CARACTÉRISTIQUES ET ÉTAT ÉCOLOGIQUE

MÉDITERRANÉE OCCIDENTALE

CARACTÉRISTIQUES ET ÉTAT ÉCOLOGIQUE

MÉDITERRANÉE OCCIDENTALE

JUIN 2012

ÉTAT BIOLOGIQUE

Caractéristiques biologiques - biocénoses

Communautés du phytoplancton

Catherine Belin
(Ifremer, Nantes),
Colombe Baucour,
Marc Bouchoucha
et Nicolas Ganzin
(Ifremer, La Seyne-sur-Mer).
Avec la participation de
Hansy Haberkorn.

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie
Agence des aires marines protégées
Ifremer

Les résultats détaillés dans cette contribution thématique, hors synthèse bibliographique (voir § 1.2.3), sont basés sur : i) les données disponibles dans la base de données Quadrige[2] provenant du réseau de surveillance Rephy pour les données côtières, ii) les simulations faites à partir des modèles SYMPHONIE et Eco3M-MED, pour les données du large.

Les données du Rephy proviennent d'observations au microscope optique, réalisées sur des échantillons d'eau généralement prélevés en subsurface. Ces données concernent donc très majoritairement le microphytoplancton (> 20 µm), éventuellement quelques groupes de nanophytoplancton, pour des espèces en chaîne ou quand les taxons sont identifiables en tant que famille, ordre ou classe. Le nano- et surtout le picophytoplancton sont par conséquent au moins partiellement, sinon totalement, absents de ces données.

Cette évaluation sur les communautés du phytoplancton doit être considérée en relation avec celle réalisée sur la chlorophylle *a* (*chla*), considérée comme un indicateur de la biomasse totale du phytoplancton. La *chla* est dominante.

1. ÉTAT DES LIEUX. NIVEAUX ET TENDANCES

1.1. ZONE CÔTIÈRE

1.1.1. Résultats d'une évaluation de la fréquence des blooms, réalisée avec les critères DCE

L'évaluation de la qualité des masses d'eau dans le cadre de la DCE est effectuée pour le phytoplancton au travers de trois indices, parmi lesquels l'indice d'abondance, basé sur la fréquence des blooms sur une période de six ans. Un bloom est défini dans les eaux côtières françaises de la Méditerranée comme une concentration supérieure à 100 000 ou 250 000 cellules par litre – selon qu'il s'agit de grandes ou de petites cellules –, pour un taxon donné dans un échantillon [1], à l'exception des masses d'eau corses pour lesquelles ce seuil est égal à 25 000 cellules par litre étant donné l'état naturellement très oligotrophe de ces eaux. La fréquence mesurée des blooms est ensuite comparée à la fréquence jugée naturelle pour la région, égale ici à deux mois de blooms sur les douze mois de l'année – un bloom au printemps et un autre en automne. Les résultats des évaluations réalisées pour cet indice d'abondance à partir des données Quadrige[2] / Rephy, sur la période 2005–2010 pour les masses d'eau côtières méditerranéennes, sont visualisés en figure 1.

Les résultats montrent que toutes les eaux côtières situées à l'est du golfe de Fos (Marseille) ainsi que celles de Corse sont de très bonne qualité (indice 1), indiquant que la fréquence des blooms ne dépasse jamais le niveau naturel attendu pour cet écosystème. Sur le littoral du Languedoc-Roussillon, le bilan est plus mitigé, avec une seule masse d'eau de très bonne qualité, la côte rocheuse de Banyuls, et deux masses d'eau en état moyen (indice 3), sur le littoral allant de Sète à la pointe de l'Espiguette ; pour ces dernières, la fréquence des blooms dépasse donc le niveau raisonnable au regard des caractéristiques physico-chimiques naturelles, indiquant un dysfonctionnement, en particulier sur la côte proche de l'étang de Thau.

