



Des indices pour la définition de l'état des masses d'eau en milieu marin : mises au point, applications et aide à la gestion

Indices to determine the status of marine coastal water bodies: Development, applications and support to management

Sylvie GOBERT^{1,2} & Jonathan RICHIR^{1,3}

Abstract : Four marine water quality indices have been developed in a reference bay in the Mediterranean: a biological quality index for the European Water Directive (Posidonia Rapid and Easy Index, PREI), an invasive species colonization index (Indice *Caulerpa cylindracea*, ICar), a landscape heritage value index (indice Littoral Marin, LIMA) and a pollution index (Trace Element Pollution index, TEPI). These indices have been validated scientifically. The environmental quality they express can be easily visualized by simple codes of colors or combinations of figures-letters positioned on a map. These indices were then applied to larger spatial and/or temporal; their calculation principle can be transposed to other regions and/or ecosystems by setting up reference conditions for the ecosystem, the region investigated.

Keywords: marine water quality indices, biological quality, invasive species, landscape, pollution

Résumé : Quatre indices de qualité des masses d'eau marine ont été mis au point dans une baie-type de référence en Méditerranée: un indice de qualité biologique pour la Directive-Cadre sur l'Eau (PREI), un indice de colonisation par une espèce invasive (ICar), un indice de valeur patrimoniale du paysage (LIMA) et un indice de pollution (TEPI). Ces indices ont été validés scientifiquement. La qualité environnementale qu'ils expriment peut être facilement visualisée par des codes simples de couleurs ou de combinaisons lettres-chiffres positionnés sur une carte. Ils ont ensuite été appliqués à plus larges échelles spatiales et/ou temporelles ; leur principe de calcul peut être transposé vers d'autres régions et/ou écosystèmes moyennant la mise en place de bornes adaptées à l'écosystème, à la région investigués.

Mots-clés: indices de qualité des masses d'eau marines, qualité biologique, espèces invasives, paysage, pollution

INTRODUCTION

Les rivières, les estuaires, les mers, les océans, les abysses forment un continuum, la gestion et l'utilisation durables des masses d'eau continentale ne peuvent pas se passer des connaissances et de la surveillance des eaux océaniques. Comme les écosystèmes dulçaquicoles, les écosystèmes marins sont soumis à des pressions humaines croissantes qui altèrent la qualité de l'eau et ses communautés (HALPERN *et al.*, 2008). Les mers et océans, qui représentent près de 98 % de l'eau de notre planète, constituent le réceptacle final des déchets issus des activités humaines. Les océans, moins accessibles sont méconnus, souvent oubliés ou négligés et considérés comme une zone inépuisable où tout se dilue. Or, plus de 80 % de la pollution des mers (macrodéchets, microplastiques, polluants chimiques,...) provient de la terre à partir des zones urbaines, des activités industrielles et agricoles, qu'elle soit transportée par les fleuves, l'air, le drainage des territoires littoraux ou rejetés par les stations d'épuration (UNITED NATIONS [UN], 2004 ; WORLD WIDE FUND FOR NATURE [WWF], 2015). C'est donc, pour beaucoup, très en amont du littoral que se détermine une part importante de la qualité des eaux côtières et de la haute-mer. A titre d'exemple, 80% des eaux usées sont actuellement encore rejetées sans traitement préalable. Or, les zones côtières procurent des ressources alimentaires, sont des lieux d'habitat et des zones économiques qui font vivre des millions de personnes à travers la pêche, le commerce et le tourisme (WWF, 2015).

¹ Université de Liège, MARE, Focus, Laboratoire d'Océanologie Biologique, Sart Tilman, B6c, 4000 Liège, Belgique (sylvie.gobert@uliege.be)

² Station de Recherche Sous-marines et Océanographiques (STARESO), 20260 Calvi, France

³ Unité d'Océanographie Chimique, Université de Liège, Institut de Physique (B5a), B-4000 Liège, Belgique (jonathan.richir@uliege.be)

Les conséquences de ces pollutions sont nombreuses : les nutriments provoquent des efflorescences d'algues ; les micro et macrodéchets sont ingérés par les organismes de toutes tailles ; les polluants perturbent la physiologie des espèces et se concentrent dans les sédiments et le long des chaînes trophiques jusqu'à l'homme (AMIARD, 2011 ; THOMPSON *et al.*, 2004).

Depuis 2000, en Europe, portés par la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE 2000/60/CE) (ROCHE *et al.*, 2005), pour répondre aux enjeux environnementaux aquatiques, les Régions, Etats et Groupements d'Etats ont mis en place : (i) de nombreux réseaux de surveillance pour qualifier l'état des écosystèmes et leur évolution ; (ii) des initiatives de recherches fondamentales visant à comprendre et quantifier les processus au travers desquels les activités humaines causent les changements écosystémiques observés. Au niveau mondial, des obligations internationales se mettent en place et les pays en développement s'intègrent dans ces réseaux internationaux (MARCHAND, 2013 ; ADAMS *et al.*, 2016).

La mise en place de Directives et de Réseau de Surveillance pour la protection et la gestion des écosystèmes nécessite d'en connaître le statut écologique c'est à dire la qualité de sa structure et/ou de son fonctionnement. Les indices permettent de qualifier les écosystèmes et d'en étudier la variation spatiale et temporelle. Aussi, dans le cadre de la détection de la pollution et de la gestion des milieux marins, ces indices validés scientifiquement permettent de montrer de manière synthétique et rapide, l'état des écosystèmes benthiques et pélagiques. C'est dans cette optique que depuis les années 70s, de nombreux indices ont été développés pour le milieu marins (DIAZ *et al.*, 2004 ; BIRK *et al.*, 2012).

Le but de ce travail de synthèse est de présenter 4 indices mis au point en milieu marin côtier et d'en expliquer leurs champs d'application: un indice de qualité biologique de masse d'eau, un indice de colonisation par une espèce envahissante, un indice paysager (qualité et valeur patrimoniale) et un indice de pollution (teneur en éléments traces).

