



Changement climatique et milieu marin en Corse

Report Card 2018

B2-Lagunes côtières

Lagunes côtières, baies semi-fermées et prolifération de micro-algues nuisibles en Corse

Marie Garrido – Docteur⁽¹⁾

Vanina Pasqualini – Professeur⁽²⁾

⁽¹⁾Office de l'Environnement de la Corse, 14 avenue Jean Nicoli - BP 52 - 20250 Corte, France

⁽²⁾Université de Corse Pascal Paoli, 7 avenue Jean Nicoli - BP 52 - 20250 Corte, France

1 - État des connaissances sur les effets du changement climatique sur la prolifération de micro-algues nuisibles

Contexte des zones côtières en Méditerranée

La Méditerranée a déjà connu de grands changements climatiques par le passé (Luterbacher *et al.*, 2006) et est identifiée comme l'un des plus cruciaux « hotspots » dans les projections futures en lien avec le changement climatique (Giorgi, 2006 ; Lejeusne *et al.*, 2010). Le littoral méditerranéen se distingue par une forte urbanisation côtière et par une géomorphologie complexe, dont les caractéristiques les plus importantes sont : les îles (42% du littoral), les golfs semi-fermés et les milieux lagunaires. Les écosystèmes marins côtiers et lagunaires subissent de plein fouet les perturbations environnementales actuelles liées aux activités anthropiques et aux changements climatiques. Les effets de ses bouleversements se caractérisent par une augmentation de la température de l'eau, associée à une augmentation des épisodes de climat extrême (Spyropoulou *et al.*, 2013), mais également à une acidification de l'eau (Orr, 2005). Cependant encore peu d'informations sont disponibles sur les capacités d'adaptation des organismes marins (plus particulièrement des organismes planctoniques ; Lohbeck *et al.*, 2012 ; Maugendre *et al.*, 2017) et des écosystèmes face à cette problématique.

Les zones côtières sont souvent influencées par les bassins hydrographiques adjacents et par des charges provenant de diverses sources anthropiques (Arhonditsis *et al.*, 2002). En raison de ces caractéristiques, les socio-écosystèmes méditerranéens des zones côtières se révèlent particulièrement vulnérables aux changements climatiques. Ces changements affectent l'utilisation des terres, les ressources en eau, les temps de renouvellement des eaux, la circulation hydrologique, la teneur en sel et le chargement en nutriment et en sédiment. Ils influencent ainsi le fonctionnement des écosystèmes, y compris la biodiversité et la structure des communautés, le transfert d'énergie vers des niveaux trophiques supérieurs, la séquestration du carbone et ont une incidence particulière sur la prolifération des algues (Hays *et al.*, 2005 ; Hallegraeff, 2010 ; Roelke *et al.*, 2012).

Phytoplancton et HABs : vue synoptique

Parmi les êtres vivants sur notre planète, un grand nombre passe totalement inaperçu : c'est le cas des micro-algues ou phytoplancton. Pour cause, la taille des organismes qui le composent varie entre 0.002 mm et 1 mm. Assimilé au monde végétal aquatique, l'originalité de ces micro-algues n'est pas seulement due à une constitution unicellulaire ou limitée à un nombre réduit de cellules, mais également aux statuts trophiques variés : autotrophie, hétérotrophie ou mixotrophie. Le phytoplancton représente 1 à 2% du carbone végétal total sur Terre et est à l'origine de plus de 45% de la production primaire nette sur notre planète (Field *et al.*, 1998).

La croissance du phytoplancton est limitée par différents facteurs (Cloern, 1999). En effet, selon l'échelle de temps des variations physico-chimiques, le phytoplancton s'adapte par des modifications des communautés ou diverses adaptations physiologiques. Des efflorescences (bloom ou proliférations massives phytoplanctoniques) peuvent se produire lorsque les conditions environnementales sont favorables (e.g. température, luminosité, nutriments ; Smayda, 1997a) et provoquer une dégradation des écosystèmes. Les dommages causés aux écosystèmes peuvent inclure, par exemple, la perturbation des réseaux alimentaires, la destruction des poissons par les dommages causés par les branchies ou produire des zones à faible niveau d'oxygène après la dégradation du bloom (Graneli et Turner, 2006). Parfois, ces efflorescences peuvent être associées à des organismes producteurs de toxines (Paerl, 1988) et sont connues sous le terme de proliférations d'algues nuisibles ou Harmful Algal Blooms en anglais (HAB ; Smayda, 1997b). Ce sont des phénomènes sporadiques dont la fréquence et l'intensité semblent être en augmentation depuis quelques décennies. Ces HABs connaissent une expansion inquiétante notamment dans les zones côtières à travers le monde (Smayda, 1997b; Hallegraeff, 2010 ; Kudela *et al.*, 2015). La communauté scientifique internationale s'accorde à dire que cette

augmentation est directement en relation avec les changements climatiques et il est concevable de considérer que ces proliférations vont continuer à s'accroître (Wells *et al.*, 2015).

Toutefois, les connaissances actuelles montrent que seulement 5% des espèces phytoplanctoniques sont capables de produire des toxines (Zingone et Enevoldsen, 2000) et 75% d'entre elles, sont représentées par des dinophycées (Smayda, 1997b). Leur toxicité a été démontrée vis-à-vis notamment des organismes aquatiques, dont le zooplancton et les poissons et de l'homme (Ferrante *et al.*, 2013).