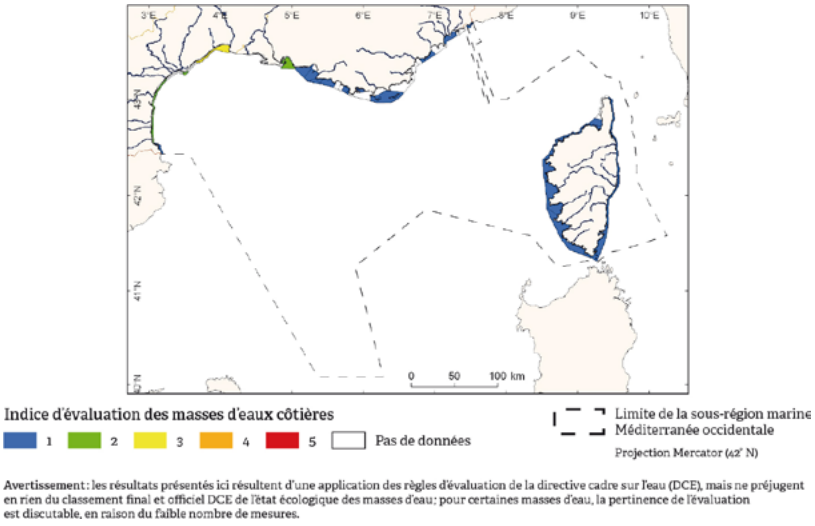

Figure 1 : Évaluation de l'indice d'abondance (fréquence des blooms) sur la période 2005–2010, avec les critères DCE (Sources : Ifremer-données Quadrige[2], SHOM, IGN, ESRI).

Le tableau 1 montre que les diatomées (Bacillariophyta) sont responsables de la quasi-totalité des blooms sur le continent (entre 93 et 97 %), et que les Cryptophyceae tiennent aussi une place importante en Corse. Pour les masses d'eau en état moyen proches de Sète, les genres responsables sont surtout *Chaetoceros* et *Pseudo-nitzschia*, ce dernier comprenant de nombreuses espèces toxiques (voir § 1.1.2). Les blooms sont observés entre mars et juin, et sont donc probablement liés aux apports de nutriments en mer après le lessivage des bassins versants par les pluies hivernales autour de l'étang de Thau. Les dinoflagellés sont très peu présents, quelle que soit la région. Des blooms à Cryptophyceae sont observés autour du golfe de Fos.

ZONE	TAXONS	BLOOMS PAR TAXON (EN %)	GENRES ET ESPÈCES LES PLUS REPRÉSENTÉS DANS LE TAXON
Méditerranée « Côte Languedoc-Roussillon »	Bacillariophyta	97	*Chaetoceros, Leptocylindrus minimus, Pseudo-nitzschia, Skeletonema costatum*
	Cryptophyceae	1	
	Dinophyceae	1	*Gymnodinium*
Méditerranée « Provence-Côte d'Azur »	Bacillariophyta	93	*Chaetoceros, Leptocylindrus minimus, Skeletonema costatum*
	Cryptophyceae	1	
Corse	Bacillariophyta	57	*Chaetoceros, Thalassionema nitzschioides*
	Cryptophyceae	43	

Tableau 1 : Taxons contribuant aux blooms sur la période 2005–2010. Bacillariophyta = diatomées – Dinophyceae = dinoflagellés.

1.1.2. Données de biodiversité

La biodiversité du phytoplancton est appréhendée ici selon trois critères étudiés à partir des données Quadrige[2] : le nombre de taxons identifiés ; la dominance ; la répartition et l'intensité des principaux genres toxiques.

Le nombre de taxons différents globalement identifiés sur la façade méditerranéenne, sur les quinze dernières années, est estimé entre 200 et 300, sachant que ce nombre recouvre des niveaux taxinomiques différents allant de la famille à l'espèce. La proportion des taxons appartenant aux diatomées est similaire à celle des taxons appartenant aux dinoflagellés (environ 44 %), alors que ces derniers ne sont retrouvés ni dans les blooms ni dans les taxons dominants (cf. ci-avant), indiquant en conséquence qu'ils sont en faible concentration ou peu présents durablement.

La dominance est ici calculée par un indice qui tient compte à la fois de l'importance relative du taxon dans chaque échantillon et de la régularité de son apparition dans le temps. On retrouve dans les taxons dominants listés dans le tableau 2 tous les taxons contribuant majoritairement aux blooms – à l'exception de *Gymnodinium* –, mais aussi de nombreuses diatomées dont la présence dans le milieu est observée régulièrement, bien qu'elles ne soient pas particulièrement abondantes. À noter que les quatre premiers taxons dominants sont aussi ceux qui dominent sur l'ensemble du littoral français métropolitain, toutes régions confondues.