MATERIEL ET METHODES

Le laboratoire d'Océanologie biologique (ULiège, Belgique, <http://labos.ulg.ac.be/oceanologie/>) s'est activement impliqué depuis une quinzaine d'années dans la mise au point d'indices de la qualité des masses d'eau et des écosystèmes marins côtiers. Ces indices sont construits sur base des connaissances du milieu (description, états et variations naturelles), de la mesure et l'observation des effets des activités anthropiques (*in situ* et en mésocosme) et du suivi des populations d'espèces invasives.

Table 1. Acronyme et nom des 4 indices de qualité biologique (PREI), de colonisation (ICAR), de pollution (TEPI) et de valeur patrimoniale (LIMA), grille de lecture associée (codes couleurs ou combinaisons lettres-chiffres) et zone géographique sur lesquelles les indices ont déjà été appliqués.

Nom de l'indice	Type d'indice	Grille de lecture	Zone géographique	Référence
PREI (<i>Posidonia Rapid and Easy Index</i>)	Indice de qualité biologique d'une masse d'eau	Echelle de qualité biologique en 5 couleurs du rouge (mauvais) au bleu (excellent)	France, Italie, Chypre, Grèce, Tunisie	[1]
ICar (Indice <i>Caulerpa cylindracea</i>)	Indice de colonisation par une espèce envahissante	Un code en 4 lettres - 4 chiffres pour définir le substrat, l'état de colonisation, l'expérience du plongeur	Corse	[2]
LIMA (indice Littoral MARin)	Indice de valeur patrimoniale d'un paysage	Echelle de qualité paysagère en 5 couleurs du rouge (faible) au bleu (exceptionnel).	Corse	[3]
TEPI (<i>Trace Element Pollution Index</i>)	Indice de contamination globale en éléments traces	Echelle de contamination en 5 couleurs, du rouge (très contaminé) au bleu (peu contaminé)	Pourtour méditerranéen (Europe, Afrique), côtes Atlantique nord-africaine, Manche, Irlande	[4]

Références: [1] GOBERT *et al.*, 2009, [2] CARIOU *et al.*, 2013, [3] GOBERT *et al.*, 2014, [4] RICHIR & GOBERT, 2014.

Nos indices sont d'abord mis au point sur des zones peu impactées par l'activité humaine et validés ensuite le long de gradient de pression locale. Ensuite, les indices sont appliqués aux échelles nationales et internationales. Cette approche est possible en Baie de Calvi (Corse, France) à partir de STARESO, station de recherches marines, « Site Observatoire » à proximité du milieu marin qui permet d'assurer une présence

scientifique diversifiée et des observations à haute fréquence en Baie de Calvi reconnue « Site Atelier » en Méditerranée car elle regroupe l'ensemble de écosystèmes type de La Méditerranée nord-occidentale. C'est également un « Site de Référence » en très bon état de conservation avec des impacts anthropiques strictement identifiés.

Les 4 indices présentés dans le cadre de ce travail de synthèse sont un indice biotique : le PREI (*Posidonia Rapid and Easy Index*), un indice de colonisation : l'ICar (Indice *Caulerpa cylindracea*), un indice de qualité paysagère : le LIMA (indice Littoral MARin) et un indice de pollution chimique : le TEPI (*Trace Element Pollution Index*) (Table 1); ils sont illustratifs des travaux menés conjointement par le laboratoire d'Océanologie biologique et de STARESO. Ces indices permettent de définir un état de qualité d'une masse d'eau mais aussi de vérifier son évolution spatiale et/ou temporelle.

La section suivante résume les matériels et méthodes associés au développement de ces 4 indices. La description plus complète est détaillée dans les publications sources (GOBERT *et al.*, 2009; CARIOU *et al.*, 2013; GOBERT *et al.*, 2014; RICHIR & GOBERT, 2014).

Indice PREI

Le PREI est un indice, construit dans le cadre de la DCE, à la demande de la France pour qualifier les masses d'eau côtières de son littoral méditerranéen à partir d'un indicateur biologique (BQE : Biological Quality Element). L'espèce utilisée est *Posidonia oceanica* (L.) Delile, une plante marine endémique en Méditerranée colonisant le substrat entre 0 et 40m de profondeur et largement utilisée comme bioindicateur depuis plus de 20 ans (PERGENT-MARTINI *et al.*, 2005). Cet indice a été construit pour pouvoir être mesuré avec des techniques et du matériel simples (comptage, photographie, mètre ruban, balance).

Le PREI est calculé sur base de la mesure de 5 paramètres (nombre de plants/m², surface foliaire, ratio entre la biomasse des épiphytes et la biomasse des feuilles de la plante, profondeur maximale de la limite inférieure et type de cette limite: régressive, progressive ou stable). Ces 5 paramètres sont influencés par les activités humaines, ils sont comparés à des valeurs de référence considérées comme représentatives d'une zone préservée. Pour un même paramètre, il est nécessaire de définir la valeur de référence en fonction des conditions écologiques naturelles de la région étudiée. L'indice PREI, compris entre 0 et 1 est classé en 5 catégories de statut écologique de couleurs différentes : de mauvais (rouge) à élevé (bleu). Les détails du calcul du PREI sont disponibles dans la publication associée de GOBERT *et al.* (2009). La relation entre les pressions anthropiques et la valeur du PREI a été validée sur plus de 40 stations ($r^2 = 0.742$) (GOBERT *et al.*, 2009).

Indice ICar

Apparues en 1991 en Méditerranée, l'algue *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Sonder) Verlaque, (VERLAQUE *et al.*, 2003) est actuellement qualifiée d'espèce invasive. *Caulerpa cylindracea* colonise le benthos méditerranéen, réduit la biodiversité naturelle et est susceptible de menacer à terme les macroalgues, la posidonie, le coralligène, ... (GRAVEZ *et al.*, 2005; PERGENT *et al.*, 2008).

