



CONVENTION ONEMA - IFREMER :

MISE AU POINT DE L'INDICE COMPOSITION DANS LE CADRE DE L'INDICATEUR PHYTOPLANCTON

LES INDICES DE COMPOSITION PHYTOPLANCTONIQUE EN EAUX COTIERES – SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

ANNE GOFFART

Université de Liège Belgique et STARESO Calvi Corse

RESUME

Ce rapport rappelle brièvement pourquoi le phytoplancton est un excellent indicateur de l'état des eaux côtières et synthétise les limites adaptatives des communautés phytoplanctoniques en réponse aux perturbations d'origine anthropique (essentiellement l'enrichissement en sels nutritifs). Il présente ensuite l'indicateur phytoplanctonique idéal et résume l'état des connaissances en matière d'indices de composition et d'indicateurs phytoplanctoniques intégrant la composition. Les méthodes de calcul des indices sont expliquées lorsque les informations disponibles sont suffisamment claires et détaillées. Le rapport se termine par la proposition de pistes à explorer pour la mise au point et la validation d'un indice de composition phytoplanctonique qui soit opérationnel et représentatif de la composition taxonomique d'une masse d'eau et de son évolution temporelle.

TABLE DES MATIERES

Résumé	1
1. Indicateurs, indice de condition et indice de changement	3
2. Le phytoplancton : un rôle clé en milieu marin.....	3
3. Le phytoplancton : un bioindicateur de l'enrichissement en nutriments	4
4. Phytoplancton et obligations européennes.....	5
5. L'indicateur phytoplanctonique idéal.....	5
6. Développements récents concernant les indicateurs phytoplanctoniques en eaux côtières.....	6
7. Indices de composition utilisant des données floristiques classiques.....	9
7.1. Travaux ciblant les espèces toxiques et nuisibles	9
7.1.1 OSPAR 2005	9
7.1.2 OSPAR 2008	11
7.2 Indice I_E - Ecology.....	13
7.2.1 Devlin et al. (2007).....	13
7.2.2 Rapport OSPAR du Royaume-Uni (Anonymous 2008).....	13
7.2.3 Foden et al. 2010	14
7.3 Indices basés sur les groupes phytoplanctoniques fonctionnels.....	14
7.3.1 Indice I_F (Succession of Functional groups)	14
7.3.2 Indice I_F simplifié.....	17
7.3.3 Indice PCI (Phytoplankton Community Index).....	18
7.4 Indice de composition utilisant des listes d'espèces.....	19
7.5 Indices de diversité	20
7.5.1 Indice de Shannon - Wiener	20
7.5.2 Autres indices	20
8. Pistes pour le développement de nouveaux indices de composition.....	22
8.1 Pigments phytoplanctoniques mesurés par HPLC	22
8.1.1 Principes de la méthode.....	22
8.1.2 Intérêts de la méthode	23
8.2 Indices de composition basés sur la signature pigmentaire.....	24
8.2.1 Indices de diversité et pigments HPLC	25
8.2.2 F_{pigment} ratio	26
8.3 Fluoroprobe.....	27
9. Indicateurs intégrés comprenant un ou plusieurs paramètres phytoplanctoniques.....	27
9.1 Indicateur trophique TRIX	29
9.2 Indicateur canadien WQI	29
9.3 Phytoplankton index of Biotic Integrity (P-IBI)	29
9.4 Integrated Phytoplankton Index (IPI).....	30
10. Proposition d'indicateurs de composition à tester sur les données corses	30
11. Références.....	31

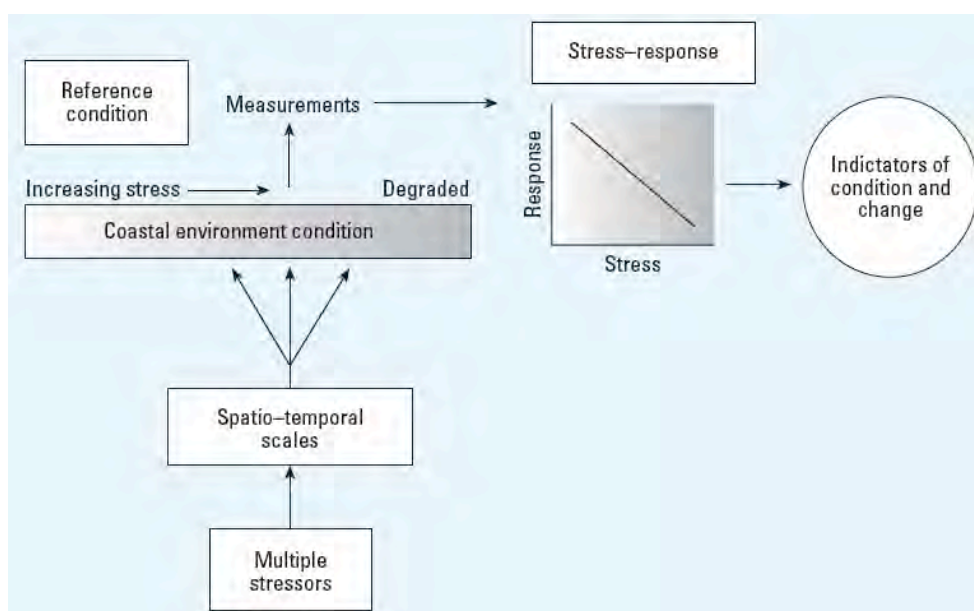
1. INDICATEURS, INDICE DE CONDITION ET INDICE DE CHANGEMENT

Un indicateur est généralement composé de plusieurs indices permettant d'évaluer un élément de qualité. Chaque indice comporte une ou plusieurs métriques, le terme métrique désignant une méthode de calcul mais aussi le résultat de son application à l'ensemble des données d'un paramètre (Soudant & Belin 2009).

Un indice de condition est un indice écologique qui caractérise l'état général d'une communauté. Un indice de changement doit répondre à une perturbation (e.g. apport anthropique de sels nutritifs) et permettre une bonne évaluation de l'impact de cette perturbation sur le compartiment considéré (e.g. phytoplancton). Pour le phytoplancton, le temps de réponse d'un indice de changement (Fig 1) est d'environ une semaine.

Figure 1

Diagramme conceptuel des éléments critiques à prendre en compte dans la construction d'indicateurs de condition et de changement (Niemi et al. 2004).



2. LE PHYTOPLANCTON : UN ROLE CLE EN MILIEU MARIN

En présence de lumière, le phytoplancton élabore sa matière vivante en prélevant dans l'eau le CO_2 et les sels nutritifs indispensables à sa croissance. A l'échelle de la planète, on estime qu'environ 100 millions de tonnes de carbone sont fixées chaque jour sous forme de CO_2 par le phytoplancton.

Une partie du phytoplancton est consommée par les niveaux trophiques supérieurs, alimentant ainsi le stock de la biomasse marine, y compris les ressources halieutiques et les grands mammifères marins. Une autre fraction de la matière organique produite est transformée en détritits (cadavres, pelotes fécales, ...) qui sont dégradés dans les couches de surface ou sédimentent dans les couches profondes des océans. Une dernière fraction du carbone fixé est rapidement reminéralisée par la respiration des différents échelons de la chaîne alimentaire. Le CO_2 rejeté par la dégradation et la respiration est remis à disposition des échanges océan - atmosphère.

Le fonctionnement de cette « pompe biologique » dépend directement des caractéristiques des communautés phytoplanctoniques, particulièrement sensibles au forçage climatique (e.g. vent, précipitations, ...), aux conditions physiques du milieu (e.g. température, turbulence, mélange vertical, advection horizontale, turbidité, éclaircissement) et à la disponibilité en sels nutritifs.

3. LE PHYTOPLANCTON : UN BIOINDICATEUR DE L'ENRICHISSEMENT EN NUTRIMENTS

Toute modification des concentrations en sels nutritifs disponibles dans la colonne d'eau implique des changements rapides au sein de la communauté phytoplanctonique. Un apport de sels nutritifs peut 1) affecter les taux de division des cellules phytoplanctoniques, et par conséquent modifier la biomasse, 2) faire évoluer la composition floristique et 3) accroître la fréquence, l'intensité et la durée des efflorescences, éventuellement nuisibles ou toxiques.

Si les conditions du milieu sont très favorables, une cellule phytoplanctonique peut se diviser 2 à 3 fois par jour, ce qui conduit rapidement à une accumulation de biomasse (bloom). Une espèce présente initialement à une concentration de 1 cellule l^{-1} et qui se divise deux fois par jour atteindra une concentration de 16 877 cellules l^{-1} après 1 semaine (en l'absence de perte par sédimentation ou broutage). Lorsque le milieu s'épuise en sels nutritifs, les taux de division des cellules phytoplanctoniques diminuent pour atteindre une division par semaine (Graham et al. 2009). Quand les conditions environnementales deviennent défavorables, la plupart des espèces entrent en dormance et s'entourent d'une membrane épaisse qui leur permet de survivre et d'attendre le retour de conditions optimales pour se redévelopper (e.g. akinètes des cyanobactéries, hypnospores des diatomées, kystes des dinoflagellés).

De plus, les besoins en sels nutritifs (azote, phosphore, silice, fer) des différentes classes d'algues varient. La présence de silice dissoute est indispensable à la croissance des diatomées, des silicoflagellés (dictyochophycées) et des parmales (chrysophycées) qui l'utilisent pour élaborer leur squelette ou les plaques qui entourent la cellule. La silice n'est par contre pas (ou très peu) nécessaire à la croissance des dinoflagellés et des cyanobactéries.

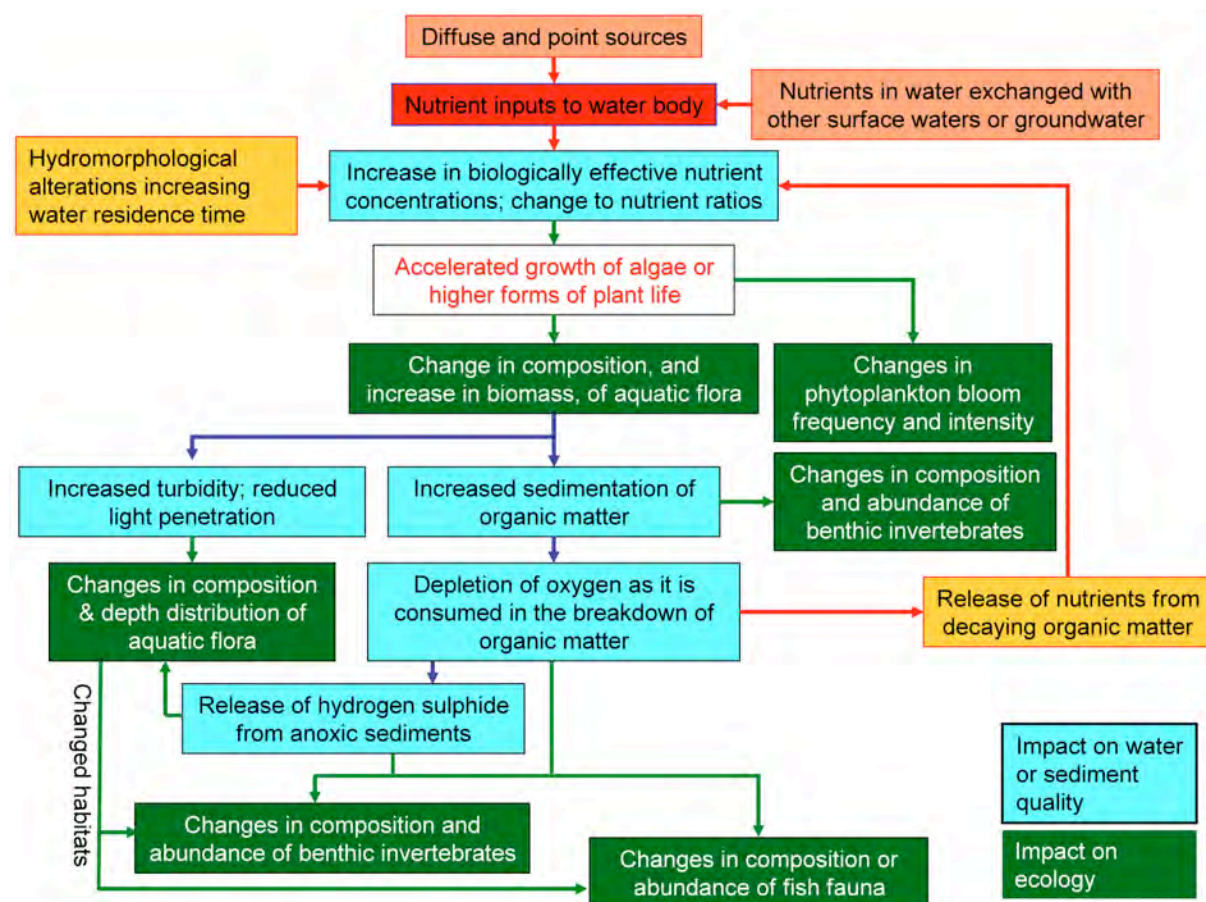
Une modification des rapports entre les principaux éléments nutritifs dissous dans l'eau, consécutive à des rejets anthropiques, est donc susceptible d'entraîner un changement de la composition floristique du phytoplancton. En zone côtière, un apport excédentaire d'azote permet à des espèces non siliceuses de se développer en proportions anormalement élevées, au détriment des diatomées, dont la croissance est limitée par l'absence de silice dissoute. On parle de dystrophie quand les apports anthropiques de nutriments entraînent un déséquilibre des rapports naturels entre l'azote, le silicium et le phosphore.