1. Pseudo-nitzschia
2. Chaetoceros
3. Cryptophyceae
4. Skeletonema costatum
5. Thalassionema nitzschioides
6. Leptocylindrus
7. Scrippsiella + Ensiculifera + Pentapharsodinium + Bysmatrum
8. Nitzschia longissima
9. Prorocentrum
10. Navicula + Fallacia + Haslea + Lyrella + Petroneis
11. Licmophora
12. Dictyocha
13. Dactyliosolen fragilissimus
14. Asterionellopsis glacialis
15. Euglenida

Tableau 2 : Taxons dominants en Méditerranée, dans un ordre décroissant de dominance / diatomées – dinoflagellés – autres.

Pour ce qui concerne le phytoplancton susceptible de produire des toxines qui s'accumulent dans les coquillages mais pouvant également être nuisibles pour la faune marine pour certaines d'entre elles, et pour les masses d'eau côtières strictement : *Dinophysis*, produisant des toxines diarrhéiques, et *Alexandrium*, producteur de toxines paralysantes, sont observés tous les ans mais à des concentrations qui restent faibles ou très faibles ; *Pseudo-nitzschia*, dont certaines espèces produisent des toxines amnésiantes – il n'est pas possible actuellement de quantifier le pourcentage des espèces toxiques par rapport à celui des espèces non toxiques –, prolifère tous les ans, majoritairement entre avril et juin, sur toutes les zones de la région [2].

1.2. ZONE DU LARGE

1.2.1. Imagerie satellitaire

La figure 2 illustre un bloom de printemps dans la zone au large du golfe du Lion et de la Catalogne, zone de remontées cycloniques d'eau des couches profondes vers la surface suite à l'intense activité hydrodynamique de la zone en hiver [3]. L'effet conjoint des remontées d'eau plus riche en nutriments et de conditions de température et d'ensoleillement plus propices au printemps se traduit par des efflorescences de grande ampleur, bien que les concentrations restent modestes : de l'ordre de 3–4 mg·m^{-3}.

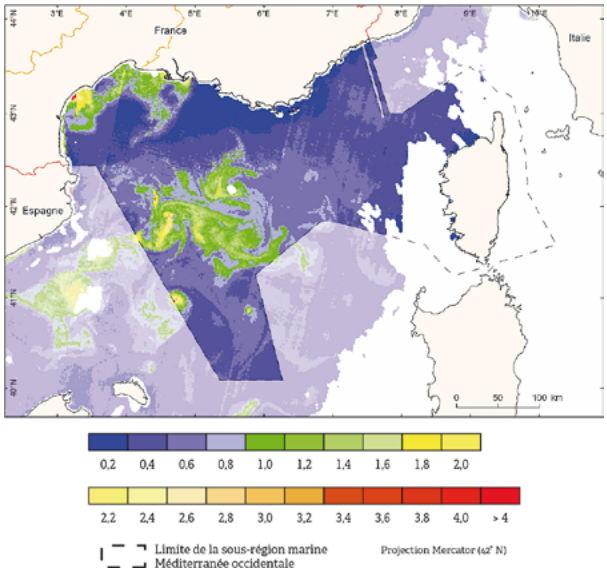

Figure 2 : Concentration en *chla* dérivée de l'image MERIS/*ENVISAT* du 14 avril 2009 (Sources : SHOM, IGN, ESRI, Ifremer).

L'aspect méthodologique est abordé plus en détail dans la contribution thématique « Répartition spatio-temporelle de la chlorophylle *a* ».

1.2.2. Modélisation écologique

1.2.2.1. Outils

Plusieurs études modélisant l'évolution des communautés phytoplanctoniques dans la zone du large existent à l'échelle de la sous-région marine. L'étude d'Herrmann [4] utilise un moteur hydrodynamique : le modèle SYMPHONIE développé au Pôle d'océanographie côtière du Laboratoire d'aérologie [5]. Ce modèle est couplé à une version modifiée et plus élaborée, Eco3M-MED, du modèle biogéochimique Eco3M [6]. Il prend en compte plusieurs éléments chimiques – carbone, azote, phosphore, silicium – et compartiments – trois types de phytoplancton (picophytoplancton, nanophytoplancton et diatomées), trois types de zooplancton, deux de détritus, les bactéries, la matière organique dissoute et les sels nutritifs. Quatorze simulations hydrodynamiques – sept pour la période actuelle et sept pour la fin du XXIe siècle – ont été réalisées en utilisant le modèle SYMPHONIE, forcé à la surface et aux frontières latérales par les résultats d'une simulation de grande échelle réalisée sur la période 1960–2100 [7]. Pour chaque période, actuelle et future, une simulation est réalisée pour une année « de référence » parmi les sept années. L'année 1967–1968 est utilisée pour la période actuelle et l'année 2074–2075 pour la période future.