2 - Qu'est-ce qui se passe déjà ?

Causes des HABs

Les changements climatiques affectent particulièrement la température de l'eau, la stratification et l'acidification des mers et océans, la pénétration de la lumière et les apports en nutriments (Fig. 1 ; Wells *et al.*, 2015). La modification de ces paramètres environnementaux impacte directement les processus physiologiques des micro-algues, mais également leur phénologie, leur prédation et leur biogéographie (Fig. 1). Des perturbations dans la dynamique des populations et la sélection des espèces de micro-algues sont alors observées à un niveau régional favorisant le développement d'efflorescences spécifiques. L'absence de connaissance fondamentale précise sur les mécanismes qui provoquent ces proliférations frustre actuellement l'espoir de prévoir leur prévalence future (Wells *et al.*, 2015). L'analyse rétrospective sur le long terme de l'évolution des micro-algues est particulièrement importante dans l'optique de comprendre l'impact des changements climatiques sur ces communautés (Wells *et al.*, 2015).

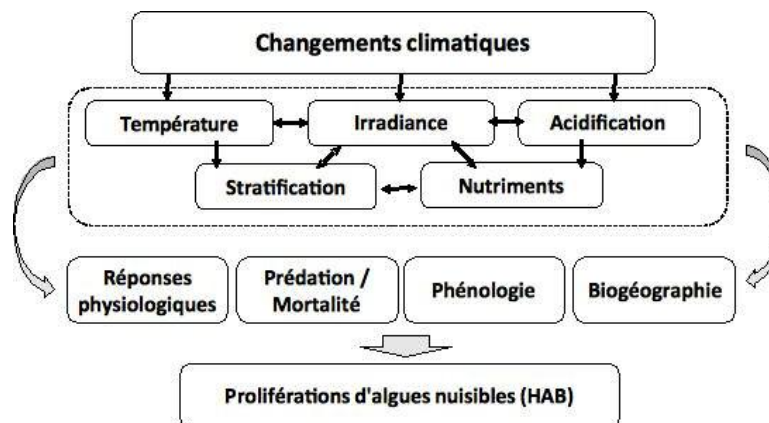


Figure 1. Impact du changement climatique sur les paramètres environnementaux et les interactions avec les proliférations d'algues nuisibles (d'après Wells *et al.*, 2015).

Écosystème marin côtier versus écosystème lagunaire

En mer ouverte, l'augmentation de la température générée par les changements climatiques devrait conduire à une stratification accrue de la surface, à une diminution plus rapide des nutriments de surface et à une diminution de la reconstitution des eaux riches en nutriments (Hallegraeff, 2010). Cela entraînera à son tour des changements dans la sélection des communautés phytoplanctoniques, avec un développement important de nano- et de picophytoplanctons (plus aptes à faire face aux faibles niveaux en nutriments ; e.g. dinophycées, cyanobactéries). L'augmentation de la température de l'eau aura pour conséquence le déclin des concentrations de silice en Méditerranée (Goffart *et al.*, 2002), ce qui devrait limiter l'abondance des diatomées. La profondeur de mélange affecte la température de la surface de l'eau, l'apport de lumière (par le haut), les éléments nutritifs (par le bas) et les pertes de phytoplancton dans la couche superficielle. En Corse, seuls les travaux disponibles de Goffart *et al.* (2002 ; 2015) dans la baie de Calvi montrent l'influence du vent durant la période hivernale sur la disponibilité en nutriment dans la colonne d'eau et donc sur le développement annuel des communautés phytoplanctoniques. Sur le même secteur, les expérimentations réalisées par Maugendre *et al.* (2017) concernant l'influence de l'acidification d'une mer oligotrophe n'a montré aucun effet détectable sur le métabolisme du plancton, mais ce paramètre reste essentiel dans l'évolution des efflorescences de micro-algues nuisibles (Wells *et al.*, 2015).

En milieu côtier semi-fermé ou en lagune, les systèmes fonctionnent différemment en agissant comme des zones tampons entre terre et mer ouverte et en conservant les nutriments issus des bassins versants, accentués par les activités humaines (Arhonditsis *et al.*, 2000 ; Spatharis *et al.*, 2012 ; Spyropoulou *et al.*, 2013). Ces systèmes sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques, notamment avec l'augmentation

des épisodes de climat extrême, tels que les fortes précipitations (Garrido *et al.*, 2016). Fouilland *et al.* (2017) montrent qu'après les intrants d'eau douce dans une lagune, il y a une émergence rapide d'espèces phytoplanctoniques potentiellement toxiques pour les organismes vivants. L'alternance de période de précipitations et de sécheresse modifient largement la salinité des eaux en milieu côtier semi-fermé ou en lagune, ce qui entraîne une sélection des espèces phytoplanctoniques nuisibles et une perturbation de l'écosystème (Hallegraeff, 2010 ; Laabir *et al.*, 2011 ; Wells *et al.*, 2015 ; Garrido *et al.*, 2016).

Taxons concernés par les proliférations de micro-algues nuisibles en Méditerranée et en Corse

Les taxons concernés par les proliférations de micro-algues nuisibles incluent les dinophycées, les diatomées, les cyanobactéries, mais également les haptophytes ou les raphidophytes (Hallegraeff, 2010).