Nous avons défini un indice paysager ICar à partir de 4 critères: i) le substrat colonisé (qualifié en 7 catégories soit de (Va) vase, (Sa) sable, (Ro) roche, (RA) roche avec algues, (Po) posidonie, (MP) matre morte de posidonie ou (CM) coralligène-maërl); ii) la superficie de la zone colonisée (soit une absence de *C. cylindracea* (S0), soit des tâches colonisées inférieures à 1 m² (S1), soit des tâches colonisées supérieures à 1 m² (S2), soit une prairie continue (S3)); iii) la qualité de la couverture algale (soit une absence de *C. cylindracea* (C0); soit une répartition très irrégulière de l'algue à densité très faible avec une nombre de frondes facile à compter (C1); soit une densité de l'algue plus importante mais avec une répartition irrégulière (C2); soit une densité relativement importante et régulière avec la partie rampante (stolon) en une voire deux couches (C3) ; soit une densité importante et régulière avec la partie rampante en plusieurs couches (stolons se superposant) (C4)) et iiiii) l'expérience du plongeur faisant le relevé : s'il n'a jamais vu la caulerpe (P1), soit il a déjà observé certains indices de couverture de *C. cylindracea* (P2), soit il a déjà observé tous les indices de couverture en *C. cylindracea* (P3). Chaque critère est un sigle à 2 caractères permettant de donner des informations sur le site étudié. Il en résulte donc un code à 8 caractères pour chaque site étudié (CARIOU *et al.*, 2013).

Indice LIMA

Pour améliorer la connaissance de la nature et de la qualité des zones côtières de la Corse, l'Office de l'Environnement corse a initié un programme régional (GUENNOC *et al.*, 2002). L'indice LIMA a été développé dans ce contexte, dans le but de fournir une méthodologie simple, rapide et facilement reproductible pour une évaluation de l'attrait et des espèces patrimoniales riches du benthos méditerranéen dans la zone bathymétrique allant de 0 à 40 m.

L'indice LIMA est calculé sur base de 2 composantes: une description topographique et une description

biologique relevées le long de 3 radiales dans une zone homogène représentative du secteur étudié (GOBERT *et al.*, 2014). La description topographique est classée en 15 typologies différentes (boue, sable, éboulis de petit rochers, tombant, grotte, ...). La description biologique est basée sur 3 indicateurs biologiques: i) espèces remarquables (eg. *Magniophyta*, *Patella ferruginea*), ii) espèces envahissantes (eg. *Caulerpa cylindracea*) et espèces structurantes (eg. *Magniophyta*, *Pinna sp.*), iii) la présence (lorsque la distribution bathymétrique est limitée) ou la fréquence de présence (lorsque la distribution bathymétrique est importante) de 29 espèces ou groupes d'espèces sont prises en compte pour définir la description biologique. Les valeurs d'indice LIMA résultantes, calculées à partir de ces descripteurs, ont des valeurs allant de 0 à 1 et sont divisées en cinq classes allant de «faible richesse patrimoniale, site très peu attractif» (couleur rouge) à «richesse patrimoniale exceptionnelle, site exceptionnel» (couleur bleue).

Indice TEPI

La menace représentée par les rejets anthropiques ou naturels d'éléments traces dans l'environnement nécessite un suivi continu et rigoureux. Or, jusqu'à la publication de l'indice de pollution par les éléments traces (*Trace Element Pollution Index*, ou TEPI) par RICHIR & GOBERT, 2014), il n'existait pas d'outil de suivi satisfaisant permettant d'évaluer dans sa globalité l'état de contamination chimique des masses d'eau. Le TEPI est une version pondérée de l'indice de pollution par les métaux (*Metal Pollution Index*, ou MPI) proposé par USERO *et al.* (1996). Le prétraitement des données effectué est la normalisation par la moyenne (MOREDA-PINEIRO *et al.*, 2001).

Le TEPI permet de différencier les sites globalement peu ou fortement contaminés. Il permet également la comparaison fiable des niveaux de contamination globale en éléments traces entre études environnementales, et ce quelle que soit la liste des contaminants dosés et / ou les espèces bioindicatrices utilisées. Il s'agit là d'améliorations notables par rapport au MPI qui ne permettait que la comparaison de la pollution métallique globale entre sites d'une même étude, pour une espèce bioindicatrice donnée. Une fois les valeurs TEPI calculées, celles-ci peuvent être classées qualitativement selon une échelle de contamination à 5 niveaux, définie selon la méthode des quantiles : de très faible (*Very Low Contamination Level* : VLCL ; couleur bleue) à très haut (*Very High Contamination Level*: VHCL ; couleur rouge) (RICHIR & GOBERT, 2014; RICHIR *et al.*, 2015, a/b).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Mise en œuvre et application du PREI

Le PREI a été testé et validé le long des littoraux méditerranéens français. Des posidonies furent échantillonnées en avril 2007 à 15m de profondeur en respectivement 24 et 18 sites des régions Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) et Corse (Fig. 1). Les 42 sites échantillonnés furent classés en fonction du statut écologique, de élevé (bleu) à pauvre (orange). Les sites les plus impactés étaient situés sur le continent tandis que la Corse restait globalement moins impactée. Ces observations coïncident avec la distribution des activités anthropiques connues le long des côtes françaises de Méditerranée. Ainsi, les deux sites considérés en pauvre état écologique (orange) : Corbière et Villefranche sont particulièrement impactés par la présence de grands centres urbains et zones portuaires. Les sites avec un statut écologique élevé (bleu) sont des sites proches ou au centre de zones avec un statut de protection.

Le PREI fut également testé le long d'un gradient de perturbations : en mai 2010, des posidonies ont été échantillonnées à 8-9m de profondeur le long d'une radiale en 9 stations espacées d'environ 300 m. La radiale, située en fond de baie d'Ajaccio (ouest de la Corse), s'éloignait du port et du centre urbain d'Ajaccio (RICHIR & GOBERT, 2014). L'indice PREI se calcule pour des échantillons prélevés à 15m, soit la profondeur imposée par les textes de la DCE. L'ajustement nécessaire de l'indice est rendu possible par le calcul à différentes profondeurs et saisons de l'indice PREI en un site de référence, soit l'herbier de posidonies en face de la station STARESO. L'indice PREI moyen de la radiale en baie d'Ajaccio se situait proche (mais au-dessus) de la limite entre statuts écologiques pauvres (orange) et modérés (jaune). Une amélioration sensible du statut écologique, sans pour autant changer de classe (modéré) s'observait en s'éloignant le long de ce transect ; et seules 2 stations en début de transect présentaient un statut écologique pauvre. L'indice PREI est une approche fiable pour estimer l'état des herbiers de posidonies et l'état écologique des masses d'eau côtières, et ce à différentes échelles spatiales et temporelles. L'acquisition facile des métriques nécessaires à la détermination du PREI, sa rentabilité, sa robustesse en font un indice d'utilisation facile pour les gestionnaires côtiers (à condition de tenir compte des facteurs de profondeur et de saisonnalité).