D'autres modèles tridimensionnels ont été utilisés comme outils dans la sous-région marine. Les travaux de Pinazo *et al.* [8], du Laboratoire d'océanographie physique et biogéochimique (LOPB), ont permis, par exemple, d'implémenter dans le golfe du Lion un modèle couplé tridimensionnel fondé sur les cycles du carbone et de l'azote, modèle qui a permis de montrer l'influence de la circulation océanique induite par le vent sur la production primaire, en particulier lors des épisodes de remontée d'eau profonde. Les études de modélisation unidimensionnelle concernant le phytoplancton sont, quant à elles, presque toutes consacrées à l'étude du site Dyfamed (mer Ligure), situé sur la radiale Nice–Calvi [9] [10] [11].

1.2.2.2. Résultats

À partir du modèle utilisé par Herrmann [4] pour l'année 1967–1968, choisie comme période de référence actuelle, on peut en déduire qu'une efflorescence de faible intensité et transitoire est observée début novembre puisque la concentration en *chla* – picophytoplancton, nanophytoplancton et diatomées – dans la couche 0–200 m diminue progressivement jusqu'à mi-février, en raison de l'affaiblissement de l'intensité lumineuse et de l'approfondissement de la couche de mélange (figure 3).

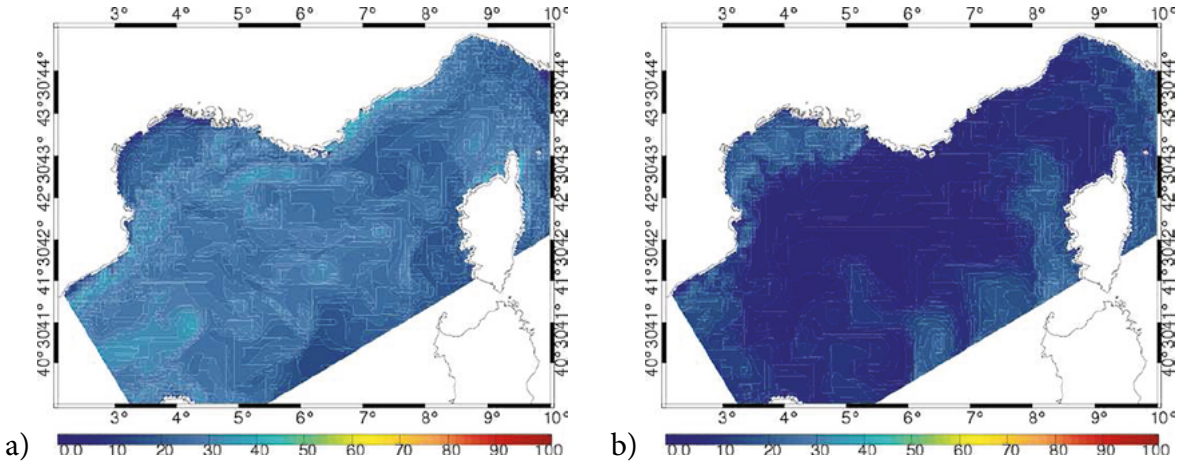

Figure 3 : Concentration intégrée sur les deux cents premiers mètres pour la *chla* (mg *chla*·m^{-2}) mi-novembre **(a)** et mi-février **(b)** (Sources : Herrmann, 2007 (4)).

Lors de la période de convection maximale (mi-février, mi-mars), les forts mouvements verticaux de la colonne d'eau empêchent le phytoplancton de se développer, malgré les fortes concentrations en nutriments. On observe alors au niveau de la zone de convection une zone de très faible concentration en *chla*. Puis la quantité de *chla* augmente progressivement en même temps que la température augmente et que la convection s'affaiblit, le phytoplancton se développant d'abord sur le plateau et en mer Ligure où la restratification a lieu plus tôt, puis dans la sous-région marine. On observe un premier maximum local début avril, dû aux fortes concentrations en nutriments sur le plateau, en mer Ligure et en mer Catalane. Mi-avril, la convection cesse, la restratification commence et la concentration en *chla* dans la couche 0–200 m augmente fortement. Le maximum absolu de concentration en *chla* est atteint mi-mai, avec des fortes concentrations observées dans la zone de convection hivernale et dans le panache du Rhône – de l'ordre de 1,3 mg *chla*·m^{-3} en surface et 70–90 mg *chla*·m^{-2} en intégrant la concentration sur 0–200 m (figure 4). Ce maximum de *chla* est associé à un maximum de surface de nanophytoplancton et de diatomées (figure 5).