Les dinophycées

En Méditerranée, de nombreux épisodes de proliférations de micro-algues nuisibles ont d'ores et déjà été répertoriés depuis les années 1960 (Ferrante *et al.*, 2013). Les efflorescences de dinophycées ont été particulièrement nombreuses en raison de leurs taux de croissance très rapides sous conditions favorables. Le développement de ces espèces est avantaagé par les variations des concentrations en nutriments, notamment dans les eaux peu profondes (Figueras *et al.*, 2006). L'augmentation de la température et de la lumière favorisent également la germination des cystes présents dans les sédiments, qui peuvent être remis en suspension dans la colonne d'eau sous l'effet des vents (Perez *et al.*, 1998 ; Genovesi *et al.*, 2009 ; Laanaia *et al.*, 2013 ; Dhib *et al.*, 2016). Une autre particularité des dinophycées est qu'ils peuvent être autotrophes, hétérotrophes exclusifs ou mixotrophes en fonction des conditions environnementales (Stoecker *et al.*, 1997 ; Cecchi *et al.*, 2016). Certains mêmes sont capables d'assimiler directement la matière organique dissoute par osmotrophie. Ces fortes capacités d'adaptation aux contraintes environnementales changeantes confèrent aux dinophycées une place privilégiée face aux changements climatiques.

Au cours de ces dernières années, des efflorescences nocives du genre *Alexandrium* ont été répertorié à plusieurs reprises le long des côtes méditerranéennes (Montresor *et al.*, 1990 ; Honsell *et al.*, 1992 ; Lilly *et al.*, 2002 ; Basterretxea *et al.*, 2005 ; Vila *et al.*, 2005 ; Spatharis *et al.*, 2007) et même sur les côtes de Sardaigne (Lugliè *et al.*, 2003 ; Bazzoni *et al.*, 2013). Le genre *Alexandrium* est particulièrement nuisible en raison de la capacité de certaines espèces à produire des toxines (agents responsables de l'intoxication paralysante par la consommation des fruits de mer ; PSP pour Paralytic Shellfish Poisoning; Lilly *et al.*, 2002). Les milieux lagunaires présentent fréquemment les conditions favorables au développement d'efflorescences d'*Alexandrium* sp., comme c'est le cas dans la lagune de Thau en France (Collos *et al.*, 2009 ; Laanaia *et al.*, 2013) ou encore dans la lagune de Bizerte en Tunisie (Smida *et al.*, 2012).

En Corse, seule l'espèce *Alexandrium catenella* a formé des blooms toxiques dans la lagune de Diana (Base de données Quadrige, Ifremer). Le genre *Alexandrium* n'a jamais été observé sous forme de bloom en mer, mais il a été observé à de nombreuses reprises dans les lagunes de Biguglia, Diana et Urbino (Base de données Quadrige, Ifremer ; Lafabrie *et al.*, 2013 ; Garrido *et al.*, 2014 ; Garrido *et al.*, 2016).

De nombreux épisodes de proliférations nocives du genre *Ostreopsis* ont été rapportés à plusieurs reprises sur l'ensemble du bassin méditerranéen (Vila *et al.*, 2001 ; Penna *et al.*, 2005 ; Turki, 2005 ; Aligizaki et Nikolaidis 2006 ; Zingone *et al.*, 2006 ; Guerrini *et al.*, 2010 ; Totti *et al.*, 2010 ; Cohu *et al.*, 2011 ; Mangialajo *et al.*, 2011 ; 2017). Les premières observations d'*Ostreopsis* ont été identifiées dans la baie de Villefranche-sur-Mer (Sud de la France) en 1972 (Taylor, 1979), mais les premiers blooms de l'espèce *Ostreopsis ovata* sont observés en 1998 en Toscane (Italie ; Sansoni *et al.*, 2003). Ce dinophycée benthique se développe dans des eaux peu profondes sur des substrats durs ou sur des macrophytes. Sous actions mécaniques, elles peuvent être remises en suspension dans la colonne d'eau et formées des agrégats mucilagineux à la surface de l'eau, qui peuvent être transportés par les aérosols marins (Totti *et al.*, 2010 ; Walsh *et al.*, 2017). La présence de toxines est responsable de la toxicité d'*Ostreopsis ovata* et peut causer la mort des organismes benthiques et avoir des effets dangereux pour la santé humaine, mais également pour les activités commerciales (Berdalet *et al.*, 2017 ; Walsh *et al.*, 2017). Les intoxications humaines sont caractérisées par des irritations des voies aériennes respiratoires, de la toux, des essoufflements, des douleurs musculaires, des fièvres et des irritations des muqueuses. Les conditions environnementales requises pour l'émergence d'un bloom d'*Ostreopsis ovata* ne sont pas encore bien définies et semblent très complexes (Cohu *et al.*, 2011).