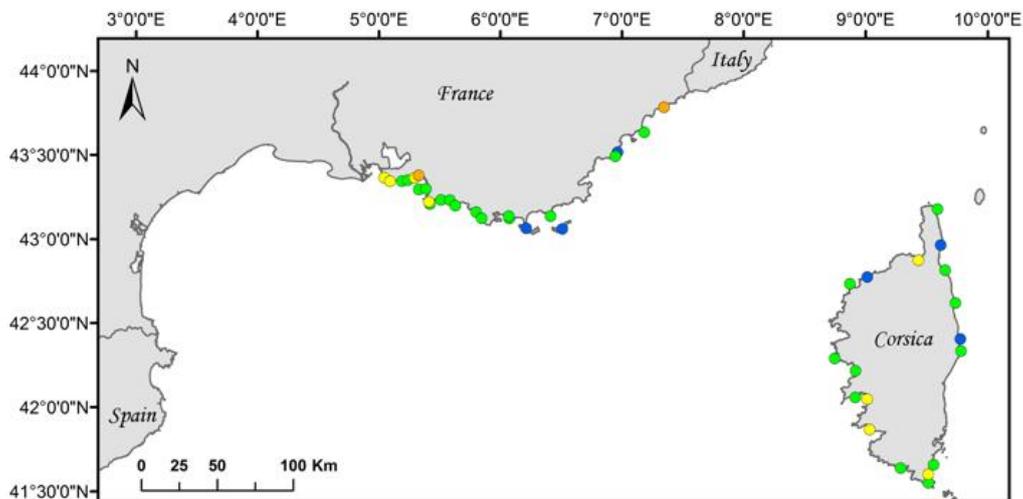


Figure 1. Carte des 42 sites étudiés et échantillonnés en vue de déterminer l'indice PREI, indice de la qualité des eaux le long des littoraux méditerranéens français des districts hydrographiques des régions Provence-Alpes-Côtes d'Azur et Corse. Les 42 sites furent classés dans les catégories de statut écologique pauvre (orange) à élevé (bleu) (projection en lambert-93) (© GOBERT & RICHIR, J.).

Mise en oeuvre et application de ICaR

Depuis 2002, l'algue invasive *C. racemosa* var. *cylindracea* est signalée en Corse (France). En 2008, elle fut observée pour la première fois en Baie de Calvi, au nord-ouest de l'île. Depuis, elle a colonisé la majeure partie de la baie. L'indice ICaR y a été mis en œuvre en 2011 en une série de stations différant par leur substrat : sable, herbier de posidonies et roche et leur profondeur : de 3 à 42 m de profondeur. Il ressort de cette étude que les zones les plus profondes sont les plus densément colonisées par la caulerpe, en des taches d'une superficie supérieure à 1 m². L'analyse de l'expansion de l'algue en une année (entre les années 2011 et 2012) confirme que celle-ci colonise d'abord les sites profonds (COTTALORDA *et al.*, 2008). Ainsi, à la profondeur de 15m en la station Punta Revallata (pointe extrême sud de la baie), la couverture algale passa de « faible, à répartition irrégulière » (stade C2) à « importante, régulière, à stolons sur plusieurs couches » (stade C3) (Fig. 2). A 20 m, en la station B17 (épave coulée d'un bombardier de la seconde guerre mondiale), la couverture algale évolua de même dans ce sens. Le type de substrat ne semble pas être un facteur limitant à son expansion. Elle colonise la matre morte de posidonie, le détritique côtier, les substrats rocheux et sableux, et même l'herbier sain de posidonies.

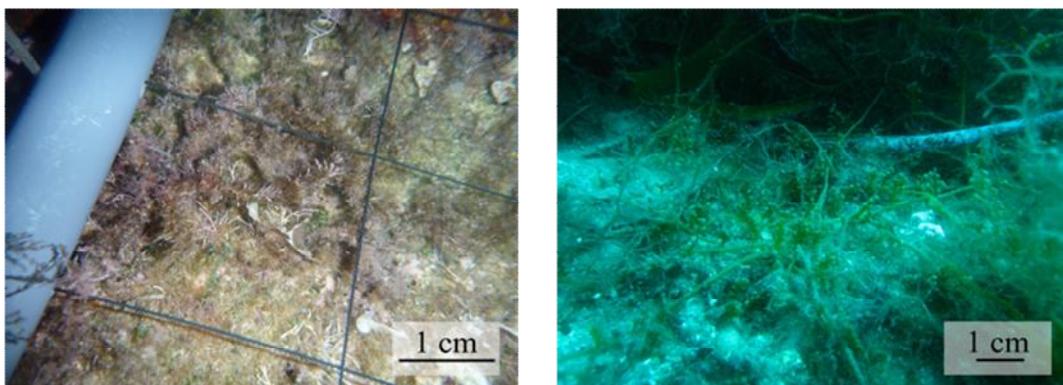


Figure 2. Evolution de l'indice ICaR, indice de colonisation par la *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* à 15m de profondeur entre 2011 et 2012. L'algue envahissante (petites boules vertes portées par un rhizoïde) sur ce site colonise un substrat rocheux et passe d'un stade C2 à C3 (© GOBERT & RICHIR, J.).

Mis au point en Baie de Calvi, l'indice paysager ICar ambitionne d'être appliqué sur tout le pourtour Corse et l'ensemble de la Méditerranée. Cette méthodologie simple fournit un outil qualitatif de l'estimation du niveau de colonisation. Elle permet également de réaliser le suivi spatio-temporel de sa distribution. Mais surtout, cet indice est pensé pour être applicable et utilisable par le plus grand nombre : biologistes marins, gestionnaires de l'environnement littoral ou plongeurs loisir ... Cela est rendu possible via la diffusion d'une plaquette d'identification du statut de colonisation du substrat par la caulerpe (Annexe 1).