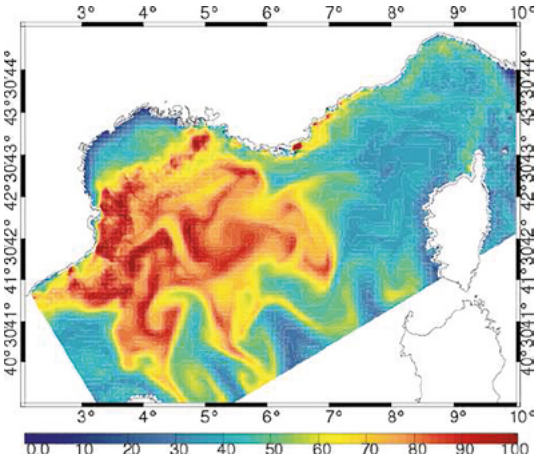

Figure 4 : Concentration intégrée sur les deux cents premiers mètres pour la *chla* (mg *chla*·m^{-3}) mi-mai (Sources : Herrmann, 2007 (4)).

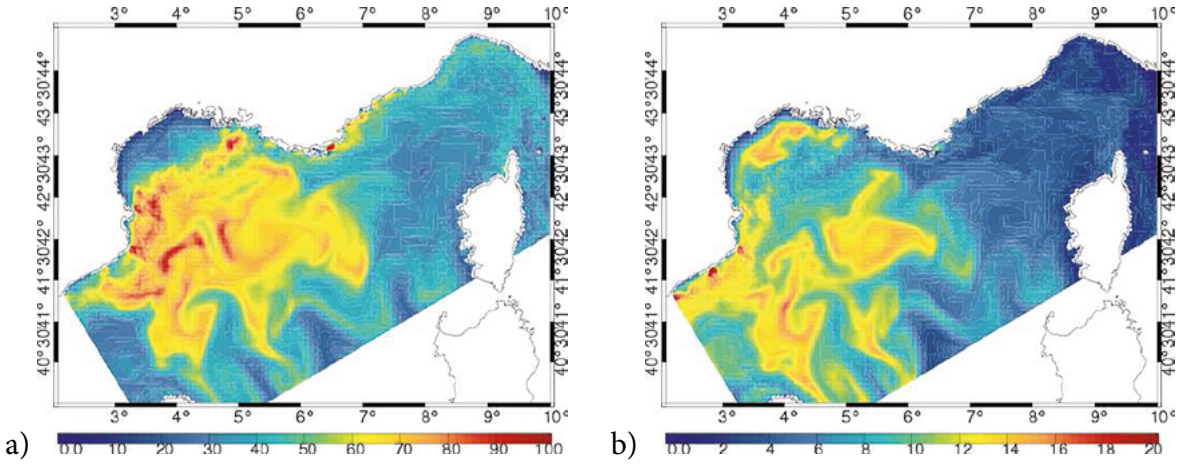

Figure 5 : Concentration intégrée sur les deux cents premiers mètres pour le nanophytoplancton (mg chla·m^{-2}) (a) et les diatomées (mg chla·m^{-2}) (b) mi-mai (Sources : Herrmann, 2007 (4)).

Toutefois, même si la majorité des résultats obtenus sont en accord avec les observations satellites analysées par Bosc *et al.* [12], l'efflorescence printanière apparaît plus tardivement – mi-mai ici contre mi-avril dans l'étude de Bosc *et al.* –, mais est par contre en accord avec les observations de Morel et André [13]. Ce phénomène est certainement dû à l'impact du changement climatique sur les communautés phytoplanctoniques [14] [15] [16].

On dispose cependant à l'heure actuelle de très peu d'informations concernant la modélisation de la production primaire et des communautés phytoplanctoniques pour les zones du large dans la sous-région marine.