En Corse, *Ostreopsis* sp. a largement été recensé sur l'ensemble des côtes de Corse avec des efflorescences importantes en période estivale (Blanfuné *et al.*, 2015)

Le genre *Prorocentrum* et particulièrement l'espèce *Prorocentrum minimum* a également fait l'objet de nombreuses observations sous forme d'efflorescences toxiques en Méditerranée que ce soit en lagune, mais également en mer semi-fermée (Heil *et al.*, 2005 ; Aligizaki *et al.*, 2009 ; Ferrante *et al.*, 2013 ; Dugenne *et al.*, 2014 ; Garrido *et al.*, 2016). La répartition géographique de *Prorocentrum minimum* a subi une expansion géographique au cours des dernières décennies et son extension est très large, des mers tempérées aux mers subtropicales (Heil *et al.*, 2005). En raison de la présence d'un composant neurotoxique hydrosoluble, cette espèce présente un risque pour l'homme par intoxication de coquillages et pour l'écosystème avec la mortalité des poissons et de la faune benthique (liée aux effets des toxines, mais également au faible taux d'oxygène engendré (Heil *et al.*, 2005). Les efflorescences se produisent généralement dans des conditions de températures élevées, de fortes irradiations et de salinités faibles à modérées, associées à une eutrophisation côtière croissante. La flexibilité physiologique de *Prorocentrum minimum* (mixotrophe ; Cecchi *et al.*, 2016) en réponse à des paramètres environnementaux changeants suggère que les efflorescences seront certainement croissantes face à l'évolution des changements climatiques, notamment en milieu lagunaire ou en mer semi-fermée.

En Corse, le genre *Prorocentrum* a été identifié en mer et en lagune (Lafabrie *et al.*, 2013 ; Garrido *et al.*, 2014), mais l'espèce *Prorocentrum minimum* a été observée sous forme d'efflorescence dans la lagune de Biguglia (Garrido *et al.*, 2016). Ces efflorescences ont engendré une perturbation au niveau de la chaîne trophique de l'écosystème (Cecchi *et al.*, 2016).

D'autres genres appartenant à la classe des dinophycées ont déjà fait l'objet d'efflorescences nocives en Méditerranée, par exemple : *Dynophysis*, *Gambierdiscus*, *Gymnodinium*, *Gyrodinium*, *Karenia*, *Karlodinium*, *Sinophysis* (Aligizaki et Nikolaidis, 2008 ; Ferrante *et al.*, 2013 ; Bazzoni *et al.*, 2015 ; Guallar *et al.*, 2016). Tous ces genres ont été observés en Corse aussi bien en milieu lagunaire qu'en milieu marin côtier (Base de données Quadrige, Ifremer ; Garrido *et al.*, 2014 ; Garrido *et al.*, 2016) et ont même déjà été observés sous forme d'efflorescences comme par exemple : *Dynophysis* sp., *Karenia mikimotoi* (1994 ; Base de données Quadrige, Ifremer) et *Karlodinium* sp. (Nezan *et al.*, 2014) dans l'étang de Diana. *Gymnodinium catenatum*, espèce exotique envahissante toxique, a été recensé à plusieurs reprises sur le littoral corse et a formé un bloom toxique en 2008 dans la lagune de Diana (plus de 6 millions de cellules par litre ; Base de données Quadrige, Ifremer).

Les diatomées

Des proliférations nocives de diatomées ont déjà été observées en Méditerranée, comme le genre *Pseudo-nitzschia* (Collos *et al.*, 2009 ; Ferrante *et al.*, 2013 ; Bazzoni *et al.*, 2015 ; Guallar *et al.*, 2016). Certaines espèces de ce genre produisent des neurotoxines, responsable d'intoxications alimentaires (Amnesic Shellfish Poisoning ; Zingone et Enevoldsen, 2000). La prolifération d'autres diatomées, même si elles ne sont pas toxiques, peut être responsable de mortalité élevée chez les organismes marins en consommant tout l'oxygène du milieu et surtout, à la fin du bloom, par l'accumulation et la décomposition de leur matière organique qui provoque une désoxygénation des eaux (Hallegraeff, 2010).

En Corse, de nombreuses diatomées sont identifiées en mer et en lagune (e.g. *Pseudo-nitzschia*, *Guinardia*, *Leptocylindrus*, *Nitzschia*, *Rhizosolenia*, *Thalassionema nitzschioides*, *Skeletonema costatum* ; Tolomio, 2011 ; Garrido *et al.*, 2014 ; Garrido *et al.*, 2016). Seules deux espèces appartenant au genre *Pseudo-nitzschia* possédant des substances toxiques (Amnesic Shellfish Poisoning) ont formé des efflorescences nuisibles en milieu lagunaire (Étang d'Urbino) : *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *Pseudo-nitzschia seriata* (Base de données Quadrige, Ifremer).

Les cyanobactéries De nombreux genres de cyanobactéries font également l'objet de plusieurs proliférations nocives en Méditerranée : *Synechococcus*, *Prochlorococcus*, *Microcystis*. Une quarantaine d'espèces de cyanobactéries connues sécrètent ou contiennent des cyanotoxines qui sont généralement des neurotoxines pouvant causer la mort chez divers animaux, dont l'homme.

En Corse, les efflorescences toxiques liées aux cyanobactéries sont plus généralement observées en eau douce (e.g. barrage de Codole), causant des problèmes dans la distribution d'eau potable. En 2007, une crise dystrophique s'est produite dans la lagune de Biguglia, marquée par un développement massif d'*Anabaenopsis circularis* (plus de 6 millions de cellules par litre ; espèce toxique ; Garrido *et al.*, 2016). C'est le seul bloom cyanobactérien toxique recensé en milieu côtier.

3 - Qu'est ce qui pourrait arriver dans l'avenir ?

L'impact du changement climatique

Compte tenu de l'évolution des changements climatiques et de leurs effets déjà connus sur les efflorescences de micro-algues nuisibles à travers le monde et en Méditerranée, il est possible de penser que leurs fréquences vont augmenter dans l'avenir en Corse. L'absence de connaissance fondamentale précise sur les mécanismes qui provoquent ces proliférations frustre actuellement l'espoir de prévoir leur prévalence future. Même si le nombre de travaux réalisés sur les communautés phytoplanctoniques en Corse est relativement faible, les observations déjà réalisées sur certaines espèces responsables des efflorescences de micro-algues nuisibles sur le littoral laissent penser que cette région sera très sensible aux changements climatiques.