Mise en œuvre et application du LIMA

L'indice LIMA a été testé et validé dans la baie de Calvi entre mai et septembre 2005. Huit secteurs ont été sélectionnés dans la baie, et 3 radiales par secteur représentant 24 radiales au total ont été positionnées. L'indice LIMA moyen variait entre secteur de 0.31 (plage de Calvi) à 0.79 (Punta Revelatta). Cette classification rassemble des secteurs à l'attractivité et à la richesse en espèces patrimoniales de faible (orange) à élevé (verts) (Fig. 3). Les faciès topographiques sont de plusieurs types: de grandes étendues de sable couvertes colonisées par des magniophytes dans le secteur de la plage de Calvi à des zones irrégulières et rocheuses (présence de cavités, surplombs, pentes ...) dans le secteur de la Punta Revelatta. Les espèces appartenant à des genres remarquables comme *Cystoseira*, *Epinephelus* et *Palinurus* sont fréquentes dans le secteur de la Punta Revelatta, et les colonies d'*Eunicella* et de *Parazoanthus* sur les pentes et les surplombs le rendent riche et attrayant.

Le classement des 8 secteurs de la Baie de Calvi en fonction de leur richesse et de leur attractivité correspond à l'attrait qu'ils représentent pour les plongeurs sportifs. Cependant, pour les secteurs sableux largement colonisés par les herbiers (*P. oceanica* dans le secteur STARESO, *Cymodocea nodosa* dans le secteur de Calvi), reconnus par les scientifiques comme ayant une grande importance écologique et économique, l'indice LIMA ne permet pas de rendre compte de cette valeur écologique. En effet, les herbiers sont à première vue monotones et peu riches pour les plongeurs non qualifiés. Dans ce type de secteur, le PREI (*Posidonia Rapid Easy Index*) discuté plus en avant, qui décrit l'état d'un herbier donné dans une masse d'eau, est plus adapté. Ces récentes années ont été caractérisées par la colonisation de la Baie de Calvi par l'espèce invasive *C. racemosa* var. *cylindracea* (CARIOU *et al.*, 2013) et l'apparition de proliférations d'algues filamenteuses.

L'indice LIMA a fait état de ces évolutions entre les années 2005 et 2012: les valeurs d'indice des secteurs Punta Revellata et Pointe St-François ont diminué (RICHIR *et al.*, 2015). Ainsi, l'indice LIMA permet une comparaison spatiale des sites mais peut aussi évaluer leur évolution temporelle. Il peut donc être utile pour la caractérisation d'un écosystème par les scientifiques, mais est également en mesure d'aider les autorités compétentes à mettre en place des politiques de protection et de gestion de l'environnement marin côtier. Cet indice, facile à mettre en œuvre, peut également être complété par d'autres indices tels que l'ICar précédemment illustré (CARIOU *et al.*, 2013).

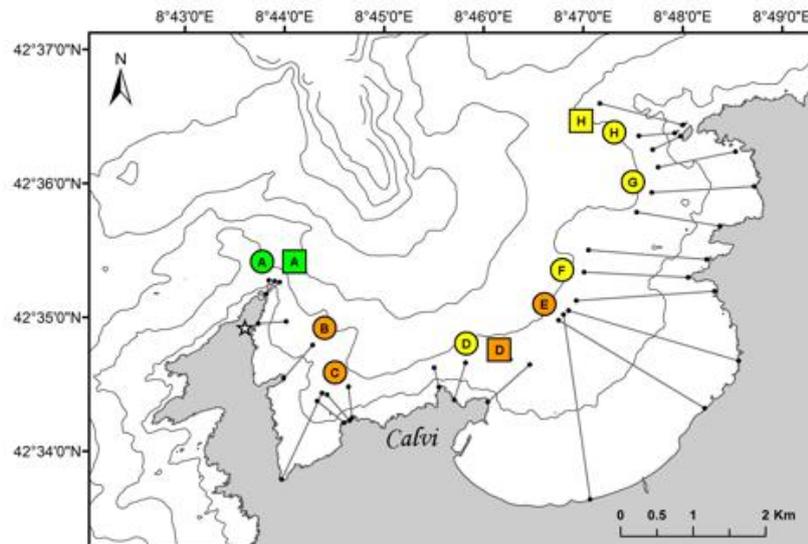


Figure 3. Carte des 8 secteurs prospectés dans la Baie de Calvi (Corse, France) afin de tester et de valider l'indice LIMA, indice paysager : Punta Revellata (A), STARESO (B), Bibliothèque (C), Punta St François (D), plage de Calvi (E), Punta Caldanu (F), Algajo (G) et Punta Spano (H). Trois radiales sont positionnées par secteurs. Les ronds symbolisent l'étude de 2005 ; les carrés l'étude de 2012. Les 8 secteurs furent classés dans les catégories de statut : faible richesse patrimoniale, site peu attrayant (orange) ; richesse patrimoniale moyenne, site attrayant (jaune) ; richesse patrimoniale élevée, site riche (vert). L'étoile localise la Station de Recherches Sous-Marines et Océanographiques STARESO. Les courbes représentent les isobathes 25m (projection en lambert-93) (© GOBERT & RICHIR, J.)

Mise en œuvre et application du TEPI

La posidonie et la moule méditerranéennes *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 sont deux espèces bioindicatrices intégrées depuis longtemps dans les études de suivi de la contamination du littoral méditerranéen par les éléments traces (ANDRAL *et al.*, 2011 ; LUY *et al.*, 2012). BENEDICTO *et al.* (2011) ont surveillé la contamination de la Méditerranée occidentale par le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le mercure (Hg) et le nickel (Ni) dans la chair de moules (surveillance active) déployées en 123 sites côtiers. RICHIR *et al.* (2015) ont échantillonné les feuilles adultes de faisceaux de posidonies en 110 sites sur tout le pourtour méditerranéen (dont 82 sites dans le bassin occidental) afin de surveiller leur contamination notamment en ces 4 métaux ainsi qu'en cuivre (Cu), en argent (Ag) et en arsenic (As) (Fig. 4). Les valeurs TEPI ont été calculées à partir des niveaux d'éléments traces mesurés dans les tissus des 2 espèces.

La posidonie et la moule méditerranéennes répondent à la contamination environnementale par les éléments traces. Par leur biologie: producteur primaire enraciné d'une part et filtreur d'autre part, et leur utilisation: surveillance passive pour l'échantillonnage des herbiers de posidonies ou surveillance active à l'aide de cages à moules, ces deux espèces bioindicatrices se complètent (RICHIR & GOBERT, 2014). La moule est un indicateur de la pollution présente dans la colonne d'eau (LAFABRIE *et al.*, 2007 ; CASAS *et al.*, 2008).