1.2.3. Synthèse bibliographique

Les informations recueillies concernant les communautés phytoplanctoniques dans la zone du large proviennent principalement de la littérature. Il n'existe, à l'heure actuelle, pas de bases de données structurées à grande échelle.

La Méditerranée se caractérise principalement par de grandes variations de température et des mouvements de convection profonde qui jouent un rôle important sur les communautés phytoplanctoniques. En effet, la remontée des nutriments depuis les zones profondes de l'océan permet les épisodes d'efflorescences phytoplanctoniques printanières [4]. La circulation océanique et la présence du Rhône expliquent ainsi que le bassin nord-occidental soit l'une des zones les plus productives de la Méditerranée d'un point de vue biologique [4] [17] [18].

Les études menées par Sournia [19] puis par Morel et André [13], et ensuite par Bosc *et al.* [12] ont montré que l'écosystème pélagique planctonique est soumis à un cycle saisonnier marqué, avec un maximum de production primaire de décembre à mars et un minimum de juin à septembre, et à une forte variabilité interannuelle. Deux types de régimes trophiques se succèdent : en période hivernale, les mélanges verticaux dus aux vents entraînent l'installation d'un régime mésotrophe, caractérisé par des taux de production et de sédimentation élevés ; ce régime favorise les blooms de diatomées (microphytoplancton). En été, le régime devient oligotrophe dans les eaux du large, fortement stratifiées et caractérisées par de faibles taux de production primaire ainsi que par une dominance du pico- et du nanophytoplancton [20].

La comparaison des études de Morel et André et de Bosc *et al.*, séparées de vingt ans, révèle cependant la quasi-absence d'efflorescence automnale en 2004 [12], par opposition à celle étudiée en 1991 [13], la réduction de la surface de la zone de convection et le démarrage plus précoce de l'efflorescence printanière : avril en 2004 au lieu de mai en 1991. Ces changements semblent liés à l'affaiblissement de la circulation thermohaline ainsi qu'à une réduction de la convection profonde qui pourraient être provoqués par le changement climatique [4] [7] [14] [15]. De ce fait, la diminution des apports en nutriments dus à la convection profonde pourrait favoriser des espèces plus adaptées à un environnement oligotrophe telles que les dinoflagellés, le nano- et le picophytoplancton aux dépens des diatomées [10] [16].

1.2.3.1. Principaux sites étudiés

D'une manière générale, le phytoplancton se développe progressivement d'abord au niveau du golfe du Lion et en mer Ligure, où la restratification a lieu plus tôt, puis dans la sous-région marine avec un maximum de *chla* en avril [4] [12]. Dans la sous-région marine, il n'y a pas eu d'étude à grande échelle, seuls quelques sites ont été étudiés, donnant lieu à des modèles locaux.

1.2.3.1.1. Golfe du Lion : site SOFi (43° 04′ 00 N, 5° 07′ 60 E)

Localisé au large de Marseille au niveau de la rupture de pente du plateau continental à 162 m de profondeur, ce site est soumis à diverses influences océaniques, côtières et anthropiques – courant Nord-Méditerranéen, rejets fluviaux du Rhône – et est relativement accessible, ce qui en fait un site d'étude privilégié [20]. De manière générale, le nanophytoplancton domine, avec une abondance haute toute l'année et une concentration très importante à la fin du mois d'avril et en mai. Les comptages phytoplanctoniques ont montré que les diatomées représentent en moyenne sur l'année 51 % du microphytoplancton au maximum de *chla*. La contribution des diatomées à la production primaire annuelle est estimée entre 24 et 36 % [20]. Une forte concentration de diatomées, particulièrement adaptées aux conditions trophiques mésotrophes, est observée début mai sur le plateau du fait des importantes quantités de nitrates et de phosphates qui proviennent du Rhône [4]. On retrouve durant l'année et par ordre d'importance : *Leptocylindrus* sp., *Chaetoceros* sp., *Pseudo-nitzschia* sp. et *Rhizosolenia* sp. En juillet, avec les apports du Rhône, la communauté microphytoplanctonique est presque entièrement dominée par deux espèces de diatomées, *Leptocylindrus* sp. et *Pseudo-nitzschia seriata*. Les dinoflagellés, essentiellement représentés par *Gymnodinium* sp. et *Gyrodinium* sp., sont présents tout au long de l'année avec une abondance moyenne relative de 36 %. Les silicoflagellés (*Dictyocha* sp.) constituent le groupe le moins abondant [20].

