthèse à cause de la limitation de la lumière : c'est la théorie "Detrainement Bloom" d'après Cullen et al (2002).