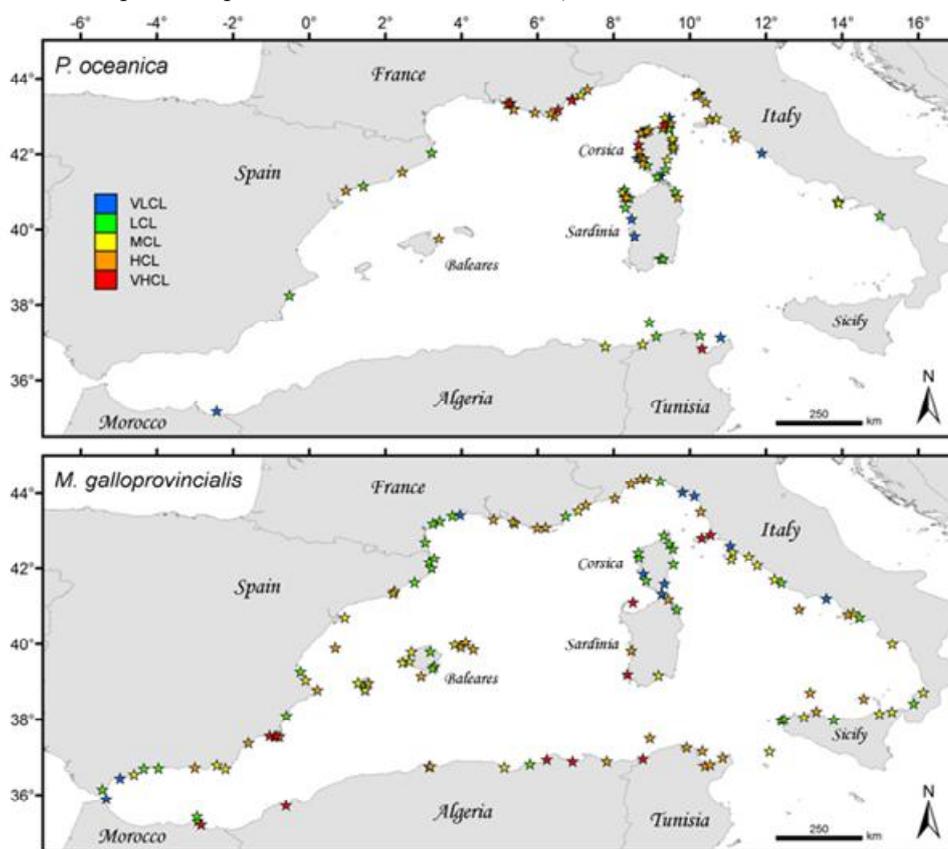


Figure 4. Cartes de la contamination en 7 (Ag, As, Cu, Cd, Hg, Ni, Pb) ou 4 (Cd, Hg, Ni, Pb) éléments traces en 82 (carte du haut) et 123 (carte du bas) sites localisés le long des côtes de 6 pays de la Méditerranée occidentale, exprimée en tant que valeurs d'indice de contamination globale TEPI. Les concentrations en éléments traces ont été mesurées dans les feuilles adultes de posidonies *Posidonia oceanica* et la chair de moules méditerranéennes *Mytilus galloprovincialis*, échantillonnées respectivement entre 2003-2008 et 2004-2006. Les niveaux de contamination vont de très faible (bleu) à très élevé (rouge) (VLCL : Very Low Contamination Level, LCL : Low Contamination Level, MCL : Moderate Contamination Level, HCL : High Contamination Level, VHCL : Very High Contamination Level) (projection en WGS84) (© GOBERT & RICHIR, J.).

L'indice TEPI est, de manière générale, moyen (jaune) pour les moules collectées dans les eaux continentales européennes. Il traduit l'efficacité des normes européennes régissant les rejets de contaminants chimiques dans l'environnement (en particulier les rejets directs le long des littoraux) qui conduisent à la diminution de la contamination par les éléments traces des eaux côtières européennes. La posidonie est un indicateur à long terme des pollutions archivées dans les sédiments côtiers (LAFABRIE *et al.*, 2007). L'indice TEPI médiocre (orange) des posidonies collectées le long des côtes continentales européennes, voire mauvais (rouge) pour la seule côte continentale française est le témoin de ces contaminations passées. La lente amélioration de l'état de santé des sédiments côtiers nécessitera une poursuite de ces politiques de gestion

environnementale sur le long terme. La situation est tout autre le long du littoral nord-africain. L'indice TEPI des moules y est médiocre (orange) à mauvais (rouge) pour la plupart des sites étudiés, traduisant un niveau de contamination certain par les éléments traces de la colonne d'eau. Ces observations devraient être considérées comme un signal d'alarme des menaces environnementales qui pèsent sur ces côtes nord-africaines. De fait, les sédiments, relativement peu contaminés à l'heure actuelle comme l'atteste l'indice TEPI moyen (jaune) à excellent (bleu) des posidonies, risquent de connaître le même devenir néfaste que pour les côtes européennes. Ainsi, l'accumulation progressive des éléments traces dans les sédiments nord-africains conduirait à leur contamination sur le long terme, à moins que l'application de mesures contraignantes de rejets de polluants dans l'environnement ne soit mis concrètement en œuvre par les gouvernements concernés.

CONCLUSIONS

Les indices biologiques, de pollution, de qualité paysagère, que nous avons mis au point, sont utilisés actuellement dans le cadre de la DCE, de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) et dans des réseaux de surveillance en Méditerranée (France, Italie, Chypre, Grèce, Tunisie...) et ailleurs en Europe (WILKES *et al.*, 2017), ils sont un relais et un moyen de communication entre les scientifiques, les politiques et les gestionnaires. Leurs applications sur l'ensemble de la façade méditerranéenne ont, entre autres, mis en évidence l'impact positif de l'application de directives européennes en matière de gestion des eaux par rapport aux côtes du Nord de l'Afrique (carte TEPI, Fig. 4). Les indices paysagers permettent aussi la comparaison de zones géographiques et de vérifier leurs évolutions dans le temps.