Réagissant en quelques jours aux variations des concentrations en sels nutritifs, le phytoplancton constitue à la fois un indicateur de condition du milieu et un excellent indicateur de changement de la charge en nutriments. Il faut cependant garder à l'esprit que, dans certains cas, l'impact variable du broutage zooplanctonique limite l'accumulation de biomasse phytoplanctonique.

On parle d'eutrophisation quand l'augmentation de la production phytoplanctonique et l'accumulation de biomasse associées à un enrichissement en sels nutritifs ont des conséquences néfastes pour l'environnement (e.g. de Jonge et al. 2002, Devlin et al. 2007). Celles-ci se traduisent entre autres par une série de symptômes : modification de la composition

phytoplanctonique, développement de blooms phytoplanctoniques nuisibles ou toxiques, perturbations des réseaux trophiques, mortalité d'organismes benthiques et/ou de poissons, anoxie, régression des herbiers, développement de macroalgues opportunistes,... (Fig. 2).

Figure 2 Modèle conceptuel général du processus d'eutrophisation (Ecostat 2004)



4. PHYTOPLANCTON ET OBLIGATIONS EUROPEENNES

Sur base de la sensibilité du phytoplancton aux apports anthropiques de sels nutritifs, la DCE a retenu un indicateur « Phytoplancton » pour contribuer à caractériser l'état écologique des masses d'eau. Il est composé de trois indices : la biomasse, l'abondance et la composition. La biomasse et l'abondance sont caractérisées par des métriques (P_{90} de la chlorophylle pour la biomasse, pourcentage de blooms toutes espèces pour l'abondance) qui sont déjà validées ou en cours de l'être au niveau européen. L'indice composition a été décrit provisoirement au niveau français, mais doit être revu (Soudant & Belin 2009a).

5. L'INDICATEUR PHYTOPLANCTONIQUE IDEAL

L'indicateur phytoplanctonique idéal issu de la combinaison des indices de biomasse, d'abondance et de composition doit permettre de caractériser l'état d'une masse d'eau et de suivre son évolution en donnant des informations sur :

- l'amplitude des changements (combien ?, approche quantitative),
- la nature des changements (qu'est-ce qui change ?, approche qualitative),
- l'échelle temporelle et spatiale des changements (à quelle saison et dans quelle zone les changements sont-ils les plus marqués ?).

Il permettra ainsi d'apprécier l'efficacité des mesures de gestion qui visent à limiter les rejets.

L'indicateur idéal doit intégrer les différences marquées et les fortes spécificités régionales qui existent entre les communautés phytoplanctoniques des différents groupes de masses d'eau (e.g. dans le cadre de la DCE, eaux côtières méditerranéennes de type 3W, eaux côtières de la Mer du Nord, de la Manche Atlantique, ...). Ces différences s'expriment en terme de diversité, d'abondance relative des espèces, de classes de taille et de succession saisonnière. Construit initialement sur une base scientifique robuste, l'indicateur doit ensuite être simplifié pour être opérationnel et facilement utilisable par les gestionnaires de l'environnement. Cette simplification implique une connaissance approfondie du fonctionnement des zones étudiées et de ses caractéristiques.

L'indice de composition phytoplanctonique idéal doit donc 1) être représentatif de la composition taxonomique, 2) incorporer la succession saisonnière normale et la variabilité interannuelle et 3) contribuer à refléter l'évolution de la qualité des masses d'eau. Sa validité dépend étroitement de la qualité des données, qu'elles soient issues de comptages (identifications floristiques souvent complexes) ou d'analyses chimiques de type HPLC. Dans tous les cas, il est essentiel d'uniformiser les protocoles de prélèvement et d'analyses, et de procéder à des intercalibrations régulières.

6. DEVELOPPEMENTS RECENTS CONCERNANT LES INDICATEURS PHYTOPLANCTONIQUES EN EAUX COTIERES

Au cours de la dernière décennie, le besoin de disposer d'outils décrivant le statut écologique des masses d'eau côtières ou leur niveau d'eutrophisation a donné lieu à de nombreux développements. Ces travaux, où le phytoplancton occupe une place importante (Tab 1), sont réalisés au sein des grandes commissions internationales, dans le cadre de programmes spécifiques ou par des laboratoires concernés par la gestion du milieu marin.

Les éléments de qualité pris en compte pour la construction des indicateurs phytoplanctoniques sont 1) la biomasse (chlorophylle a), 2) le nombre de blooms (toutes espèces, espèces toxiques et/ou nuisibles), 3) la composition floristique du phytoplancton (toutes espèces, espèces toxiques et/ou nuisibles, groupes fonctionnels). Un indicateur est constitué d'un élément de qualité ou de l'association de plusieurs d'entre eux.

Les travaux qui abordent le développement d'indices de composition du phytoplancton sont présentés et synthétisés ci-dessous, à l'exception des travaux menés par l'Ifremer. Le chapitre 7 concerne les travaux qui utilisent les inventaires floristiques classiques issus de comptages au microscope; le chapitre 8 présente les travaux qui font appel à des techniques alternatives de détermination floristique du phytoplancton (HPLC, FluoroProbe). Le chapitre 9 présente les indicateurs intégrés qui prennent en compte un ou plusieurs paramètres phytoplanctoniques.

Tableau 1

Composantes des principaux indices phytoplanctoniques récents

Région	Nom de l'indice	Composantes phytoplanctoniques de l'indice	Référence	Page du rapport
Europe		Biomasse	Baan & van Buuren 2003	-
Danemark		Biomasse	Carstensen et al. 2008 Henriksen 2009 Carstensen & Henriksen 2009	-
Golfe de Saronikos – Mer Egée		Biomasse	Simboura et al. 2005	-
Pays basque espagnol		Biomasse Fréquence des blooms toutes espèces	Revilla et al. 2009 Borja et al. 2009	-
OSPAR		Biomasse Abondance des espèces nuisibles et toxiques	OSPAR 2005a, b	9
OSPAR		Biomasse Abondance des espèces nuisibles Polémique sur l'utilisation des espèces toxiques	OSPAR 2008	11
Royaume-Uni	I _E : évaluation globale du niveau d'eutrophisation d'une région	Biomasse Abondance spécifique Abondance totale	Devlin et al. 2007 Anonymous 2008 Foden et al. 2010	13
Angleterre et Pays de Galles	I _F : succession phytoplanctonique saisonnière	4 groupes fonctionnels : diatomées, dinoflagellés, <i>Phaeocystis</i> et microflagellés autotrophes (à l'exception de <i>Phaeocystis</i>)	Devlin et al. 2007	14
Plymouth	I _F simplifié : succession phytoplanctonique saisonnière	2 groupes fonctionnels : diatomées et dinoflagellés	Devlin 2008	17

Tableau 1 suite		Composantes des principaux indices phytoplanctoniques récents		
Région	Nom de l'indice	Composantes de l'indice phytoplanctonique	Référence	Page du rapport
Royaume-Uni	PCI	2 groupes fonctionnels : diatomées et dinoflagellés. Indice applicable à d'autres groupes fonctionnels	Tett et al. 2008	18
Océan mondial	Indice de Shannon - Wiener	Composition et diversité	Irigoien et al. 2004	20
Mer du Nord			Kabuta & Duijts 2000	
Méditerranée			Ignatiades et al. 2009	
Golfe Persique, ...			Polikarpov et al. 2009, ...	
Expériences en mésocosmes			Estrada et al. 2003	
Mer Egée	Indice de Menhinick	Composition et diversité	Spatharis & Tsirtsis 2010	20
	Indice d'équitabilité E_2			
Région oligotrophes, mésotrophes et eutrophes	F_P ratio	Composition pigmentaire (HPLC)	Claustre et al. 1994	26
Méditerranée			Vidussi et al. 2000	
			Marty et al. 2002	

7. INDICES DE COMPOSITION UTILISANT DES DONNÉES FLORISTIQUES CLASSIQUES

7.1. TRAVAUX CIBLANT LES ESPÈCES TOXIQUES ET NUISIBLES

7.1.1 OSPAR 2005

La convention OSPAR porte sur les relations nutriments / eutrophisation du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est. Son très large champ d'application comprend également des estuaires. Initiés en 1972, les travaux menés par OSPAR présentent d'importantes similitudes avec ceux développés par la DCE, qui cible toutes les pressions anthropiques mais se limite aux eaux côtières du plateau continental européen situées entre le trait de côte et 1 mile au large.

Parmi les paramètres d'évaluation de l'eutrophisation des zones côtières, OSPAR a retenu la teneur en chlorophylle a (valeurs moyennes et maximales, seuils par région) et la présence d'espèces phytoplanctoniques nuisibles ou toxiques en concentrations anormalement élevées (OSPAR 2005a, OSPAR 2005b).

Pour la composition phytoplanctonique, OSPAR distingue les espèces nuisibles qui constituent des efflorescences denses, caractérisées par des concentrations cellulaires élevées (e.g. *Phaeocystis*, *Noctiluca*) et les espèces qui produisent des toxines (e.g. *Alexandrium*, *Dinophysis*, Tab 2a). Pour les espèces nuisibles, les notions de durée prolongée ou de surface concernée par les blooms sont introduites.

D'un point de vue floristique, OSPAR souligne que le remplacement des diatomées par des flagellés (dont certains sont nuisibles ou toxiques) peut indiquer une eutrophisation. OSPAR recommande d'utiliser le rapport diatomées / dinoflagellés pour caractériser l'état d'une région, mais rappelle que l'utilisation des espèces phytoplanctoniques en tant qu'indicateurs des effets directs de l'eutrophisation présente des incertitudes du point de vue scientifique (OSPAR 2005a).

Les orientations définies en 2005 ne sont pas figées, et OSPAR indique qu'il y aura éventuellement lieu de revoir les choix d'indicateurs à la lumière des développements en cours et des échanges entre OSPAR et les groupes de travail chargés de la mise en œuvre de la DCE, notamment en ce qui concerne la composition et l'abondance du phytoplancton.

OSPAR 2005 fixe des seuils à ne pas dépasser pour les concentrations en espèces nuisibles et toxiques (Tab 2b). En cas de dépassement, un des objectifs de qualité écologique (Ecological Quality Objectives, EcoQOs) définis par OSPAR n'est pas atteint. La zone peut alors être qualifiée de « zone à problème » lors de l'évaluation intégrée qui prend en compte les concentrations hivernales en sels nutritifs, la chlorophylle a, les espèces phytoplanctoniques nuisibles et toxiques, la teneur en oxygène et les changements ou la mortalité du zoobenthos (OSPAR 2005b). La limite entre les « zones sans problème » et celle des « zones à problème » d'OSPAR correspond à la limite « bon état – état moyen » de la DCE.

Tableau 2a

Principales espèces nuisibles (1-2) ou toxiques (3-7) retenues par OSPAR 2005 pour quantifier le degré d'eutrophisation d'une région



11

1

<http://phaeocystis.org/pubs.html>

2 http://www.awi.de/fileadmin/user_upload/News/Press_Releases/2006/3._Quarter/Plankton1_p.jpg

3 <http://algeinfo.imr.no/index.php?side=visalge&id=47>

4 http://wwwz.ifremer.fr/var/envlit/storage/documents/portfolios/portfolio20020802/portfolio_album.html

5 <http://www.who.edu/redtide/page.do?pid=24595&tid=542&cid=71080&c=3&idx=3&slideshow=27492>

6 http://www.bigelow.org/hab/saf_dinophysis.jpg

7 <http://www.marinebiology.edu/Phytoplankton/phyto.htm#p9>

Tableau 2b

Seuils pour les espèces phytoplanctoniques indicatrices nuisibles et toxiques de la zone maritime OSPAR (OSPAR 2005a; liste d'espèces ouverte et non exhaustive)

Espèces nuisibles	Seuils 2005	Effets
<i>Phaeocystis</i> sp.(colony form)	> 10 ⁶ cellules l ⁻¹ & durée > 30 jours	Mousse et écume, risque d'anoxie
<i>Noctiluca scintillans</i>	> 10 ⁴ cellules l ⁻¹ & surface > 5 km ²	Risque d'anoxie
<i>Chrysochromulina polylepis</i>	> 10 ⁶ cellules l ⁻¹	Toxicité pour les poissons et le benthos
<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	> 10 ⁵ cellules l ⁻¹	Toxicité pour les poissons, production de PSP
<i>Alexandrium</i> sp.	> 10 ² cellules l ⁻¹	Production de PSP
<i>Dinophysis</i> sp.	> 10 ² cellules l ⁻¹	Production de DSP
<i>Prorocentrum</i> sp.	> 10 ⁴ cellules l ⁻¹	Production de DSP

7.1.2 OSPAR 2008

Le second rapport sur l'eutrophisation de la zone maritime OSPAR (OSPAR 2008) met en évidence les difficultés qu'ont les états membres d'OSPAR à s'entendre sur les notions d'espèces phytoplanctoniques indicatrices et à dégager des indicateurs de composition pertinents. Il souligne aussi le besoin de mieux prendre en compte les spécificités régionales. Il convient de distinguer les positions relatives aux espèces nuisibles de celles qui concernent les espèces toxiques.