1.2.3.1.2. Mer Ligure : site Dyfamed (43° 25′ N, 7° 52′ E)

Situé sur la radiale Nice–Calvi, ce site, typique du système méditerranéen, présente une faible biomasse phytoplanctonique, un maximum profond de *chla* – particularité de la floraison phytoplanctonique en milieu oligotrophe – localisé entre 50 et 110 m et une dominance des communautés pico- et nanophytoplanctoniques [20]. On observe en été un maximum de nanophytoplancton entre 40 et 80 m de profondeur, en accord avec la profondeur du maximum de *chla* observée à cet endroit par Marty *et al.* [10]. Le maximum de diatomées est légèrement plus profond : vers 80 m en août. Les diatomées sont adaptées à un éclairement plus faible, ce qui explique qu'on les retrouve en abondance à des profondeurs plus élevées. Cette répartition verticale des différents groupes phytoplanctoniques en été – picophytoplancton en surface, nanophytoplancton au niveau du maximum de *chla* et diatomées légèrement sous le maximum de *chla* – est en accord avec les observations faites en mer Ligure par Vidussi *et al.* [9].

Les observations de Marty *et al.* [10] et Vidussi *et al.* [9] ont permis de conclure que le nanophytoplancton atteignait en moyenne annuelle 45 % de la biomasse chlorophyllienne totale et au maximum 65 % au début de l'été. Les diatomées sont estimées à un peu plus de 30 % de la biomasse totale en mars-avril, 10 % en été. Enfin, la contribution du picophytoplancton est minimale en périodes hivernale et printanière, mais n'est jamais inférieure à 10 %, et elle atteint une valeur maximale d'environ 20 % en fin de période stratifiée (octobre).
L'étude menée sur cette zone lors de la campagne PROSOPE, en octobre 1999, estime de la même manière la contribution du nanophytoplancton à la biomasse autotrophe, mais le picophytoplancton est estimé à 40 % et le microphytoplancton (diatomées et dinoflagellées) à 13 % [20].

1.2.3.2. Lacunes et besoins d'informations supplémentaires

D'une manière générale, la structure des communautés phytoplanctoniques au large des côtes pour la sous-région marine est peu étudiée à grande échelle, et l'on retrouve principalement quelques études ponctuelles.

À l'échelle de la sous-région marine il existe relativement peu d'informations sur les efflorescences phytoplanctoniques automnales, certaines étant contradictoires, notamment sur la composition en termes d'abondance du nano- et du picophytoplancton. Enfin, il existe assez peu de données sur les périodes d'efflorescence du nano- et du picophytoplancton.

2. CONCLUSION

Les communautés phytoplanctoniques au large de la sous-région marine sont dominées tout au long de l'année par le nanophytoplancton. Toutefois, ce sont les diatomées – période d'efflorescence en avril – qui participent le plus largement à la production primaire annuelle. Il est cependant important de noter que peu de données sont disponibles pour cette sous-région et que seuls quelques sites ont été étudiés régulièrement. De même, il n'existe à l'heure actuelle aucune modélisation à grande échelle. Des études ont permis de faire le lien entre composition des communautés phytoplanctoniques et impact du changement climatique. Il semblerait en effet que la diminution des apports en nutriments du fait de la réduction de la convection profonde favorise le développement du pico- et du nanophytoplancton ainsi que des dinoflagellés au détriment des diatomées.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Soudant D. et Belin C., 2010. Évaluation DCE janvier 2010. Élément de qualité : phytoplancton. 01 2010 - R. INT.DIR/DYNECO/VIGIES/10-03/DS. 6 tomes, 572 p. http://wwz.ifremer.fr/envlit/documents/publications, rubrique Directive Cadre sur l'Eau (les 6 tomes). http://wwz.ifremer.fr/envlit/content/download/65766/466454/version/1/file/Phytoplancton_Jan_10_R_INT_DIR_DYNECO_VIGIES_10_03_DS.pdf (document principal).

[2] Belin C., Le Magueresse A. et Léopold T., 2010. Dossier ParamMaps « Le phytoplancton toxique sur le littoral français. Résultats du réseau de surveillance REPHY pour la période 2004-2008 ». Conception, coordination Ifremer : A. Le Magueresse. Conception graphique, traitement, développement, intégration : Des Mondes Singuliers, S. Langlois et M. Pirio.