Des valeurs seuils sont définies pour alerter les gestionnaires et identifier les politiques à mettre en place (ou non) pour préserver ou améliorer la qualité de l'eau. Ces indices validés scientifiquement sont construits pour être utilisés facilement (temps et coûts réduits) et pour être présentés sous forme de grille facilement lisible (grille en 5 couleurs, code lettres-chiffres) et directement interprétable pour une meilleure diffusion auprès des gestionnaires et politiques.

Ce type d'expertise est exportable en vue de générer des connaissances sur les eaux continentales et côtières pour une gestion durable dans les pays en développement. La première étape de ce transfert de connaissance consiste en la participation à des projets dédiés au développement de compétences communes pour comprendre le fonctionnement des systèmes côtiers. Les données acquises lors de cette première étape permettront la mise en place des bornes des indices et ensuite leur application.

REMERCIEMENTS

Les financements ont été fournis par la Collectivité Territoriale de Corse, le FRS-FNRS (FRFC 2.4.502.08) et la Communauté Française de Belgique (ARC RACE 05 / 10-333). Cette étude fait partie du projet STARECAPMED financé par la Collectivité Territoriale de Corse et par l'Agence Française de l'Eau (PACA-Corse). Cette publication porte le numéro de publication MARE386.

REFERENCES

- ADAMS, J.B., COWIE, M., & VAN NIEKERK, L. 2016. *Assessment of completed ecological water requirement studies for South African estuaries and responses to changes in freshwater inflow* (WRC Report for K5/1703). Pretoria, Sout-Africa: Water Research Commission.
- AMIARD, J.-C. 2011. Les risques chimiques environnementaux. Paris, France: Editions TEC & DOC. 782p.
- AMIARD-TRIQUET, C., AMIARD, J.-C., & MOUNEYRAC, C. 2015. *Aquatic ecotoxicology: Advancing tools for dealing with emerging risks*. Burlington, United States of America: Elsevier Science.
- ANDRAL, B., GALGANI, F., TOMASINO, C., BOUCHOUCHA, M., BLOTTIERE, C., SCARPATO, A., BENEDICTO, J., DEUDERO, S., CALVO, M., CENTO, A., BENBRAHIM, S., BOULAHDID, M. & CHERIF SAMMARI, C. 2011. Chemical contamination baseline in the Western basin of the Mediterranean sea based on transplanted mussels. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 61 (2) : 261-271.
- BENEDICTO, J., ANDRAL, B., MARTÍNEZ-GÓMEZ, C., GUITART, C., DEUDERO, S., CENTO, A SCARPATO, A., CAIXACH, J., BENBRAHIM, S., CHOUBA, L., BOULAHDID, M. & GALGANI, F. 2011. A large scale survey of trace metal levels in coastal waters of the Western Mediterranean basin using caged mussels (*Mytilus galloprovincialis*). *Journal of Environmental Monitoring*, 13 (5) : 1495-1505.
- BIRK, S., BONNE, W., BORJA, A., BRUCET, S., COURRAT, A., POIKANE, S., SOLIMINI, A., VAN DE BUND, W., ZAMPOUKAS, N. & HERING, D. 2012. Three hundred ways to assess Europe's surface waters: An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators* 18 : 31-41.
- CARIOU, N., CHERY, A., JOUSSEAUME, M., RICHIR, J., LEJEUNE, P. & GOBERT, S. 2013. L'indice paysager *Caulerpa racemosa* "I.Ca.r". In Ifremer-AFB (Ed.), *CARTographie des HABitats Marins Benthiques: de l'Acquisition à la Restitution* (pp. 152-157). Actes de colloque. Brest, France.