Espèces nuisibles

L'utilisation des espèces nuisibles (et en particulier de *Phaeocystis*) comme indicateur de perturbation du milieu est confirmée par la majorité des états membres d'OSPAR. En ce qui concerne les métriques, et en relation avec la DCE, OSPAR 2008 recommande qu'à l'avenir :

- le seuil adopté pour les espèces nuisibles passe à 1 million de cellules l⁻¹ pour toutes les espèces,
- la durée d'un bloom nuisible soit exprimée en nombre de mois par an (fréquence).

Espèces toxiques

Les parties contractantes d'OSPAR remettent en cause l'utilisation des espèces toxiques comme indicateurs d'eutrophisation, de plus en plus controversée. De façon globale, un consensus émergent souligne que le lien entre un enrichissement en sels nutritifs et le développement d'espèces toxiques formant des blooms modérés n'est pas suffisamment robuste pour que ce paramètre soit utilisé dans l'évaluation de la qualité des eaux côtières. Dans les eaux irlandaises par exemple, des blooms toxiques ou des accumulations de toxines dans les produits de l'aquaculture sont fréquemment observés dans des régions qui ne subissent pas d'apports anthropiques. L'Irlande recommande de cibler les espèces clairement liées à l'eutrophisation, plutôt que celles qui ont des effets potentiellement indésirables.

Ceci a conduit à l'application d'approches différentes au sein de la zone OSPAR, se traduisant par l'abandon du paramètre (Irlande), l'application d'un nouvel indice (Royaume-Uni, cfr. § 7.2), l'adaptation de la liste des espèces toxiques et la modification de certains seuils (Tab 3). Comme en 2005, un dépassement de seuil peut entraîner le classement de la région en « zone à problème » lors de l'évaluation intégrée.

Le besoin de développer d'avantage de recherche sur le rapport de cause à effet entre un enrichissement ponctuel en sels nutritifs et le développement de blooms toxiques est souligné. Ces recherches devraient inclure entre autres des travaux sur l'écophysiologie des espèces et le contrôle de leur développement par la structure physique de la colonne d'eau (période de stratification, zones de sédimentation, ...). De plus, le besoin d'élargir la liste des espèces toxiques établie en 2005 (Tab 2b) a été souligné.

Bonne synthèse des problèmes liés à l'utilisation des espèces indicatrices qui souligne le besoin de séparer la problématique des algues toxiques et celle de l'eutrophisation.

Tableau 3

Seuils pour les espèces phytoplanctoniques indicatrices nuisibles et toxiques de la zone maritime OSPAR (OSPAR 2008)

"N.D.A": No Data Available, "√": parameter assessed but no threshold values found.

Species	Belgium	Denmark	France	Germany	Ireland	Netherlands	Norway	Portugal	Spain	Sweden	UK
Nuisance species	<i>Phaeocystis</i> spp.	>10 ³ cell/l >30 days duration*	Taxon list: 40% above the	>10 ⁶ cells/l	-	>10 ⁷ cells/l**	-	N.D.A.	N.D.A.	>10 ⁶ cells/l	Phytoplankton index i.e. sum of the occurrence of any species (> 10 ³), plus Phaeocystis (>10 ⁶), plus total cell counts (>10 ⁷) and counts of chlorophyll
	<i>Noctiluca scintillans</i>	*	percentage of samples with at least one bloom	>10 ³ cells/l	-	>10 ⁴ cells/l	-	N.D.A.	N.D.A.	>10 ⁴ cells/l	>10µg/l over a five year period. Assessment level: >25%
	<i>Chrysochromulina polylepis</i>	-	category and	>10 ⁶ cells/l	-	>10 ⁵ cells/l	√	N.D.A.	N.D.A.	>10 ⁵ cells/l	
	<i>Karenia mikimotoi</i>	-	taxon size: small –	>10 ³ cells/l	-	>10 ³ cells/l	√	N.D.A.	N.D.A.	>10 ² cells/l	
	<i>Alexandrium</i> spp.	-	250.000 cells/L	>10 ² cells/l	-	>10 ² cells/l	√	N.D.A.	N.D.A.	>10 ² cells/l	
Toxic species	<i>Dinophysis</i> spp.	*	(unicellulars < 20 µm	>10 ³ cells/l	-	>10 ² cells/l	√	N.D.A.	N.D.A.	>10 ² cells/l	
	<i>Prorocentrum</i> spp.	*	without chain); large: 100.000 cells/L	>10 ⁴ cells/l	-	-	√	N.D.A.	N.D.A.	-	
	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	-	chain); large: 100.000 cells/L	>10 ⁶ cells/l	-	-	√	N.D.A.	N.D.A.	>10 ⁶ cells/l	
	<i>Chattonella</i> spp.	-	(colonial species < 20 µm + sp. > 20 µm	10 ⁵ cell/l*	-	-	-	N.D.A.	N.D.A.	-	
	<i>Odontella sinensis</i>	-		>10 ³ cells/l	-	-	-	N.D.A.	N.D.A.	-	
	<i>Verrucophora</i> spp.	-		-	-	-	√	N.D.A.	N.D.A.	>10 ⁶ cells/l	

*: Data not available for the assessment period 2001-2005.

** : This parameter is new in the Dutch assessment.

7.2 INDICE I_E - ECOLOGY

7.2.1 DEVLIN ET AL. (2007)

Une augmentation de l'abondance cellulaire d'un taxon peut impliquer une augmentation de la production phytoplanctonique et avoir un impact négatif sur l'écologie d'une masse d'eau. Sur cette base, Devlin et al. (2007) ont mis au point un indice phytoplanctonique intégrateur ($I_{Ecology}$) qui vise à une évaluation globale du niveau d'eutrophisation d'une région. L'indice I_E , développé pour la DCE, prend en compte la fréquence des événements caractérisés par :

1. des concentrations en chlorophylle a supérieures à un seuil,
2. une abondance anormalement élevée de *Phaeocystis*,
3. une abondance anormalement élevée de tout autre taxon,
4. une abondance cellulaire totale anormalement élevée.

Les tableaux 4 et 5 présentent les composantes de l'indice et la formule de calcul. Les résultats des quatre paramètres sont moyennés puis exprimés en % et rapportés à des seuils définis pour les eaux côtières britanniques (Tab 5). Les données sont acquises d'avril à septembre, pendant la période productive et la période de mesure est 6 ans.

Tableau 4 Description des composantes de l'indice I_E (Devlin et al. 2007)

Description of the four attributes required for calculation of elevated phytoplankton counts (I_E)				
Attribute	Threshold	Phytoplankton species	Index	Notation
Phytoplankton biomass	$10 \mu\text{g l}^{-1}$	Frequency of occurrences where chlorophyll biomass exceeds threshold	chl	$\left[\sum_i^{72} [\text{chl}]_{\mu\text{g/L}} > 10 / \sum_i^{300} \text{Total}_{\text{chlorophyll}} \right]$
High counts of any single species	10^6	Any single species (other than <i>Phaeocystis</i>) with counts of greater than 10^6	<i>S</i>	$\left[\sum_i^{72} [\text{Phaeo}]_{\text{cells}} > 10^6 / \sum_i^{300} \text{Total}_{\text{cells}} \right]$
Eutrophic Indicator species	10^6	<i>Phaeocystis</i> sp.	<i>P</i>	$\left[\sum_i^{72} [\text{Phaeo}]_{\text{cells}} > 10^6 / \sum_i^{300} \text{Total}_{\text{cells}} \right]$
High counts of the total taxa	10^7	Any total taxa count with counts greater than 10^7	<i>T</i>	$\left[\sum_i^{72} [\text{Total}]_{\text{cells}} > 10^7 / \sum_i^{300} \text{Total}_{\text{cells}} \right]$

Maximum samples (72) is based on a best scenario basis of monthly samples taken over the six year assessment period.

Tableau 5 Définition de l'indice I_E , formule de calcul et seuils pour les eaux côtières britanniques (Devlin et al. 2007)

Proposed boundary conditions for (I_E) relating to the occurrences of elevated taxa counts over a six year period				
Normative definition	Index	Equation – {sum $[T] + [P] + [S] + [\text{chl}] \dots / 4$ } * 100	Classification boundaries	
Phytoplankton abundance	I_E	I_E : Sum of the occurrence of any single species ($>10^6$) plus <i>Phaeocystis</i> sp. ($>10^6$), plus total cell counts ($>10^7$) and counts of chlorophyll $>10 \mu\text{g l}^{-1}$ over a six year period	High Good Moderate Poor Bad	<15% <30% <40% <50% >50%

7.2.2 RAPPORT OSPAR DU ROYAUME-UNI (ANONYMOUS 2008)

Au sein d'OSPAR, le Royaume-Uni n'a jamais approuvé l'utilisation d'une ou de quelques espèces indicatrices pour caractériser une région, et éventuellement la déclasser (OSPAR 2008). Les

Britanniques ont donc utilisé l'indice I_E développé pour la DCE et l'ont appliqué à la zone maritime d'OSPAR (OSPAR 2008, Anonymous 2008). Le tableau 6 rapporte les seuils utilisés par OSPAR.

Tableau 6 Formule de calcul de l'indice I_E et seuils appliqués par le Royaume-Uni à la zone OSPAR (Anonymous 2008)

Normative definition	Index	Equation – {SUM [T] + [P] + [S]+[CHL]/4} *100	Phytoplankton assessment	
Phytoplankton abundance	I_E	<i>I_E: sum of the occurrence of any species ($> 10^6$), plus <i>Phaeocystis</i> ($>10^6$), plus total cell counts ($>10^7$) and counts of chlorophyll $> 10\mu\text{g/l}$ over a five year period</i>	$<25\%$	Threshold not exceeded
			$>25\%$	Threshold exceeded

T : Total cell count – assessment of occurrences over 10^7

P : *Phaeocystis* cell count - occurrences over 10^6

S: Any single taxa - occurrences over 10^6

CHL: Chlorophyll concentrations - occurrences exceeding $10 \mu\text{g l}^{-1}$

7.2.3 FODEN ET AL. 2010

Dans un papier récent, Foden et al. (2010) appliquent l'indicateur I_E aux eaux côtières de l'Angleterre et du Pays de Galle. Ils utilisent des seuils abaissés adaptés aux spécificités régionales (Tab 7). Pour les comptages totaux, le seuil passe de 10^7 (Tab 5) à $250\,000$ cellules / l^{-1} (Tab 7). Pour les espèces autres que *Phaeocystis*, le seuil passe de 10^6 (Tab 5) à 10^7 cellules / l^{-1} (Tab 7).

Tableau 7 Seuils OSPAR pour les eaux anglaises et galloises. Extrait du tableau 2 de Foden et al. (2010). La référence à Devlin et al. 2007b n'est pas claire.

(e) Phytoplankton indicator species (Devlin et al. 2007b)

Total cell count—assessment of occurrences over 250,000

Phaeocystis cell count—occurrences over 10^6

Any single taxa—occurrences over 10^7

Counts of chlorophyll—occurrences exceeding $10 \mu\text{g l}^{-1}$

L'indice I_{Ecology} des Britanniques est intéressant et intégrateur. Il associe biomasse, abondance totale et composition spécifique. L'utilisation de l'indice à des régions où *Phaeocystis* ne se développe pas nécessiterait l'introduction d'espèces ou de groupes fonctionnels ayant un impact négatif sur l'environnement.

7.3 INDICES BASES SUR LES GROUPES PHYTOPLANCTONIQUES FONCTIONNELS

7.3.1 INDICE I_F (SUCCESSION OF FUNCTIONAL GROUPS)

Au cours d'un cycle saisonnier, la structure des communautés phytoplanctoniques évolue en réponse aux modifications naturelles des contraintes environnementales (e.g. établissement de la thermocline saisonnière, épuisement des sels nutritifs dans les couches de surface, intensification de la pression du broutage, ...). Généralement, les communautés phytoplanctoniques printanières

sont dominées par quelques espèces de grande taille, à croissance rapide. La biomasse est élevée, les réseaux trophiques sont relativement simples et la diversité est réduite. Au fur et à mesure que la saison avance, les espèces de grande taille disparaissent et sont remplacées par des taxons de plus petite taille, appartenant à de nombreuses espèces. La biomasse est faible, la diversité est élevée et les réseaux trophiques se complexifient. Dans les milieux non perturbés, les changements sont généralement intenses et rapides en début de saison. Ils s'amortissent par la suite. Dans les milieux impactés par l'activité humaine, des perturbations de la succession phytoplanctonique sont observées. Elles peuvent affecter les réseaux trophiques et le fonctionnement de l'écosystème, même si les mécanismes concernés ne sont pas clairs par manque d'études (Devlin et al. 2007).