[3] Herrmann M., Somot S., Sevault F. et Estournel C. et Déqué M., 2008. Modeling the deep convection in the Northwestern Mediterranean Sea using an eddy-permitting and an eddy-resolving model: case study of winter 1986-87. *J. Geophys. Res.*, VOL. 113, C04011.

[4] Herrmann M., 2007. Formation et devenir des masses d'eau en Méditerranée nord-occidentale, Influence sur l'écosystème planctonique pélagique, Variabilité interannuelle et changement climatique. Thèse Doct. « Océanographie », Univ. Toulouse, France : 1-310.

[5] Marsaleix P., Auclair F., Estournel C., 2009. Low-order pressure gradient schemes in sigma coordinate models: The seamount test revisited. Ocean Modelling, 30, 169-177. http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.06.011

[6] Baklouti M., Diaz F., Pinazo C., Faure V., Queguiner B., 2006. Investigation of mechanistic formulations depicting phytoplankton dynamics for models of marine pelagic ecosystems and description of a new model. *Progress in Oceanography*. 71, 1–33.

[7] Somot S., Sevault F., Déqué M., 2006. Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the 21st century using a high-resolution ocean circulation model. *Climate Dynamics,* Volume 27, Numbers 7- 8, December, 2006, pp. 851-879, DOI :10.1007/s00382-006-0167-z.

[8] Pinazo C., Marsaleix P., Millet B., Estournel C., 1996. Response of phytoplankton to wind forcing, unsteady in intensity and duration: numerical modelling of upwelling areas of the Gulf of Lions (Mediterranean Sea). C. R. Acad. Sci., *Sciences de la vie*, 319 : 639-646.

[9] Vidussi F., Marty J.-C. et Chiavérini J., 2000. Short-term evolution of phytoplankton pigment distributions during the transition from spring bloom to oligotrophy in the Mediterranean Sea. *Deep-Sea Res*. I, 47, 423-445.

[10] Marty J.C., Chiavérini J., Pizay M.D., Avril B., 2002. Seasonal and interannual dynamics of phytoplankton pigments in the Western Mediterranean sea at the DYFAMED timeseries station (1991-1999). *Deep-Sea Res*. II 49 (11), 1965-1985.

[11] Marty J.C., Chiavérini J., 2002. Seasonal and interannual variations in phytoplankton production at DYFAMED time-series station, North-western Mediterranean sea. *Deep-Sea Res*. II 49 (11), 2017-2030.

[12] Bosc E., Bricaud A., Antoine D., 2004. Seasonal and interannual variability in algal biomass and primary production in the Mediterranean Sea, as derived from four years of SeaWiFS observations. *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB1005, 10.1029/2003GB002034.

[13] Morel A., André J.M., 1991. Pigment distribution and primary production in the western mediterranean as derived and modeled from coastal zone color scanner observations, *Journal of Geophysical research*, 96, 12,685-12,698.

[14] Thorpe R.B., Bigg G.R., 2000. Modelling the sensitivity of Mediterranean Outflow to anthropogenically forced climate change. Climate Dynamics 16, 355–368.

[15] Bozec Y., Thomas H., Schiettecatte L.-S., Borges A.V., Elkalay K. et de Baar H.J.W., 2006. Assessment of the processes controlling the seasonal variations of dissolved inorganic carbon in the North Sea. *Limnology and Oceanography, 51(6), 2746-2762*.

[16] Béthoux J.-P., Morin P. et Ruiz-Pino D., 2002b. Temporal tends in nutrient ratios : chemical evidence of Mediterranean ecosystem changes driven by human activity, *Deep-Sea Res*., Part II, 49, 2007–2016.

[17] Bethoux J.P., 1981. Phosphorus and nitrogen in the Mediterranean Sea, budgets and potential fertility. *Mar. Chem*., 10: 141-158.

[18] Dugdale R.C., Wilkerson F.P., 1988. Nutrient sources and primary production in the Eastern Mediterranean. *Oceanologia Acta* Spec: 179-184.

[19] Sournia A., 1973. La production primaire planctonique en Méditerranée. Essai de mise à jour. Bull. Etude Comm. Méditerr., Num. Spéc. 5 : 1-128 + tabl.

[20] Leblanc K., 2002. Variabilité spatiale et temporelle du cycle du silicium dans divers milieux oligotrophes et mésotrophes. PhD Thesis, université d'Aix-Marseille II, 1-292.