L'augmentation des efflorescences nuisibles auront des répercussions négatives sur les écosystèmes (par exemple en perturbant l'ensemble de la chaîne alimentaire), ce qui met en péril les services écosystémiques et réduit les aménités environnementales. Derrière le terme de Harmful Algal Blooms, un ensemble de phénomènes liés au développement de micro-algues a pour conséquence des effets négatifs direct ou indirect sur l'homme. Nous pouvons citer :

- les mortalités massives d'organismes marins d'origine naturelle ou d'élevage (causées par exemple par la production d'ichtyotoxines et/ou par le développement d'épisodes anoxiques),
- l'accumulation de phycotoxines dans les produits de la mer à destination commerciale, la production d'aérosols toxiques ou responsables d'irritations cutanées ou des voies respiratoires,
- la réduction de l'attractivité des zones touristiques suite à la prolifération massive de micro-algues.

L'ensemble de ces phénomènes touche donc de nombreux secteurs, à la fois de santé publique et d'exploitations touristique et conchylicole. Les conséquences économiques seront notables, notamment sur une île comme la Corse où le tourisme tient une place prépondérante.

Recommandations

Il existe un manque crucial de connaissances fondamentales précises sur les mécanismes qui provoquent les proliférations de micro-algues nuisibles à un niveau régional. Des travaux de recherche en ce sens sont primordiaux. De plus, un suivi périodique et spatial des communautés phytoplanctoniques apparaît indispensable sur le long terme en Corse, que ce soit en milieu marin côtier ou lagunaire, en ciblant certaines espèces nuisibles, afin de prévenir des risques potentiels.

4 - Références bibliographiques

- Aligizaki K., Nikolaidis G., 2006. The presence of the potentially toxic genera *Ostreopsis* and *Coolia* (Dinophyceae) in the North Aegean Sea, Greece. *Harmful Algae*, 5: 717–730.
- Aligizaki K., Nikolaidis G., 2008. Morphological identification of two tropical dinoflagellates of the genera *Gambierdiscus* and *Sinophysis* in the Mediterranean Sea. *Journal of Biology Research*, 9: 75-82.
- Aligizaki K., Nikolaidis G., Katikou P., Baxevanis A.D., Abatzopoulos T.J., 2009. Potentially toxic epiphytic *Proocentrum* (Dinophyceae) species in Greek coastal waters. *Harmful Algae*, 8(2): 299–311.
- Arhonditsis, G., G. Tsirtsis & M. Karydis, 2002. The effects of episodic rainfall events to the dynamics of coastal marine ecosystems: applications to a semi-enclosed gulf in the Mediterranean Sea. *Journal of Marine System*, 35: 183–205.
- Basterretxea G., Garcés E., Jordi A., Maso M., Tintoré J. 2005. Breeze conditions as a favoring mechanism of *Alexandrium taylori* blooms at a Mediterranean beach, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 62: 1–12.
- Bazzoni A.M., Caddeo T., Pulina S., Padedda B.M., Satta C.T., Sechi N., Lugliè A., 2015. Spatial distribution and multiannual trends of potentially toxic microalgae in shellfish farms along the Sardinian coast (NW Mediterranean Sea). *Environ Monit Assess*, 187 : 86.
- Blanfuné A., Boudouresque C.F., Grosseil H., Thibaut T., 2015. Distribution and abundance of *Ostreopsis* spp. and associated species (Dinophyceae) in the northwestern Mediterranean: the region and the macroalgal substrate matter. *Environ Sci Pollut Res*, 22 : 12332–12346.
- Cecchi P., Garrido M., Collos Y., Pasqualini V., 2016. Water flux management and phytoplankton communities in a Mediterranean coastal lagoon. Part II: Mixotrophy of dinoflagellates as an adaptive strategy? *Marine Pollution Bulletin*, 108: 120–133.
- Cloern J.E., 1999. The relative importance of light and nutrient limitation of phytoplankton growth: a simple index of coastal ecosystem sensitivity to nutrient enrichment. *Aquatic Ecology*, 33: 3-16.
- Cohu S., Thibaut T., Mangialajo L., Labat J.P., Passafiume O., Blanfuné A., Simon N., Cottalorda J.M., Lemée R., 2011. Occurrence of the toxic dinoflagellate *Ostreopsis* cf. *ovata* in relation with environmental factors in Monaco (NW Mediterranean). *Marine Pollution Bulletin*, 62 : 2681– 2691.