L'étude de l'évolution saisonnière de la structure des communautés phytoplanctoniques porte sur les espèces ou sur les groupes fonctionnels. Un groupe fonctionnel est un ensemble d'espèces aux caractéristiques morphologiques, écologiques et physiologiques similaires, établi indépendamment de l'origine taxonomique des espèces (Reynolds et al. 2002).

Malgré la complexité du système, Devlin et al. (2007) ont développé un indice qui caractérise la succession phytoplanctonique saisonnière et ses altérations éventuelles. L'indice I_F - Succession of Functional groups - a été mis au point pour les eaux côtières du Royaume-Uni dans le cadre de la DCE.

Quatre grands groupes sont considérés : les diatomées, les dinoflagellés, les *Phaeocystis* et les microflagellés autotrophes (à l'exclusion des *Phaeocystis*). Dans les zones de référence, et pour chacun des groupes, des moyennes mensuelles des comptages sont réalisées sur une période de 5 ans. Ces données font ensuite l'objet d'un traitement statistique de normalisation qui fournit des Z-scores¹ mensuels. Une courbe de distribution saisonnière des Z-scores obtenus et des écarts-types associés est établie pour chaque groupe fonctionnel (Tab 8).

Dans les masses d'eau à évaluer, les Z-scores mensuels sont calculés par groupe fonctionnel. Le nombre de valeurs qui se situent à l'intérieur des écarts types de la courbe d'évolution saisonnière du groupe fonctionnel correspondant est ensuite comptabilisé et exprimé en % du nombre total de valeurs. L'indice I_F est la moyenne des pourcentages obtenus pour chaque groupe fonctionnel. Les seuils proposés pour les eaux côtières britanniques figurent au tableau 9.

L'indice I_F des Britanniques est intéressant, mais implique un effort d'identification floristique considérable et des traitements statistiques assez lourds. De plus il accorde la même importance à tous les groupes fonctionnels. Celle-ci devrait être pondérée pour mieux cibler les groupes fonctionnels qui ont un impact négatif sur la qualité du milieu.

¹ distance à la moyenne mesurée en unités d'écart-type

Tableau 8 Méthode appliquée pour la détermination des courbes de référence des principaux groupes phytoplanctoniques des eaux côtières britanniques dans le cadre de l'indice I_f (Devlin et al. 2007)

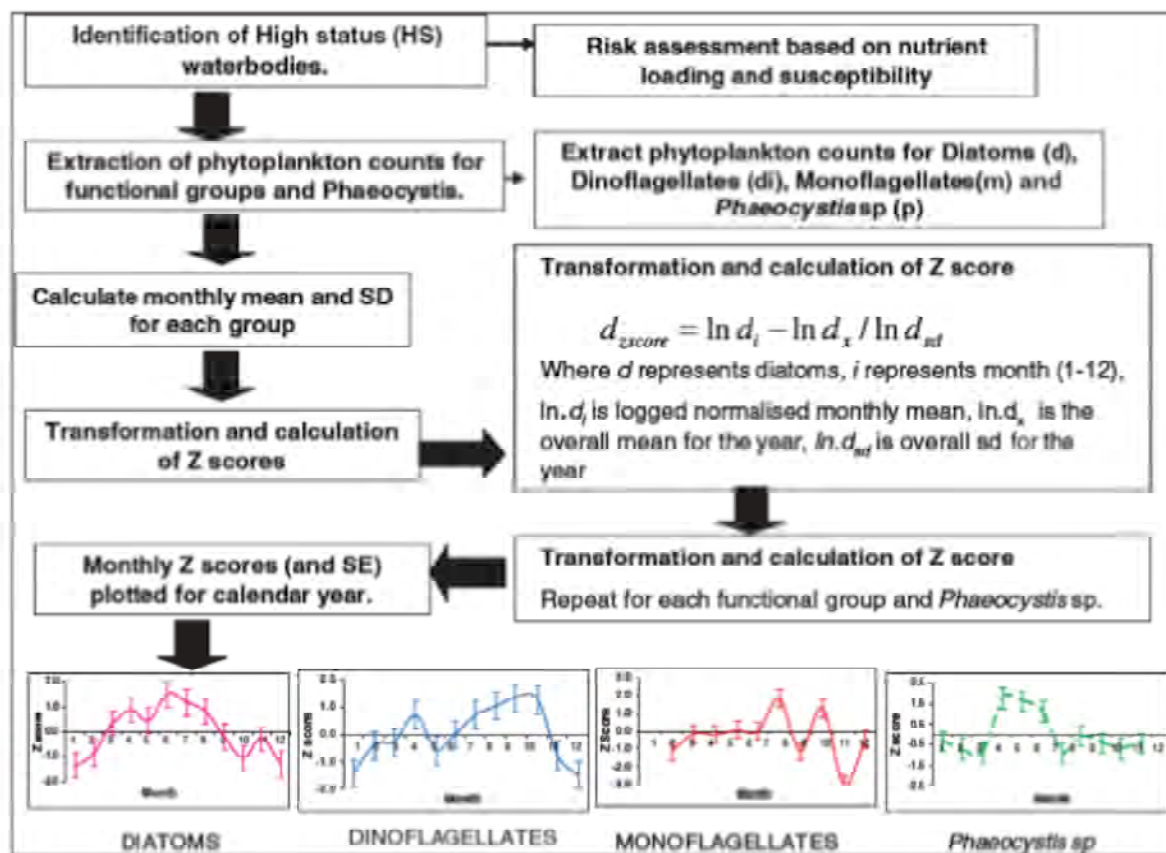


Tableau 9 Définition de l'indice I_f et seuils pour les eaux côtières britanniques (Devlin et al. 2007)

Proposed boundary conditions for third index (I_3) from outcomes of testing risk assigned waterbodies against reference Z scores

Normative definition	Index	Definition	Classification boundaries
Phytoplankton abundance	I_f	Number of points (calculated as a Z score based on five year population mean and SD) inside reference envelope. Maximum 12 points awarded to each functional group ($n = 4$) Classification taken as % of non counts against total counts (Z score)	<div>High >85%</div> <div>Good >75%</div> <div>Moderate >65%</div> <div>Poor >50%</div> <div>Bad >25%</div>

7.3.2 INDICE I_F SIMPLIFIÉ

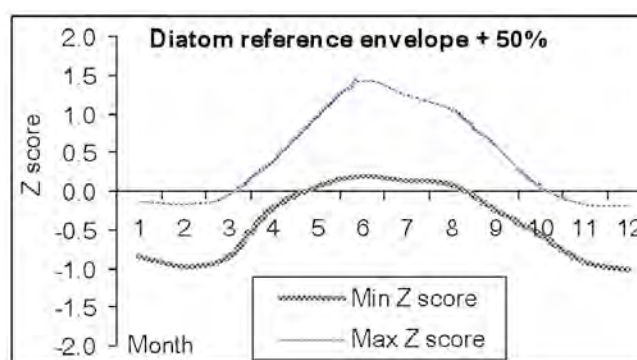
Un document de travail de Michelle Devlin (2008) présente un indice I_F simplifié appliqué aux eaux côtières de Plymouth. L'indice I_F simplifié ne porte plus que sur deux grands groupes fonctionnels : les diatomées et les dinoflagellés. La méthode de calcul des courbes de référence a également évolué.

Sur base des comptages réalisés entre 1993 à 2002, les Z-scores mensuels sont calculés pour les diatomées et les dinoflagellés d'une zone de référence. Les minima et maxima mensuels sont conservés et un pourcentage d'erreur de 50 % leur est ajouté pour intégrer la variabilité interannuelle (Tab 10). Les courbes de distribution saisonnière des Z-scores minima et maxima sont ensuite tracées. Elles délimitent les contours de l'enveloppe de référence du groupe fonctionnel associé (Fig 3).

Tableau 10 Indice I_F simplifié : résumé statistique des Z-scores utilisés pour la construction de l'enveloppe de référence des diatomées dans les eaux côtières de Plymouth (Devlin 2008)

Diatom Reference envelope							
Month	Mean	SD	Nb of months	Z-score lower value	Z-score upper value	Z-score lower value + 50%	Z-score upper value + 50%
1	-0.40	0.15	9	-0.55	-0.25	-0.83	-0.12
2	-0.48	0.17	9	-0.65	-0.31	-0.97	-0.16
3	-0.34	0.23	9	-0.57	-0.12	-0.86	-0.06
4	0.06	0.20	9	-0.14	0.26	-0.21	0.39
5	0.38	0.26	9	0.12	0.64	0.06	0.95
6	0.67	0.28	10	0.39	0.95	0.19	1.43
7	0.57	0.27	10	0.30	0.84	0.15	1.26
8	0.46	0.25	10	0.21	0.71	0.11	1.07
9	0.12	0.27	10	-0.15	0.39	-0.22	0.58
10	-0.16	0.20	9	-0.36	0.04	-0.54	0.05
11	-0.47	0.14	8	-0.61	-0.33	-0.92	-0.17
12	-0.51	0.17	8	-0.68	-0.34	-1.02	-0.17

Figure 3 E Indice I_F simplifié : enveloppe de référence des diatomées dans les eaux côtières de Plymouth (Devlin 2008)



Dans les masses d'eau à évaluer, les Z-scores mensuels sont calculés pour les diatomées et les dinoflagellés. Le nombre de valeurs qui se situent à l'intérieur de l'enveloppe de référence du

groupe fonctionnel correspondant est ensuite compté et exprimé en % du nombre total de valeurs. L'indice I_F simplifié est la moyenne des pourcentages obtenus pour les deux groupes fonctionnels.

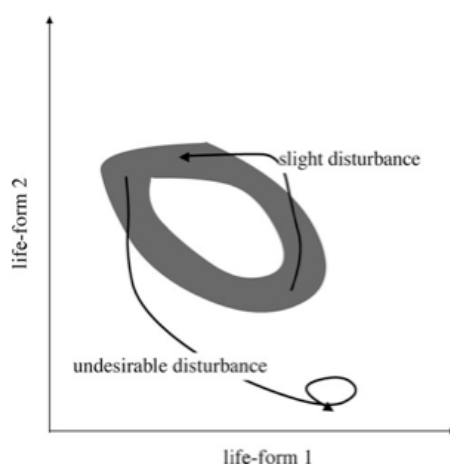
L'indice I_F simplifié semble encore en développement. Aucun travail publié concernant son application n'a été trouvé.

7.3.3 INDICE PCI (PHYTOPLANKTON COMMUNITY INDEX)

L'indice PCI (PHYTOPLANKTON COMMUNITY INDEX) développé par Tett et al. (2008) est un indice de composition qui se base sur l'abondance et l'évolution saisonnière de la distribution des diatomées et des dinoflagellés. Il peut s'appliquer à d'autres groupes fonctionnels et trouve son fondement dans les théories développées par Margalef sur la succession écologique (1978). L'indice est à la fois un indice de qualité biologique construit pour répondre aux besoins de la DCE et un indice de santé de l'écosystème utilisé dans le cadre des problématiques liées à l'eutrophisation.

Pour calculer l'indice, une courbe enveloppe de référence commune aux deux groupes est établie (Fig 4). La courbe enveloppe a forme d'anneau et intègre l'évolution saisonnière et interannuelle des diatomées et des dinoflagellés. La figure 4 illustre aussi l'idée que la résilience d'un écosystème sain lui permet de retrouver rapidement son état naturel après une perturbation légère. Par contre, une perturbation extérieure plus importante impliquera une modification non réversible des communautés phytoplanctoniques.

Figure 4	Indice PCI : représentation schématique de la courbe enveloppe de référence de deux groupes fonctionnels. La courbe intègre la variation saisonnière et la variabilité interannuelle des deux groupes (Tett et al. 2008).
----------	---



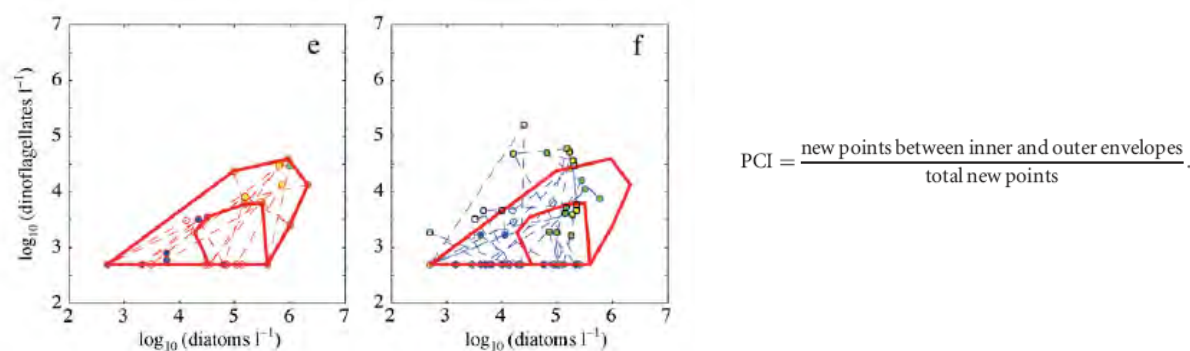
En pratique, pour une masse d'eau, il faut d'abord établir la courbe enveloppe de référence pour une période choisie (e.g. 1991 – 2000). Ceci implique :

1. l'extraction des données des comptages et leur compilation selon les groupes fonctionnels choisis (e.g. somme de toutes les diatomées et somme de tous les dinoflagellés autotrophes, avec un pas de temps mensuel ou hebdomadaire à déterminer),
2. une transformation logarithmique des abondances ($\log_{10}(x + z)$; x = l'abondance, z = la moitié de l'abondance minimale),
3. la réalisation d'un graphe en deux dimensions avec les données obtenues à l'étape précédente,

- le traçage d'une enveloppe de référence autour de ces points (Fig 5) en utilisant une « convex hull » méthode (Weisstein web resource),
- le traçage d'une seconde enveloppe à l'intérieur de la première (Fig 5). La seconde enveloppe est tracée après avoir inversé le nuage de points autour de son centre (défini par les coordonnées de la médiane).

Ensuite, les données de la seconde période (e.g. 2001 – 2010) sont superposées à la courbe enveloppe de référence établie pour la première période. Au sein d'une masse d'eau, l'indice PCI est le résultat du rapport du nombre de nouveaux points situés entre les deux enveloppes et du nombre total de nouveaux points (Fig 5). Un PCI de 1 montre qu'il n'y a pas d'évolution des caractéristiques des communautés phytoplanctoniques entre les deux périodes examinées. Un PCI de 0 traduit un changement total.

Figure 5 Indice PCI : Plots des valeurs de la période 1997 – 1999 et enveloppes de référence associées (à gauche) et plots des valeurs de la période 2000 – 2005 (à droite) par rapport aux enveloppes de référence 1997 - 1999. Exemple d'une station située près de Stonehaven (Est Ecosse). D'après Tett et al. 2008. La formule de calcul de l'indice figure ci-dessous.



L'indice PCI a été testé dans trois masses d'eau côtières britanniques. Les résultats montrent qu'il répond bien aux perturbations croissantes subies par les masses d'eau entre deux périodes. A l'heure actuelle, l'indice PCI est un indicateur de changement de la composition des communautés phytoplanctoniques à partir d'une situation de référence (1 période de référence par masse d'eau). A l'avenir, l'indice devra être calibré dans une optique DCE pour permettre de mesurer l'écart entre une masse d'eau de référence et une autre masse d'eau sur une période commune.

L'indice PCI développé par Tett et al. (2008) paraît très intéressant, mais doit encore être calibré dans une optique DCE. Il peut être appliqué à différents groupes fonctionnels choisis en fonction des caractéristiques dominantes du phytoplancton de la région étudiée (par exemple diatomées et dinoflagellés en Atlantique, micro- et nano-phytoplancton en Méditerranée). Il présente donc un caractère potentiellement universel qui n'est pas présent dans les indices examinés dans les paragraphes précédents.

7.4 INDICE DE COMPOSITION UTILISANT DES LISTES D'ESPECES

Certains développements portent sur l'utilisation de listes d'espèces, et non des groupes fonctionnels, pour définir un indice de composition phytoplanctonique applicable au milieu marin. Le but des réflexions en cours est double. Il s'agit de déterminer si 1) l'évolution saisonnière de l'abondance et de la richesse spécifique du phytoplancton d'une masse d'eau de référence est

prévisible, 2) la déviation observée au sein des masses d'eau altérées est suffisante pour définir un indice qui reflète les différences de qualité.

Le travail récent de Devlin et al. (2009) souligne le besoin et la difficulté d'établir des listes floristiques de référence, outil indispensable à tout développement ultérieur. Les auteurs recommandent que les listes à construire contiennent entre 10 et 15 espèces.

L'idée d'établir une évaluation sur une liste d'espèces fixe est bonne, mais la difficulté des choix est soulignée.

7.5 INDICES DE DIVERSITE

Les indices de diversité constituent une autre piste pour caractériser la composition du phytoplancton et l'évolution temporelle de sa biodiversité. Un indice de diversité exprime l'importance relative du nombre des espèces abondantes dans un milieu donné. Son expression est fonction de deux paramètres : le nombre d'espèces et le nombre d'individus par espèce. Un indice de diversité présente une valeur minimale quand tous les individus appartiennent à la même espèce, et une valeur élevée quand la diversité est élevée.

7.5.1 INDICE DE SHANNON - WIENER

L'indice de Shannon - Wiener (1963) est largement utilisé pour décrire la diversité du phytoplancton et l'état de l'écosystème. La formule est reproduite à la figure 6. L'indice de Shannon - Wiener est utilisé dans des travaux qui concernent l'océan mondial (e.g. Irigoien et al. 2004), diverses régions (e.g. Mer du Nord : Kabuta & Duijts 2000; Méditerranée : Ignatiades et al. 2009; Golfe Persique : Polikarpov et al. 200) ou des expériences réalisées en milieu contrôlé (e.g. Estrada et al. 2003).

Figure 6	Formule de l'indice de Shannon - Wiener utilisée pour décrire la diversité phytoplanctonique (d'après Baan & van Buuren 2003)
----------	---

$$H = -\sum_i P_i \log_2 P_i$$

in which: $P_i = n_i/N$
 n_i = number of individuals of
species i
 N = total number of individuals.

7.5.2 AUTRES INDICES

Dans le cadre de la DCE, Spatharis & Tsirtsis (2010) ont testé 22 indices écologiques sur des données de composition phytoplanctonique de la Mer Egée issues de simulation numérique (Tab 11). Le détail de la simulation figure au point 2.2 du papier. Parmi les indices examinés, l'indice de Menhinick (Menhinick 1964) et trois indices d'équitabilité (E_2 - Sheldon 1969; E_3 - Ludwig & Reynolds 1988 et E_6 - Camargo 2008) ont donné les résultats les plus satisfaisants, montrant un comportement monotone et linéaire dans le gradient d'eutrophisation.

L'indice de Menhinick et l'indice d'équitabilité E_2 ont ensuite été retenus pour caractériser la composition floristique de la Mer Egée. Les résultats montrent que l'utilisation de l'indice de Menhinick conduit à une caractérisation plus optimiste des masses d'eau que l'indice E_2 . Le tableau 12 présente les grilles de qualité (seuils et EQR) développées pour la mer Egée.

Tableau 11 Indices écologiques testés dans les eaux côtières de la Mer Egée (Spatharis & Tsirtsis 2010)

Index type	Index	Formula	Reference
Diversity indices	Margalef	$D = \frac{S-1}{\ln N}$	Margalef (1958)
	Gleason	$D = \frac{S}{\ln N}$	Ludwig and Reynolds (1988)
	Menhinick	$D = \frac{S}{\sqrt{N}}$	Menhinick (1964)
	Simpson's	$D = \frac{\sum_{i=1}^S n_i \times (n_i - 1)}{n \times (n - 1)}$	Ludwig and Reynolds (1988)
	Shannon H'	$H' = -\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{n} \times \ln \frac{n_i}{n}$	Shannon and Weaver (1949)
	Shannon D'	$D' = S - (S \times d')$	Camargo (2008)
	Hill N_0	$N_0 = S$	Ludwig and Reynolds (1988)
	Hill N_1	$N_1 = \exp(H')$	Ludwig and Reynolds (1988)
	Hill N_2	$N_2 = \frac{1}{\text{Simpson's } D}$	Ludwig and Reynolds (1988)
	Odum	$O = \frac{S \times 1000}{N}$	Odum et al. (1960)
	Kothe	$D = \frac{S_{\max} - S_i}{S_{\max}}$	Pielou (1975)
	Hurlbert	$PIE = \left(\frac{N}{N-1} \right) \times \left(1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \right)$	Hurlbert (1971)
	McIntosh	$M = \frac{n - \sqrt{\sum_{i=1}^S n_i^2}}{n - \sqrt{n}}$	McIntosh (1967)
Evenness indices	Evenness E_1	$E_1 = \frac{H'}{\ln S}$	Pielou (1975)
	Evenness E_2	$E_2 = \frac{\exp(H')}{S}$	Sheldon (1969)
	Evenness E_3	$E_3 = \frac{\exp(H') - 1}{S - 1}$	Ludwig and Reynolds (1988)
	Evenness E_4	$E_4 = \frac{1/\text{Simpson's } D}{\exp(H')}$	Ludwig and Reynolds (1988)
	Evenness E_5	$E_5 = \frac{(1/\text{Simpson's } D) - 1}{\exp(H') - 1}$	Ludwig and Reynolds (1988)
	Evenness E_6	$E_6 = 1 - d'$	Camargo (2008)
	Redundancy	$R = \frac{H'_{\max} - H'}{H'_{\max} - H'_{\min}}$	Patten (1962)
Dominance indices	Berger-Parker	$B = \frac{n_1}{n}$	Berger and Parker (1970)
	McNaughton	$\alpha = \frac{n_1 + n_2}{n}$	McNaughton (1967)

The terms used in the formulas are given below:

S =the number of species in a sample or a population.

N =the number of individuals in a population or community.

N_i =the number of individuals in species i of a population or community.

n =the number of individuals in a sample from a population.

n_i =the number of individuals in a species i of a sample from a population.

$p_i = n_i/n$ =the fraction of a sample of individuals belonging to species i .

S_{\max} =the maximum number of species in a sample.

n_1, n_2 =the number of individuals in the two most abundant species. $H'_{\max} = \ln S$ (Pielou, 1975), $H'_{\min} = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{N}{N-1} \right)$ (Pielou, 1975), and $d' = \frac{\sum_{i=1}^K p_i |p_i - p_j|}{S}$ (Camargo, 2008).

Tableau 12 Grilles de qualité et EQR développés pour la DCE dans les eaux côtières de la Mer Egée (Spatharis & Tsirtsis 2010)

Water quality classification schemes and the corresponding Ecological Quality Ratios for Menhinick and evenness E_2 indices, and phytoplankton abundance (N). The existing scale for chlorophyll a by (Simboura et al., 2005) and the proposed Integrated Phytoplankton Index (IPI) are also shown.

Index	High	Good	Moderate	Low	Bad
Menhinick	0.19–0.15	0.15–0.09	0.09–0.05	0.05–0.03	0.03–0.01
$EQR_{\text{Menhinick}}$	1	0.75	0.38	0.13	0
Evenness E_2	0.96–0.77	0.77–0.46	0.46–0.30	0.30–0.21	0.21–0.09
$EQR_{\text{Evenness } E_2}$	1	0.75	0.33	0.12	0
N	1000–4160	4160–31,400	31,400–188,334	188,334–710,470	710,470–10,000,000
EQR_N	1	0.99	0.96	0.73	0
Chl a	<0.10	0.10–0.40	0.40–0.60	0.60–2.21	>2.21
$EQR_{\text{Chl } a}$	1	0.96	0.82	0.73	0
IPI	1	0.90	0.72	0.53	0

Spatharis & Tsirtsis (2010) ont retenu l'indice de Menhinick (1964) et l'indice d'équitabilité E_2 de Sheldon (1969) pour explorer la composition floristique du phytoplancton de la mer Egée. Ils ont exclu l'indice de Shannon, pourtant très largement utilisé, dans l'océan mondial.

8. PISTES POUR LE DEVELOPPEMENT DE NOUVEAUX INDICES DE COMPOSITION

Traditionnellement, l'évaluation de la qualité d'un milieu par l'utilisation d'indices de composition floristique du phytoplancton implique d'importants besoins en personnel spécialisé et en temps (identifications floristiques, comptages au microscope). Depuis deux décennies cependant, des techniques alternatives de détermination pigmentaire par HPLC ou des enregistrements in vivo de profils de fluorescence différentielle (FluoroProbe) permettent une quantification beaucoup plus rapide de la composition floristique globale du phytoplancton. Ces techniques ouvrent la voie au développement de nouveaux outils d'aide à la gestion.