- Collos Y., Bec B., Jauzein C., Abadie E., Laugier T., Lautier J., Pastoureaud A., Souchu P., Vaquer A., 2009. Oligotrophication and emergence of picocyanobacteria and a toxic dinoflagellate in Thau lagoon, southern France. *Journal of Sea Research*, 61: 68–75.
- Dhib A., Fertouna-Bellakhal M., Turki S., Aleya L., 2016. Driving factors of dinoflagellate cyst distribution in surface sediments of a Mediterranean lagoon with limited access to the sea. *Marine Pollution Bulletin*, 112: 303–312.
- Dugenne M., Thyssen M., Nerini D., Mante C., Poggiale J.C., Garcia N., Garcia F., Grégori G.J., 2014. Consequence of a sudden wind event on the dynamics of a coastal phytoplankton community: an insight into specific population growth rates using a single cell high frequency approach. *Front. Microbiol.*, 5: 485.
- Berdalet E., Tester P.A., Chinain M., Fraga S., Lemée R., Litaker W., Penna A., Usup G., Vila M., Zingone A., 2017. Harmful algal blooms in benthic systems: Recent progress and future research. *Oceanography*, 30(1): 36–45.
- Ferrante M., Sciacca S., Fallico R., Fiore M., Conti G.O., Ledda C., 2013. Harmful Algal Blooms in the Mediterranean Sea: Effects on Human Health. *Scientific reports*, 2: 587.
- Field C.B., Behrenfeld M.J., Randerson J.T., Falkowski P., 1998. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281: 237-240.
- Figueras F.G., Pitcher G.C., Estrada M., 2006. Harmful algal bloom dynamics in relation to physical processes. In: Granéli, E.; Turner, J.T., editors. *Ecology of Harmful Algae*. Springer-Verlag; Berlin, p. 127-138.
- Fouilland E., Trottet A., Alves-de-Souza C., Bonnet D., Bouvier T., Bouvy M., Boyer S., Guillou L., Hatey E., Jing H., Leboulanger C., Le Floc'h E., Liu H., Mas S., Mostajir B., Nougulier J., Pecqueur D., Rochelle-Newall E., Roques C., Salles C., Tournoud M.G., Vasseur C., Vidussi F., 2017. Significant change in marine plankton structure and carbon production after the addition of river water in a mesocosm experiment. *Microb. Ecol.*, 74 : 289–301.
- Garrido M. Cecchi P., Collos Y., Agostini S., Pasqualini V., 2016. Water flux management and phytoplankton communities in a Mediterranean coastal lagoon. Part I: How to promote dinoflagellate dominance? *Marine Pollution Bulletin*, 104: 139–152.
- Garrido M., Koeck B., Goffart A., Collignon A., Hecq J. H., Agostini S., Marchand B., Lejeune P., Pasqualini V., 2014. Contrasting patterns of phytoplankton assemblages in two coastal ecosystems in relation to environmental factors (Corsica, NW Mediterranean Sea). *Diversity*, 6: 296-322.
- Genovesi B., Laabir M., Masseret E., Collos Y., Vaquer A., Grzebyk D., 2009. Dormancy and germination features in resting cysts of *Alexandrium tamarense* species complex (Dinophyceae) can facilitate bloom formation in a shallow lagoon (Thau, southern France). *Journal of Plankton Research*, 31: 1209–1224.
- Giorgi F., 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33: 4.
- Goffart A., Hecq J.-H., Legendre L., 2002. Changes in the development of the winter–spring phytoplankton bloom in the Bay of Calvi (NW Mediterranean) over the last two decades: a response to changing climate? *Marine Ecology Progress Series*, 236: 45–60.
- Goffart A., Hecq J.-H., Legendre L., 2015. Drivers of the winter–spring phytoplankton bloom in a pristine NW Mediterranean site, the Bay of Calvi (Corsica): A long-term study (1979–2011). *Progress in Oceanography*, 137: 121–139.
- Graneli E., Turner J.T., 2006. *Ecology of Harmful Algae*. Springer, Berlin.
- Guallar C., Delgado M., Diogène J., Fernández-Tejedor M., 2016. Artificial neural network approach to population dynamics of harmful algal blooms in Alfacs Bay (NW Mediterranean): Case studies of *Karlodinium* and *Pseudo-nitzschia*. *Ecological Modelling*, 338: 37–50.
- Guerrini F., Pezzolesi L., Feller A., Riccardi M., Ciminiello P., Dell'Aversano C., Tartaglione L., Iacovo E.D., Fattorusso E., Forino M., Pistocchi R., 2010. Comparative growth and toxin profile of cultured *Ostreopsis ovata* from the Tyrrhenian and Adriatic Seas. *Toxicon*, 55: 211–220.
- Hallegraeff G.M., 2010. Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: a formidable predictive challenge. *Journal of Phycology*, 46: 220–235.
- Hays G.C., Richardson A.J., Robinson C., 2005. Climate change and plankton. *Trends in Ecology and Evolution*, 20: 337–344.
- Heil C.A., Glibert P.M., Fan C., 2005. *Prorocentrum minimum* (Pavillard) Schiller: a review of a harmful algal bloom species of growing worldwide importance. *Harmful Algae* 4: 449–470.
- Honsell G., Boni L., Cabrini M., Pompei M., 1992. Toxic or potentially toxic dinoflagellates from the Northern Adriatic Sea, in: R.A. Vollenweider, R. Marchetti, R. Viviani (Eds.), *Marine Coastal Eutrophication*, Elsevier, Amsterdam, pp. 107–114.