8.1 PIGMENTS PHYTOPLANCTONIQUES MESURES PAR HPLC

8.1.1 PRINCIPES DE LA METHODE

La technique de dosages des pigments par HPLC est une technique rapide (25 minutes à 40 minutes pour une analyse selon la technique choisie) qui permet de séparer et de quantifier les chlorophylles, les phycobiliprotéines et les caroténoïdes. Ces pigments sont présents dans toutes les cellules phytoplanctoniques, mais pas dans la plupart des bactéries, des protozoaires ou des détritus, ce qui permet de distinguer le phytoplancton des autres composants de la communauté microbienne. De plus, ils sont rapidement dégradés après la mort de la cellule, ce qui cible les cellules vivantes et les distingue des cellules mortes (Wright 2005). Enfin, les chlorophylles, les phycobiliprotéines et les caroténoïdes les pigments sont fortement colorés et / ou fluorescents en lumière visible, ce qui permet de les mesurer avec précision;

De par leurs propriétés d'absorption de l'énergie lumineuse dans le visible, les pigments phytoplanctoniques sont à la base du processus de photosynthèse. Grâce à la Chl a, les organismes autotrophes captent l'énergie lumineuse pour la transformer en énergie chimique au cours du processus de photosynthèse. Les pigments accessoires ont des rôles différents selon qu'ils sont photosynthétiques ou non photosynthétiques (Uitz 2006) :

- Les pigments accessoires photosynthétiques collectent l'énergie lumineuse à des longueurs d'onde auxquelles la Chl a n'est pas (ou peu) efficace, puis transmettent cette énergie à la Chl a. La complémentarité des spectres d'absorption de la Chl a et des pigments accessoires photosynthétiques améliore la capacité du phytoplancton à absorber l'énergie lumineuse disponible pour la photosynthèse. Parmi les pigments accessoires photosynthétiques, on trouve notamment les chlorophylles b et divinyl-chlorophylle b, les chlorophylles c_1 , c_2 et c_3 , la péricidine, la fucoxanthine, la 19'-hexanoyloxyfucoxanthine, la 19'-butanoyloxyfucoxanthine ou encore l' α -carotène.
- Généralement, les caroténoïdes non photosynthétiques protègent la Chl a de la photooxydation. Toutefois, le rôle de certains caroténoïdes non photosynthétiques demeure aujourd'hui mal connu (e.g. zéaxanthine, alloxanthine). Parmi l'ensemble des caroténoïdes non photosynthétiques, on trouve par exemple la violaxanthine, la diadinoxanthine, la diatoxanthine, la zéaxanthine, l'alloxanthine et le β -carotène.

8.1.2 INTERETS DE LA METHODE

L'analyse HPLC des pigments phytoplanctoniques est un outil puissant pour la caractérisation du phytoplancton marin et l'étude de la dynamique des communautés :

- la mesure de la chlorophylle *a*, présente dans tous les groupes phytoplanctoniques (à l'exception des prochlorophytes où elle est remplacée par la divinyl-chlorophylle *a*), et de la divinyl-chlorophylle *a* permet de déterminer la biomasse phytoplanctonique totale;
- les pigments varient d'un groupe phytoplanctonique à l'autre et peuvent servir de biomarqueurs de groupes taxonomiques (e.g. diatomées, dinoflagellés, nanoflagellés, cyanobactéries; Tab 13). L'ouvrage de Jeffrey et al. (2005) réunit les références principales dans ce domaine. Les pigments biomarqueurs sont aussi appelés pigments diagnostiques.

La reconstitution de la composition taxonomique à partir de la signature pigmentaire du phytoplancton offre de nombreux avantages. Elle permet :

- de déterminer rapidement les biomasses respectives associées aux différentes classes de taille (microphytoplancton > 20 µM, nanophytoplancton 2 - 20 µM et picophytoplancton < 2 µM (e.g. Vidussi et al. 2000, Uitz et al. 2006) et aux grands groupes fonctionnels (e.g. Smith et al. 2010);
- de quantifier le rôle des différents groupes fonctionnels dans l'émission des gaz à effet de serre (e.g. DMSP : Belviso et al. 2001, Belviso 2004);
- d'établir le statut trophique d'une région en calculant le rapport entre la production nouvelle et la production totale (Fp-ratio : e.g. Claustre et al. 1994, Vidussi et al. 2000, Marty et al. 2002);
- de contribuer à caractériser l'évolution de l'état écologique des masses d'eau (e.g. Paerl et al. 2003).

Tableau 13 Un exemple de pigments diagnostiques utilisés en Méditerranée Occidentale et groupes phytoplanctoniques associés (Vidussi et al. 2000)

Pigment	Taxonomic significance	References
Zeaxanthin	Cyanobacteria and Prochlorophytes	a,b,c,d,e
Dv-chl <i>a</i> , Dv-chl <i>b</i>	Prochlorophytes	d,e
Chlorophyll <i>b</i>	Green flagellates and Prochlorophytes	f,g,h
19'-HF + 19'-BF	Chromophyte nanoflagellates	h,i,j,k,l,m
Alloxanthin	Cryptophytes	m,n
Fucoxanthin	Diatoms	i,j,k,m
Peridinin	Dinoflagellates	m,o

Plusieurs méthodes de calcul, de complexité croissante, permettent de reconstituer la composition phytoplanctonique et de calculer la biomasse des grands groupes présents (diatomées, dinoflagellés, prymnésiofycées, cryptophycées, cyanobactéries, prochlorophytes, ...). Les résultats sont exprimés en équivalents chlorophylle *a* (Chl *a* associée aux diatomées par exemple).

Les deux méthodes les plus simples consistent à 1) utiliser les concentrations en pigments diagnostiques comme traceurs directs (e.g. Marty et al. 2002) et 2) transformer la concentration pigmentaire en biomasse du groupe fonctionnel associé en appliquant des coefficients trouvés dans la littérature pour une région proche (e.g. Goffart et al. 2002). Un pigment est associé à un groupe

d'algues (la fucoxanthine est utilisée comme traceur pour les diatomées, la péridinine est utilisée comme traceur pour les dinoflagellés, la zéaxanthine est utilisée comme traceur pour les cyanobactéries et les prochlorophytes, ...).

Lorsque les sets de données sont suffisants, une analyse de corrélation multiple est appliquée pour déterminer les rapports entre la chlorophylle a et les caroténoïdes marqueurs des principaux groupes d'algues. Ici aussi, un pigment est associé à un groupe d'algues, mais les rapports utilisés sont validés pour la zone d'étude (e.g. Vidussi et al. 2000).

La méthode la plus complexe est celle de CHEMTAX (Mackey et al. 1996). CHEMTAX est un logiciel statistique basé sur une analyse numérique multi-matricielle. Mis au point par des océanographes australiens et développé au départ de données issues de cultures, CHEMTAX offre la possibilité d'évaluer la biomasse des différents groupes sur base de plusieurs pigments par classe d'algues (Tab 14). Il permet de distinguer des groupes qui ont des compositions pigmentaires proches, et fournit des informations plus complètes et plus précises que les deux techniques précédentes. Bien utilisé, CHEMTAX permet par exemple de distinguer plusieurs sous-groupes au sein des haptophycées, une catégorie taxonomique qui rassemble des groupes susceptibles de poser des problèmes écologiques, comme les *Phaeocystis* et les Coccolithophoridés, ce que ne permettent pas les techniques plus simples. Des applications de CHEMTAX sur diverses séries de données de phytoplancton (Antarctique, côtes nord-américaines, Mer du Nord, Méditerranée, estuaires, lacs africains) ont été réalisées (e.g. Latasa et al. 2005, Marty et al. 2008, Hashihama et al. 2008). La mise en œuvre de CHEMTAX dans une région requiert 1) une analyse pigmentaire complète des échantillons, 2) une analyse floristique du phytoplancton total et 3) le choix de rapports pigment / chlorophylle a pour tous les groupes identifiés. En routine, seules les données pigmentaires sont nécessaires.

La rapidité des analyses permet de suivre l'évolution des communautés phytoplanctoniques d'une région à haute fréquence temporelle et de traiter de grandes séries d'échantillons.

De plus, de nouvelles portent s'ouvrent aujourd'hui grâce au couplage des mesures de pigments par HPLC et des mesures satellitaires de la couleur de la mer. Des méthodologies sont mises au point pour déterminer la distribution des différents groupes fonctionnels phytoplanctoniques présents dans les eaux de surface et la répartition des classes de taille à partir des données de couleur de l'océan (e.g. Alvain et al. 2006, Alvain et al. 2008; Fig 7).

8.2 INDICES DE COMPOSITION BASES SUR LA SIGNATURE PIGMENTAIRE

Aujourd'hui, le besoin de développer de nouveaux indicateurs de composition basés sur la signature pigmentaire du phytoplancton est souligné (e.g. Niemi et al. 2004 et Paerl et al. 2006 en Amérique du Nord, Domingues et al. 2008 pour les eaux côtières portugaises). Ces nouveaux indicateurs devraient permettre de corrélér de façon explicite l'enrichissement en sels nutritifs et la réponse des grands groupes fonctionnels et de caractériser les changements des communautés à diverses échelles de temps. Toutefois, la mise au point de ces nouveaux outils en eaux côtières et leur validation restent à faire.

Table 1. Chemotaxonomic photopigments (chlorophylls and carotenoids) diagnostic for phytoplankton functional groups in natural communities, determined from high-performance liquid chromatography.

Algal groups	Photopigments													
	Chlorophyll a	diV-Chl a	Chlorophyll b	diV-Chl b	Chlorophyll c ₁ c ₂	Chlorophyll c ₃	Alloxanthin	Antheraxanthin	β -Carotene	Canthaxanthin	Diadinoxanthin	Diatoxanthin	Echinenone	but-Fucoxanthin
Chlorophytes														
Chrysophytes (Chrysophyta)														
Cryptophytes														
Cyanobacteria (pelagic)														
Cyanobacteria (benthic)														
Diatoms														
Dinoflagellates														
Euglenophytes														
Eustigmatophytes														
Prymnesiophytes (Haptophyta)														
Pelagophytes														
Prasinophytes														
Prochlorophytes														
Raphidophytes (Chloromonads) (Chrysophyta)														
<i>Karenia brevis</i>														

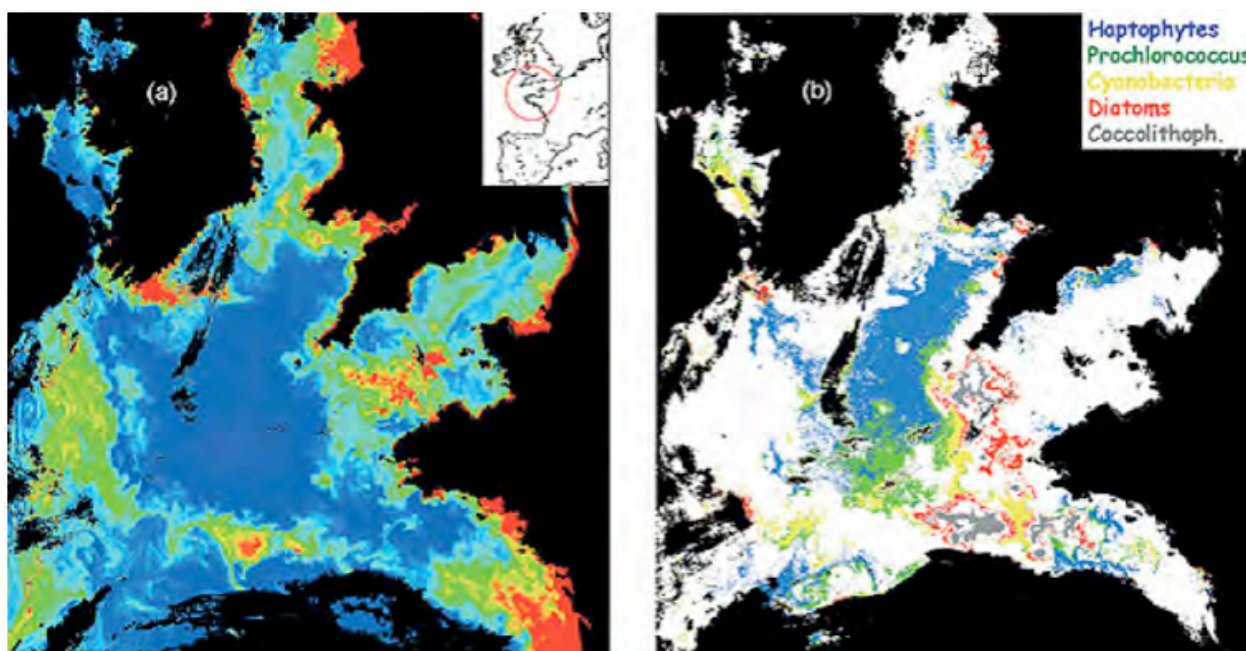
Note: Cross-hatched squares indicate that pigments occur in low concentrations for the algal group; filled squares indicate a major pigment for the group.

8.2.1 INDICES DE DIVERSITÉ ET PIGMENTS HPLC

Pour la première fois, Sherrard et al. (2006) ont travaillé sur un outil associant pigments diagnostiques, composition floristique classique et indices de similarité. Les données HPLC et floristiques d'une série temporelle de 4 ans (2000 – 2003) réalisée en Manche occidentale ont été utilisées. Six indices de similarité ont été appliqués aux mesures HPLC et aux données floristiques, puis les résultats des tests ont été comparés. Une analyse multivariable RELATE (Clarke & Warwick 1994) réalisée à l'aide du logiciel PRIMER² a montré qu'il y a peu de perte d'information quand les données floristiques sont groupées dans des niveaux taxonomiques plus élevés (classes), fournissant de ce fait la justification de l'utilisation des pigments diagnostiques (Tab 15).

² PRIMER : Plymouth Routines In Multivariate Ecological Research version 5 - www.primer-e.com

Figure 7 Interprétation de la variabilité de la couleur de l'océan par la méthode PHYSAT. (a) et (b) : blooms de phytoplancton dans la Manche au printemps. A gauche : concentration en chlorophylle totale. A droite : groupes de phytoplancton diagnostiqués par PHYSAT (S. Alvain http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/biblio/pigb19/06_identifier.htm)



Les auteurs soulignent cependant qu'au-delà de cette étude préliminaire encourageante, des nombreux travaux complémentaires doivent être menés pour aboutir à un indice généralisable à une région.

Tableau 15 Résultats de l'analyse RELATE montrant les coefficients de corrélation de Spearman (espèces vs classes, espèces vs pigments (groupes fonctionnels), classes vs pigments (groupes fonctionnels). Sherrard et al. 2006.

RELATE analysis showing Spearman's rank correlations (r_s) between the three data sets: species biomass, class biomass and pigment concentrations

Correlations between the three data sets	r_s value				
	2000	2001	2002	2003	Pooled Data
Species vs. Class	0.87***	0.91***	0.72***	0.87***	
Species vs. Pigments	ns	0.43***	ns	0.46***	
Class vs. Pigments	ns	0.48***	ns	0.36	0.23***

*** $P < 0.001$, ns = not significant.

Correlations based on Bray-Curtis similarities only.

8.2.2 $F_{\text{PIGMENT RATIO}}$

L'indice pigmentaire (F_p -ratio) a été défini comme étant la fraction de diatomées et de dinoflagellés dans la communauté phytoplanctonique du milieu étudié (Claustre 1994). Il décrit en quelque sorte la structure de la communauté phytoplanctonique et a été proposé comme un analogue du facteur f décrit par Eppley & Peterson en 1979 (part de la production primaire totale sous forme de production nouvelle).

Généralement, les espèces phytoplanctoniques de petite taille (nano- et pico- phytoplancton) sont caractéristiques des zones stratifiées et oligotrophes, alors que les groupes phytoplanctoniques de taille supérieure (diatomées et dinoflagellés) se rencontrent plutôt dans les zones récemment enrichies en sels nutritifs. Les diatomées et les dinoflagellés seraient donc des espèces opportunistes, caractéristiques des systèmes à production nouvelle (Dugdale & Goering 1967), tandis que le nano- et le picophytoplancton caractérisent les systèmes à production de régénération.

Cet indice, facile à calculer à partir des données pigmentaires, est utilisé en océanographie pour décrire l'état trophique d'une région (e.g. Claustre et al. 1994, Vidussi et al. 2000, Marty et al. 2002, Fig 8). Il serait intéressant de le tester dans le cadre de la DCE, tout enrichissement en sels nutritifs d'une région devant entraîner une modification du facteur Fp et donc un écart à la référence.

Figure 8

Formule de calcul du facteur Fp (Claustre 1994) – concentrations en ng l⁻¹

$$\text{Fp - ratio} = (\text{fucoxanthine} + \text{péridinine}) \times (\text{fucoxanthine} + \text{péridinine} + 19'\text{HF} + 19'\text{BF} + \text{zéaxanthine} + \text{Chl b} + \text{alloxanthine})^{-1}$$

De nombreux auteurs soulignent l'intérêt d'utiliser les pigments diagnostiques pour développer des indices de composition. Cependant, à ce jour, aucun indice « Pigments » adapté aux eaux côtières n'est « prêt à l'emploi ». Il serait intéressant de tester l'opérationnalité du facteur Fp défini par Claustre (1994) et utilisé essentiellement en océanographie.

8.3 FLUOROPROBE

La sonde Fluoroprobe est une sonde immergeable qui permet de mesurer in situ et en temps réel la biomasse totale et celles de quatre grands groupes d'algues (chlorophycées; cryptophycées et cyanobactéries riches en phycoérythrine; cyanophycées riches en phycocyanine; diatomées, dinoflagellés et chrysophycées, Rolland 2009). Son fonctionnement se base sur les signatures fluorimétriques spécifiques (excitation – émission des complexes pigmentaires spécifiques) des grands groupes d'algues. Son utilisation est prometteuse (e.g. See et al. 2005) mais doit encore faire l'objet de nombreux développements, particulièrement en eaux côtières où les calibrations peuvent être délicates.

9. INDICATEURS INTEGRES COMPRENANT UN OU PLUSIEURS PARAMETRES PHYTOPLANKTONIQUES

Les travaux menés dans le cadre de la DCE, d'OSPAR (voir § 7.1.1 et 7.1.2) ou liés à la mise en œuvre d'autres réseaux de surveillance de la qualité des eaux côtières aboutissent au développement d'indicateurs intégrés de l'état de l'écosystème qui incluent un ou plusieurs paramètres phytoplanctoniques (Tab 16).

Tableau 16		Principaux indicateurs trophiques, impliquant le phytoplancton		
Région	Nom de l'indicateur	Composantes des indicateurs	Référence	Page du rapport
Adriatique	TRIX	Biomasse (Chl a)	Vollenweider et al. 1998	29
Mer Thyrrhénienne		Oxygène dissous	Giovanardi & Vollenweider 2004	
Golfe du Mexique		Azote et phosphore inorganiques dissous	Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009	
Mer Caspienne			Shahrban & Etemad-Shahidi 2010	
Canada	WQI : Water Quality Index	Coefficient d'extinction de la lumière	Kent 2005	29
Golfe du Mexique		Salinité	Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009	
		Nutriments		
		Biomasse (Chl a)		
Baie de Chesapeake (côte Est des Etats Unis)	P-IBI : Phytoplankton index of Biotic Integrity	12 paramètres (carbone organique dissous biomasse (Chl a et Phaeophytine), biomasse des grands groupes fonctionnels, répartition des classes de taille, abondance de certaines espèces toxiques) 2 saisons 4 gammes de salinité	Lacouture et al. (2006)	29
Mer Egée	IPI : Integrated Phytoplankton Index	Biomasse (Chl a) Abondance (nombre de cellules) Composition et diversité (indice de Menhinick)	Spatharis & Tsirtsis 2010	30

9.1 INDICATEUR TROPHIQUE TRIX

L'indicateur trophique TRIX développé par Vollenweider et al. (1998) est fréquemment utilisé. Il est la combinaison de mesures de chlorophylle *a*, d'oxygène dissous, ainsi que d'azote et de phosphore inorganiques dissous. La formule de calcul est présentée à la figure 8. L'indicateur TRIX a été appliqué entre autres à l'Adriatique (Vollenweider et al. 1998), à la Mer Tyrrhénienne (Giovanardi & Vollenweider 2004), au Golfe du Mexique (Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009) et à la Mer Caspienne (Shahrban & Etemad-Shahidi 2010).

Figure 8 Formule de calcul de l'indicateur TRIX (Vollenweider et al. 1998 dans Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009). K et m sont des coefficients qui fixent la valeur minimale et l'échelle de l'indice (e.g. k = 1,5 et m = 1,2 pour une échelle de 2 à 8.)

$$TRIX = \frac{[\log(Chl-a * \%DO * DIN * P + k)]}{m}$$

9.2 INDICATEUR CANADIEN WQI

L'indicateur canadien WQI (Water Quality Index), mis au point pour les eaux douces, est parfois appliqué aux eaux côtières (Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009). Les paramètres utilisés et la formule de calcul figurent au tableau 17 et à la figure 9.

Tableau 17 Paramètres utilisés pour le calcul de l'indicateur canadien WQI. K = coefficient d'extinction de la lumière incidente, DO : dissolved oxygen, SRP = soluble reactive phosphate, SRSi soluble reactive silicate. D'après Herrera-Silveira & Morales-Ojeda 2009.

Water quality parameter	Non-compliance if;	Q1 (P25)	Q3 (P75)	Unit
K	<>	0.67	1.63	m ⁻¹
Salinity	<>	35.72	37.2	
DO	<>	3.7	7.08	mg l ⁻¹
Chl- <i>a</i>	<>	1.86	6.06	µg l ⁻¹
NO ₃ ⁻	<>	0.71	2.25	µmol l ⁻¹
NO ₂ ⁻	<>	0.07	0.65	µmol l ⁻¹
NH ₄ ⁺	<>	0.1	3.48	µmol l ⁻¹
SRP	<>	0.06	0.38	µmol l ⁻¹
SRSi	<>	5.75	15.1	µmol l ⁻¹

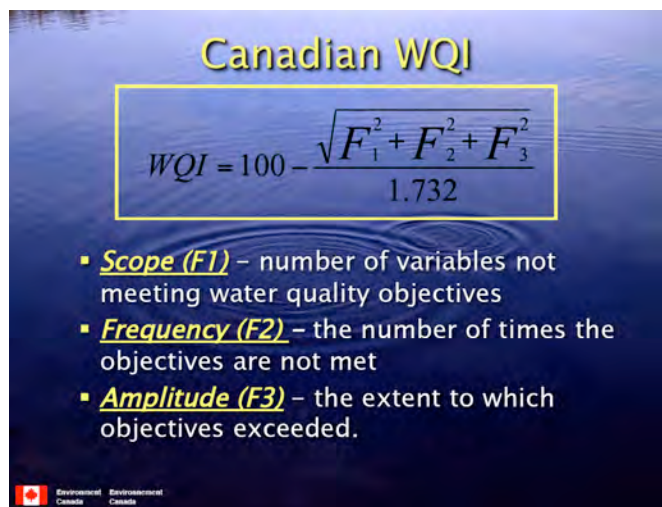
9.3 PHYTOPLANKTON INDEX OF BIOTIC INTEGRITY (P-IBI)

Lacouture et al. (2006) ont développé un indicateur phytoplanctonique complexe pour caractériser la qualité de l'eau de la Baie de Chesapeake (côte Est des Etats Unis). L'indicateur intègre douze paramètres, qui décrivent la biomasse totale (Chl *a*), la concentration en phaeophytine, la biomasse des grands groupes fonctionnels, la répartition des classes de taille, l'abondance de certaines espèces toxiques et la concentration en carbone organique dissous. Des seuils saisonniers sont établis (printemps et été) pour quatre gammes de salinité.

L'indicateur P-IBI n'est pas un indicateur opérationnel.

Figure 9

Formule de calcul de l'indicateur canadien WQI. D'après Kent 2005.

A presentation slide titled "Canadian WQI" with a blue background and a yellow border around the formula. The formula is
$$WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732}$$
. Below the formula, there are three bullet points:

- **Scope (F1)** – number of variables not meeting water quality objectives
- **Frequency (F2)** – the number of times the objectives are not met
- **Amplitude (F3)** – the extent to which objectives exceeded.

 At the bottom left, there is a small Canadian flag and the text "Environnement Canada".

9.4 INTEGRATED PHYTOPLANKTON INDEX (IPI)

Aujourd'hui, l'Integrated Phytoplankton Index (IPI) développé par la Grèce pour la DCE (Spatharis & Tsirtsis, 2010) est un des premiers indicateurs DCE compatible publié. Il associe les indices de biomasse (chlorophylle a), d'abondance (nombre de cellules) et de diversité (indice de Menhinick), chaque indice ayant le même poids dans l'évaluation finale de l'élément de qualité. Les seuils et les EQR de l'IPI sont détaillés dans le tableau 12.

10. PROPOSITION D'INDICATEURS DE COMPOSITION A TESTER SUR LES DONNEES CORSES

La synthèse bibliographique réalisée permet de se rendre compte qu'à l'heure actuelle, très peu d'outils permettent de décrire de façon opérationnelle la composition des communautés phytoplanctoniques des eaux côtières.

Dans le but de développer un indice DCE compatible, il est proposé d'utiliser le jeu de données corses (suivis HPLC haute fréquence réalisés à Calvi dans le cadre de la DCE depuis 2006) pour :

1. réfléchir à la construction d'un indice de composition qui caractérise la succession saisonnière des classes de taille phytoplanctoniques et le tester;
2. tester deux indices décrits dans la littérature :
 - le Fp-ratio décrit par Claustre (1994) - application aux données pigmentaires brutes et traitées par CHEMTAX;
 - l'indice PCI (Phytoplankton Community Index) développé par Tett (2008) - application i) aux données pigmentaires brutes et traitées par CHEMTAX et ii) aux données floristiques extraites de Quadriga (données regroupées en groupes fonctionnels clés à définir; collaboration avec l'Ifremer pour les traitements statistiques).