- Kudela R. M., Berdalet E., Bernard S., Burford M., Fernand L., Lu S., Roy S., Tester P., Usup G., Magnien R., Anderson D.M., Cembella A., Chinain M., Hallegraeff G., Reguera B., Zingone A., Enevoldsen H., Urban E., 2015. Harmful Algal Blooms. A Scientific Summary for Policy Makers. IOC/UNESCO, Paris (IOC/INF-1320).
- Laabir M., Jauzein C., Genovesi B., Masseret E., Grzebyk D., Cecchi P., Vaquer A., Perrin Y., Collos Y. Influence of temperature, salinity and irradiance on the growth and cell yield of the harmful red tide dinoflagellate *Alexandrium catenella* colonizing Mediterranean waters. *J. Plankton Res.*, 33(10): 1550–1563.
- Laanaia N., Vaquer A., Fiandrino A., Genovesi B., Pastoureaud A., Cecchi P., Collos Y., 2013. Wind and temperature controls on *Alexandrium* blooms (2000–2007) in Thau lagoon (Western Mediterranean). *Harmful Algae*, 28: 31–36.
- Lafabrie C., Garrido M., Leboulanger C., Cecchi P., Grégori G., Pasqualini V., Pringault O., 2013. Impact of contaminated-sediment resuspension on phytoplankton in the Biguglia lagoon (Corsica, Mediterranean Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 130: 70–80.
- Lejeusne C., Chevaldonne P., Pergent-Martini C., Boudouresque C.F., Perez T., 2010. Climate change effects on a miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea. *Trends in Ecology and Evolution*, 25: 250–260.
- Lilly E.L., Kulis D.M., Gentien P., Anderson D.M. 2002. Paralytic shellfish poisoning toxins in France linked to a human-introduced strain of *Alexandrium catenella* from the western Pacific: evidence from DNA and toxin analysis, *J. Plankton Res.*, 24: 443–452.
- Lohbeck K.T., Riebesell U., Reusch T.B.H., 2012. Adaptive evolution of a key phytoplankton species to ocean acidification. *Nature Geoscience*, 5: 346–351.
- Lugliè A., Giacobbe M.G., Sannio A., Fiocca F., Sechi N., 2003. First record of the dinoflagellate *Alexandrium catenella* (Whedon et Kofoid) Balech (Dinophyta), a potential producer of Paralytic Shellfish Poisoning, in Italian waters (Sardinia, Tyrrhenian Sea), *Bocconea*, 16(2): 1045–1051.
- Luterbacher J., Xoplaki E., Casty C., Wanner H., Pauling A., Kottel M., Rutishauser T., Bronnimann S., Fischer E., Fleitmann D., Gonzalez-Rouco F.J., Garcia-Herrera R., Barriendos M., Rodrigo F., Gonzalez-Hidalgo J.C., Saz M.A., Gimeno L., Ribera P., Brunet M., Paeth H., Rimbu N., Felis T., Jacobeit J., Donkeloh A., Zorita E., Guiot J., Torkes M., Alcoforado M.J., Trigo R., Wheeler D., Tett S., Mann M.E., Touchan R., Shindell D.T., Silenzi S., Montagna P., Camuffo D., Mariotti A., Nanni T., Brunetti M., Maugeri M., Zerefos C., Zolt S.D., Lionello P., Nunes M.F., Rath V., Beltrami H., Garnier E., Ladurie E.L.R., 2006. Mediterranean climate variability over the last centuries: a review. In Lionello, P.(ed.), *Developments in Earth and Environmental Sciences Mediterranean*. Elsevier, Amsterdam, 27–148.
- Mangialajo L., Fricke A., Perez-Gutierrez G., Catania D., Jauzein C., Lemee R., 2017. Benthic Dinoflagellate Integrator (BEDI): A new method for the quantification of Benthic Harmful Algal Blooms. *Harmful Algae*, 64: 1–10.
- Mangialajo L., Ganzin N., Accoroni S., Asnaghi V., Blanfuné A., Cabrini M., Cattaneo-Vietti R., Chavanon F., Chiantore M., Cohu S., Costa E., Fornasaro D., Grossel H., Marco-Miralles F., Masó M., Reñé A., Rossi A.M., Sala M.M., Thibaut T., Totti C., Vila M., Lemée R., 2011. Trends in *Ostreopsis* proliferation along the Northern Mediterranean coasts. *Toxicon*, 57: 408–420.
- Maugendre L., Gattuso J.P., Poulton A.J., Dellisanti W., Gaubert M., Guieu C., Gazeau F., 2017. No detectable effect of ocean acidification on plankton metabolism in the NW oligotrophic Mediterranean Sea: Results from two mesocosm studies. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 186: 89–99.
- Montesor M., Marino D., Zingone A., Dafnis G., 1990. Three *Alexandrium* species from coastal Tyrrhenian waters (Mediterranean Sea), in: E. Graneli, B. Sundstrom, L. Edler, D.M. Anderson (Eds.), *Toxic Marine Phytoplankton*, Elsevier, New York, pp. 82–87.
- Nézan E., Siano R., Boulben B., Six C., Bilien G., Chèze K., Duval A., Le Panse S., Quéré J., Chomérat N., 2014. Genetic diversity of the harmful family *Kareniaceae* (Gymnodiniales, Dinophyceae) in France, with the description of *Karlodinium gentienii* sp. nov.: A new potentially toxic dinoflagellate. *Harmful Algae*, 40: 75–91.
- Orr J.C., Fabry V.J., Aumont O., Bopp L., Doney S.C., Feely R.A., Gnanadesikan A., Gruber N., Ishida A., Joos F., Key R.M., Lindsay K., Maier-Reimer E., Matear R., Monfray P., Mouchet A., Najjar R.G., Plattner G.K., Rodgers K.B., Sabine C.L., Sarmiento J.L., Schlitzer R., Slater R.D., Totterdell I.J., Weirig M.F., Yamanaka Y., Yool A., 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437: 681–686
- Penna A., Vila M., Fraga S., Giacobbe M.G., Andreoni F., Riobo P., 2005. Characterization of *Ostreopsis* and *Coolia* (Dinophyceae) isolates in the Western Mediterranean Sea based on morphology, toxicity and internal transcribed spacer 5.8SrDNA sequences. *J. Phycol.*, 41: 212–225
- Perez C.C., Roy S., Levasseur M., Anderson D.M., 1998. Control of germination of *Alexandrium tamarens*