En fonction des résultats et de l'avancement des réflexions, d'autres essais seront réalisés. Dans tous les cas, les indices devront être validés par des mesures faites dans des régions présentant un gradient d'eutrophisation croissant

11. REFERENCES

- Alvain S., Moulin C., Dandonneau Y., Loisel H. and Breon FM. 2006 A species-dependent bio-optical model of case I waters for global ocean color processing. *Deep Sea Res. I*, 53 : 917-925
- Alvain S., Moulin C., Dandonneau Y. and H. Loisel 2008 Seasonal distribution and succession of fominant phytoplankton groups in the global ocean : a satellite view. *Global Biogeochemical Cycles*, 22 : GB3001, 15 pp
- Anonymus (2008) Common procedure for the identification of the eutrophication status of the OSPAR maritime area – UK national report, London, 67 pp
- Baan and van Buuren (2003) Testing of indicators for the marine and coastal environment in Europe. European Environment Agency, 64 pp + annexes
- Belviso S., Claustre H. and Marty J.C. (2001) Evaluation of the utility of chemotaxonomic pigments as a surrogate for particulate DMSP. *Limnology and Oceanography* 46 : 989–995
- Belviso S. (2004) Représentations de la source océanique de sulfure de diméthyle (DMS) à l'échelle planétaire. Thèse d'habilitation à diriger des recherches. Université d'Aix-Marseille II, Centre d'Océanologie de Marseille, 82 pp
- Borja A., Bald J., Franco J., Larreta J., Muxika I., Revilla M., Germán Rodríguez J., Solaun O., Uriarte A. and Valencia V. (2009) Using multiple ecosystem components, in assessing ecological status in Spanish (Basque Country) Atlantic marine waters. *Marine Pollution Bulletin* 59 : 54-64
- Camargo J.A. (2008) Revisiting the relation between species diversity and information theory. *Acta Biotheoretica* 56 : 275–283
- Carstensen J., Krause-Jensen D., Dahl K. and Henriksen P. (2008) Macroalgae and phytoplankton as indicators of ecological status of Danish coastal waters. National Environmental Research Institute, University of Aarhus, NERI Technical Report n° 683, 90 pp
- Carstensen J. & Henriksen P. (2009) Phytoplankton biomass response to nitrogen inputs: a method for WFD boundary setting applied to Danish coastal waters. *Hydrobiologia* 633 : 137–149
- Clarke K.R. & Warwick R.M. (1994) Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. Plymouth: Plymouth Marine Laboratory
- Claustre H. (1994) The trophic status of various oceanic provinces as revealed by phytoplankton pigment signatures. *Limnology and Oceanography* 39 : 1206-1210

- de Jonge V.N, Elliott M. and Orive E. (2002) Causes, historical development, effects and future challenges of a common environmental problem : eutrophication. *Hydrobiologia* 475/476 : 1–19
- Devlin M., Best M., Coates D., Bresnan E., O'Boyle S., Parke R., Silke J., Cusack C. and Skeatsg J. (2007) Establishing boundary classes for the classification of UK marine waters using phytoplankton communities. *Marine Pollution Bulletin* 55 : 91-103
- Devlin M. (2008) Seasonal succession – new approach for assessment of phytoplankton communities. Bella Earth Environmental Consultancy. Report for Environment Agency (draft July 2008), 38 pp
- Devlin M., Barry J., Painting S. and Best M. (2009) Extending the phytoplankton tool kit for the UK Water Framework Directive: indicators of phytoplankton community structure. *Hydrobiologia* 633 : 151–168
- Domingues R.B, Barbosa A. and Galvão H. (2008) Constraints on the use of phytoplankton as a biological quality element within the Water Framework Directive in Portuguese waters. *Marine Pollution Bulletin* 56 : 1389–1395
- Dugdale R. C. & Goering J.J. (1967) Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnology and Oceanography*, 12 : 196-206.
- ECOSTAT (2004) Working Group discussion paper - Draft Principles of Ecological Status Classification in Relation to Eutrophication v10 22/09/2004, 15 pp
- Eppley R.W. & Peterson B.J. (1979) Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature* 282 : 677– 680
- Estrada M., Berdalet E., Vila M. and Marrasé C. (2003) Effects of pulsed nutrient enrichment on enclosed phytoplankton: ecophysiological and successional responses. *Aquatic Microbial Ecology* 32 : 61-71
- Foden J., Devlin M.J., Mills D.K. and Malcolm S.J. (2010) Searching for undesirable disturbance: an application of the OSPAR eutrophication assessment method to marine waters of England and Wales. *Biogeochemistry*, Published on line 05 June 2010, DOI 10.1007/s10533-010-9475-9, 19 pp
- Giovanardi F. & Vollenweider R. A. (2004) Trophic conditions of marine coastal waters : experience in applying the trophic index TRIX to two areas of the Adriatic and Tyrrhenian Seas. *Journal of Limnology* 63 : 199–218
- Goffart A., Hecq J.H. and Legendre L. (2002) Changes in the development of the winter-spring phytoplankton bloom in the Bay of Calvi (Northwestern Mediterranean) over the last two decades: a response to the changing climate? *Marine Ecology Progress Series* 236: 45-60
- Graham J.E., Wilcox L.W. and Graham L.E. (2008) *Algae* (second edition). Publisher Benjamin Cummings, 720 pp

- Hashihama F., Hirawake T., Kudoh S., Kanda J., Furuya K., Yamaguchi Y. and Ishimaru T. (2008) Size fraction and class composition of phytoplankton in the Antarctic marginal ice zone along the 140°E meridian during February - March 2003. *Polar Science* 2 : 109-120
- Henriksen P. (2009) Reference conditions for phytoplankton at Danish Water Framework Directive intercalibration sites. *Hydrobiologia*, 629 : 255-262
- Herrera-Silveira J.A. & Morales-Ojeda S.M. (2009) Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico : assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Marine Pollution Bulletin* 59 : 72–86
- Ignatiades L., Gotsis-Skretas O., Pagou K. And Krasakopoulou E. (2009) Diversification of phytoplankton community structure and related parameters along a large-scale longitudinal east–west transect of the Mediterranean Sea. *Journal of Plankton Research* 31 : 411-428
- Irigoin X., Huisman J. and Harris R. (2004) Global biodiversity patterns of marine phytoplankton and zooplankton. *Nature* 429 : 863-867
- Jeffrey S.W., Mantoura R.F.C. and Wright S.W. Eds (2005) *Phytoplankton pigments in oceanography : guidelines to modern methods*, 2nd edition. Monographs on Oceanographic Methodology, UNESCO Paris 10 : 667 pp
- Kabuta S. and Duijts H. (2000) Indicators for the North Sea (in Dutch). Report Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ No 2000.022
- Kent R. (2005) National Water Quality Indicator for Canada. <http://unstats.un.org/unsd/environment/envppt/wasess5a6kent.ppt>
- Lacouture V., Johnson J.M., Buchanan C. and Marshall H.G. (2006) Phytoplankton index of biotic integrity for Chesapeake Bay and its tidal tributaries. *Estuaries and Coasts* 29 : 598–616
- Latasa M., Moran X.A.G., Scharek R. and Estrada M. (2005) Estimating the carbon flux through main phytoplankton groups in the northwestern Mediterranean. *Limnology and Oceanography* 50 : 1447–1458
- Ludwig A.J. & Reynolds J.F. (1988) *Statistical Ecology: A Primer on Methods and Computing*. John Wiley and Sons, New York
- Mackey M.D., Mackey D.J., Higgins H.W. and Wright S.W. (1996) CHEMTAX- A program for estimating class abundances from chemical markers : application to HPLC measurements of phytoplankton pigments. *Marine Ecology Progress Series* 144 : 265-283
- Margalef R. (1978) Life forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanologica Acta* 1 : 493–509

- Marty J.C., Chiavérini J., Pizay M.D. and Avril B. (2002) Seasonal and interannual dynamics of nutrients and phytoplankton pigments in the western Mediterranean Sea at the DYFAMED time-series station (1991–1999). *Deep-Sea Research II* 49 : 1965–1985
- Marty J.C., Garcia N. and Raimbault P. (2008). Phytoplankton dynamics and primary production under late summer conditions in the NW Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research I* 55 : 1131– 1149
- Menhinick E.P. (1964) A comparison of some species-individuals diversity indices applied to samples of field insects. *Ecology* 45 : 859–861
- Niemi G., Wardrop D., Brooks R., Anderson S., Brady V., Paerl H., Rakocinski C., Brouwer M., Levinson B. and McDonald M. (2004) Rationale for a new generation of indicators for coastal waters. *Environmental Health Perspectives* 112 : 979-986
- OSPAR Commission (2005a) Common Procedure for the Identification of the Eutrophication Status of the OSPAR Maritime Area - Reference number : 2005-3, 36 pp
- OSPAR Commission (2005b) Synergies between the OSPAR Comprehensive Procedure, the integrated set of OSPAR Ecological Quality Objectives (EcoQOs) for eutrophication and the EC Water Framework Directive. Publication Number 231 : 15 pp
- OSPAR Commission (2008) Eutrophication Status of the OSPAR Maritime Area. Second OSPAR Integrated Report, 108 pp. Publication number : 372/2008
- Paerl H.W., Valdes L.M., Pinckney J.L., Piehler M.F., Dyble J. and Moisander P.H. (2003) Phytoplankton Photopigments as Indicators of Estuarine and Coastal Eutrophication. *BioScience* 53 : 953-964
- Paerl H., Fries S., Luettich Jr., Richard A., Noble R.T., Pinckney, J.L, Valdes L.M. and Wyrick P. (2006) Phytoplankton community structure as an indicator of coastal ecosystem health. EPA Grant Number R828677C001, final report, last updated on Tuesday August 15 2006 http://cfpub.epa.gov/ncer_abstracts/index.cfm/fuseaction/display.abstractDetail/abstract/6127/report/F
- Polikarpov I., Al-Yamani F. and Saburova M. (2009) Space-time variability of phytoplankton structure and diversity in the north-western part of the Arabian Gulf (Kuwait's waters). *BioRisk* 3 : 83–96
- Reynolds C.S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L. and Melo S. (2002) Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research* 24: 417–428
- Revilla M., Franco J., Bald J., Borja A., Laza A., Seoane S. and Valencia V. (2009) Assessment of the phytoplankton ecological status in the Basque coast (northern Spain) according to the European Water Framework Directive. *Journal of Sea Research* 61 : 60–67
- Rolland A. (2009) Dynamique et diversité du phytoplancton dans le réservoir marne (bassin versant de la seine). Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en biologie des populations et des écosystèmes, Université de Savoie, 262 pp

- See J.H., Campbell L., Richardson T.L., Pinckney J.L. and Shen R. (2005) Combining new technologies for determination of phytoplankton community structure in the northern Gulf of Mexico. *Journal of Phycology*, 41 : 305–310
- Simboura N., Panayotidis P. and Papathanassiou E. (2005) A synthesis of the biological quality elements for the implementation of the European Water Framework Directive in the Mediterranean écorégion : the case of Saronikos Gulf. *Ecological Indicators* 5 : 253–266
- Shahrban M. & Etemad-Shahidi A. (2010) Classification of the Caspian Sea coastal waters based on trophic index and numerical analysis. *Environment Monitoring Assessment*, 164 : 349–356
- Shannon C. E. & Weaver W. (1963) *The mathematical theory of communication*. Urbana University Press, Illinois, 117 pp
- Sheldon A.L. (1969) Equitability indices: dependence on species count. *Ecology* 50 : 466–467
- Sherrard N.J., Nimmo M. and Llewellyn C.A. (2006). Combining HPLC pigment markers and ecological similarity indices to assess phytoplankton community structure: an environmental tool for eutrophication ? *Science of the Total Environment* 361 :97–110
- Soudant D. et Belin C (2009a) Evaluation DCE décembre 2008. Élément de qualité phytoplancton. Rapport en 6 tomes Ifremer / DYNECO-Vigies / EMP n° 01 2009 – R.INT.DIR/DYNECO/VIGIES/09-03/DS. http://www.ifremer.fr/dce/2_extranet/index.htm rubrique qualification des masses d'eaux, indicateurs phytoplancton
- Soudant D. & Belin C. (2009b) Evaluation DCE décembre 2008. Élément de qualité : phytoplancton. Rapport IFREMER R.INT.DIR/DYNECO/VIGIES/09-03/DS, 160 pp
- Spatharis S. & Tsirtsis G. (2010) Ecological quality scales based on phytoplankton for the implementation of Water Framework Directive in the Eastern Mediterranean. *Ecological Indicators*, doi:10.1016/j.ecolind.2010.01.005
- Smith W.O. Jr., Dinniman M.S., Tozzi S., DiTullio G.R., Mangoni O., Modigh M. and Saggiomo V. (2010) Phytoplankton photosynthetic pigments in the Ross Sea: patterns and relationships among functional groups. *Journal of Marine Systems* 82 : 177–185
- Tett P., Carreira C., Mills D. K., van Leeuwen S., Foden J., Bresnan E. and Gowen R.J. (2008) Use of a Phytoplankton Community Index to assess the health of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science* 65 : 1475–1482
- Uitz J. (2006). Structure des communautés phytoplanctoniques et propriétés photophysiques dans l'océan ouvert : paramétrisation en vue d'applications à la couleur de l'océan. Thèse de doctorat de l'Université de la Méditerranée - spécialité Sciences de l'Environnement marin – Biogéochimie, 226 pp

- Vidussi F., Marty J.C. and Chiavérini J (2000) Phytoplankton pigment variations during the transition from spring bloom to oligotrophy in the northwestern Mediterranean sea. *Deep-Sea Research* 47 : 423–445
- Vollenweider R.A., Giovanardi F., Montanari G. and Rinaldi R. (1998) Characterization of the trophic condition of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea : proposal for a trophic scale. Turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics* 9 : 329–357
- Weisstein E.W. « Convex Hull » From MathWorld - A Wolfram Web Resource.
<http://mathworld.wolfram.com/ConvexHull.html>
- Wright S.W. (2005) Analysis of phytoplankton populations using pigment markers. Course notes for a workshop « Pigment analysis of Antarctic microorganisms », University of Malaya, June 29 – July 1, 2005, 52 pp