- (Dinophyceae) cysts from the lower St. Lawrence estuary (Canada). *J. Phycol.*, 34: 242-249.
- Roelke, D. L., S. Spatharis & S. M. Mitrovic, 2012. A new hydrology: effects on ecosystem form and functioning. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 69(8): 1377–1379.
- Sansoni G, Borghini B, Camici G, Casatti M, Righini P, Rustighi C., 2003. Fioriture algali di *Ostreopsis ovata* (Gonyaulacales: Dinophyceae): un problema emergente. *Biol Ambient*, 17(1): 17–23.
- Smayda T., 1997a. What is a bloom? A commentary. *Limnology and Oceanography*, 42 (5): 1132-1136.
- Smayda T., 1997b. Harmful algal blooms: their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. *Limnology and Oceanography* 42, 5, part 2: 1137-1153.
- Smida D.B., Sahraoui I., Mabrouk H.H., Hlaili A.S., 2012. Dynamique saisonnière du genre *Alexandrium* (dinoflagellé potentiellement toxique) dans la lagune de Bizerte (Nord de la Tunisie) et contrôle par les facteurs abiotiques environnants. *CR Biologies*, 335: 406-416.
- Sournia A., Chrétiennot-Dinet M.J., Ricard M., 1991. Marine phytoplankton: how many species in the world ocean? *Journal of Plankton Research*, 13: 1093–1099.
- Spatharis S., Danielidis D., Tsirtsis G., 2007. Recurrent *Pseudo-nitzschia calliantha* (Bacillariophyceae) and *Alexandrium insuetum* (Dinophyceae) winter blooms induced by agricultural runoff, *Harm. Algae*, 6: 811–822.
- Spatharis, S., Skliris N., Meziti A., 2012. First record of a *Trichodesmium erythraeum* bloom in the Mediterranean sea. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 69(8): 1444–1455.
- Spyropoulou A., Spatharis S., Papantoniou G., Tsirtsis G., 2013. Potential response to climate change of a semi-arid coastal ecosystem in eastern Mediterranean. *Hydrobiologia*, 705: 87–99.
- Stoecker D.K., Li A., Coast D.W., Gustafson D.E., 1997. Mixotrophy in the dinoflagellate, *Prorocentrum minimum*. *Marine Ecology Progress Series*, 152: 1-16.
- Taylor F.J.R., 1979. A description of the benthic dinoflagellate associated with maitotoxin and ciguatoxin, including observations on Hawaiian material. In: Taylor, D.L., Seliger, H.H. (Eds.), *Toxic Dinoflagellate Blooms*, 71-76.
- Tolomio C., 2011. The summer phytoplankton along the Corsican coasts (Bay of Calvi and Gulf of Porto Vecchio). First check-list. *Marine Life*, 17: 25-38.
- Totti C., Accoroni S., Cerino F., Cucchiari E., Romagnoli T., 2010. *Ostreopsis ovata* bloom along the Conero Riviera (northern Adriatic Sea): relationships with environmental conditions and substrata. *Harmful Algae*, 9: 233–239.
- Turki S., 2005. Distribution of toxic dinoflagellates along the leaves of seagrass *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* from the Gulf of Tunis. *Cah Biol Mar*, 46: 29–34.
- Vila M., Garcés E., Masó M., 2001. Potentially toxic epiphytic dinoflagellate assemblages on macroalgae in the NW Mediterranean. *Aquat. Microb. Ecol.*, 26: 51–60.
- Vila M., Grazia Giacobbe M., Masó M., Gangemi E., Penna A., Sampedro N., Azzaro F., Camp J., Galluzzi L., 2005. A comparative study on recurrent blooms of *Alexandrium minimum* in two Mediterranean coastal areas. *Harmful Algae*, 4: 673–695.
- Walsh J.J., Lenes J.M., Weisberg R.H., Zheng L., Hua C., Fanning K.A., Snyder R., Smith J., 2017. More surprises in the global greenhouse: Human health impacts from recent toxic marine aerosol formations, due to centennial alterations of world-wide coastal food webs. *Marine Pollution Bulletin*, 116: 9–40.
- Wells M.L., Trainer V.L., Smayda T.J., Karlson B.S.O., Trick C.G., Kudela R.M., Ishikawa A., Bernard S., Wulff A., Anderson D.M., Cochlan W.P., 2015. Harmful algal blooms and climate change: Learning from the past and present to forecast the future. *Harmful Algae*, 49: 68–93.
- Zingone A., Enevoldsen H.O., 2000. The diversity of harmful algal blooms: a challenge for science and management. *Ocean and Coastal Management*, 43: 725-748.
- Zingone A., Siano R., D'Alelio D., Sarno D., 2006. Potentially toxic and harmful microalgae from coastal waters of the Campania region (Tyrrhenian Sea, Mediterranean Sea). *Harmful Algae*, 5: 321–337.