- CASAS, S., GONZALEZ, J. L., ANDRAL, B. & COSSA, D. 2008. Relation between metal concentration in water and metal content of marine mussels (*Mytilus galloprovincialis*): Impact of physiology. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27 (7) : 1543-1552.
- COTTALORDA, J., GRATIOT, J., MANNONI, P.A., VAUGELAS, J., & MEINESZ, A. 2008. *Suivi de l'invasion des algues introduites Caulerpa taxifolia et Caulerpa racemosa en Méditerranée: Situation devant les côtes françaises au 31 décembre 2007* (E.A. ECOMERS). Nice, France: Laboratoire Environnement Marin Littoral - Université de Nice-Sophia Antipolis publ.
- DIAZ, R.J., SOLAN, M. & VALENTE, R.M. (2004). A review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality. *Journal of Environmental Management*, 73, 165–181.
- GOBERT, S., SARTORETTO, S., RICO-RAIMONDINO, V., ANDRAL, B., CHERY, A., LEJEUNE, P. & BOISSERY, P. 2009. Assessment of the ecological status of Mediterranean French coastal waters as required by the Water Framework Directive using the *Posidonia oceanica* Rapid Easy Index: PREI. *Marine Pollution Bulletin*, 58 : 1727-1733.
- GOBERT, S., CHERY, A., VOLPON, A., PELAPRAT, C. & LEJEUNE, P. 2014. The Seascape as an indicator of environmental interest and quality of the Mediterranean benthos: The *in situ* development of a description index: The LIMA. In O., Musard, Le Dù-Blayo, L., Francour, P., Beurier, J.-P., Feunteun, E., & Talassinis, L. (Eds.), *Underwater Seascape* (pp. 273-287). Switzerland: Springer International Publishing.
- GRAVEZ, V., BOUDOURESQUE, C.F. & RUITTON, S. 2005. *Proposition d'une stratégie de contrôle des espèces envahissantes marines dans les eaux du Parc national de Port-Cros, illustrée par le cas de deux espèces de Caulerpa*. Marseille, France: GIS Posidonie et Parc national de Port-Cros publ. 1-68.
- GUENNOC, P., PLUQUET, F., PALVADEAU, E., EHRHOLD, A. & THERON, M. 2002. *LIMA2 - Cartography of the northern platform of Corsica: Balagne and Agriates* (BRGM/RP-51963-FR).
- HALPERN, B.S., WALBRIDGE, S., SELKOE, K.A., KAPPEL, C.V., MICHELI, F., D'AGROSA, C., BRUNO, J.F., CASEY, K.S., EBERT, C., FOX, H.E., FUJITA, R., HEINEMANN, D., LENIHAN, H.S., MADIN, E.M., PERRY, M.T., SELIG, E.R., SPALDING, M., STENECK, R. & WATSON, R. 2008. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319 (5865) : 948-952.
- LAFABRIE, C., PERGENT, G., KANTIN, R., PERGENT-MARTINI, C. & GONZALEZ, J. L. 2007. Trace metals assessment in water, sediment, mussel and seagrass species: Validation of the use of *Posidonia oceanica* as a metal biomonitor. *Chemosphere*, 68 (11) : 2033-2039.
- LUY, N., GOBERT, S., SARTORETTO, S., BIONDO, R., BOUQUEGNEAU, J.-M. & RICHIR, J. 2012. Chemical contamination along the Mediterranean French coast using *Posidonia oceanica* (L.) Delile above-ground tissues: A multiple trace element study. *Ecological Indicators*, 18 (1) : 269-277.
- MARCHAND, L. 2013. *L'océan sous haute surveillance: Qualité environnementale et sanitaire*. Versailles, France: Editions QUAE. 224p.
- MOREDA-PINEIRO, A., MARCOS, A., FISHER, A. & HILL, S. J. 2001. Evaluation of the effect of data pre-treatment procedures on classical pattern recognition and principal components analysis: A case study for the geographical classification of tea. *Journal of Environmental Monitoring*, 3 (4) : 352-360.
- PERGENT, G., BOUDOURESQUE, C. F., DUMAY, O., PERGENT_MARTINI, C., & WYLLIE-ECHEVERRIA, S. 2008. Competition between the invasive macrophyte *Caulerpa taxifolia* and the seagrass *Posidonia oceanica*: contrasting strategies. *BioMed Central Ecology*, 8 (20) : 1-13.
- PERGENT-MARTINI, C., LEONI, V., PASQUALINI, V., ARDIZZONE, G.D., BALESTRI, E., BEDINI, R., BELLUSCIO, A., BELSHER, T., BORG, J., BOUDOURESQUE, C.F., BOUMAZA, S., BOUQUEGNEAU, J.M., BUJA, M.C., CALVO, S., CEBRIAN, J., CHARBONNEL, E., CINELLI, F., COSSU, A., DI MAIDA, G., DURAL, B., FRANCOUR, P., GOBERT, S., LEPOINT, G., MEINESZ, A., MOLENAAR, H., MANSOUR, H.M., PANAYOTIDIS, P., PEIRANO, A., PERGENT, G., PIAZZI, L., PIRROTTA, M., RELINI, G., ROMERO, J., SANCHEZ-LIZASO, J.L., SEMROUD, R., SHEMBRI, P., SHILI, A., TOMASELLO, A. & VELIMIROV, B. 2005. Descriptors of *Posidonia oceanica* meadows: Use and application. *Ecological Indicators*, 5 : 213–230.
- RICHIR, J. & GOBERT, S. 2014. A reassessment of the use of *Posidonia oceanica* and *Mytilus galloprovincialis* to biomonitor the coastal pollution in trace elements: New tools and tips. *Marine Pollution Bulletin*, 89 : 390-406.
- RICHIR, J., SALIVAS-DECAUX, M., LAFABRIE, C., LOPEZ Y ROYO, C., GOBERT, S., PERGENT, G. & PERGENT-MARTINI, C. 2015. Bioassessment of trace element contamination of Mediterranean coastal waters using the seagrass *Posidonia oceanica*. *Journal of Environmental Management*, 151 : 486-499.
- RICHIR, J., ABADIE, A., BINARD, M., BIONDO, R., BOISSERY, P., BORGES, A., CIMITERA, N., COLLIGNON, A., CHAPENOIS, W., DONNAY, A., FREJEFOND, C., GOBERT, S., GOFFART, A., HECQ, J.H., LEPOINT, G., PELAPRAT, C., PERE, A., SIRJACOBS, D., THOME, J.P., VOLPON, A. & LEJEUNE, P. 2015. STARECAPMED (STation of Reference and REsearch on Change of local and global Anthropogenic Pressures on Mediterranean Ecosystems Drifts): Année 2014. Rapport de recherches, STARESO. 178p.

- ROCHE, P.-A., BILLEN, G., BRAVARD, J.-P., DECAMPS, H., PENNEQUIN, D., VINDIMIAN, E. & WASSON, J.-G. 2005. Les enjeux de recherche liés à la directive-cadre européenne sur l'eau. *Comptes Rendus Geoscience*, 337 : 243–267.
- THOMPSON, R.C., OLSEN, Y., MITCHELL, R.P., DAVIS, A., ROWLAND, S.J., JOHN, A.W.J & RUSSELL A.E. 2004. Lost at sea: Where is all the plastic? *Science*, 304 (5672) : 838.
- UNITED NATIONS 2004, 03, 09. *Reporting material for the Report of the Secretary-General on oceans and the law of the sea to the 59th session of the General Assembly*. Prepared by the Division for Ocean Affairs and the Law of the Sea, Office of Legal Affairs, United Nations.
Retrieved from http://www.un.org/depts/los/general_assembly/contributions59.htm
- USERO, J., GONZÁLEZ-REGALADO, E. & GRACIA, I. 1996. Trace metals in the bivalve mollusc *Chamelea gallina* from the Atlantic coast of southern Spain. *Marine Pollution Bulletin*, 32 (3) : 305-310.
- VERLAQUE, M., DURAND, C., HUISMAN, J.-M., BOUDOURESQUE, C.-F. & LE PARCO, Y. 2003. On the identity and origin of the Mediterranean invasive *Caulerpa racemosa* (Caulerpales, Chlorophyta). *European Journal of Phycology*, 38 : 325- 339.
- WILKES, R., BENNION, M., MCQUAID, N., BEER, C., MCCULLOUGH-ANNETT, G., COLHOUN, K., INGER, R. & MORRISON, L. 2017. Intertidal seagrass in Ireland: Pressures, WFD status and an assessment of trace element contamination in intertidal habitats using *Zostera noltei*. *Ecological Indicators*, 82 :117-130.
- WWF. 2015. Living Blue Planet Report. Species, habitats and human well-being. Tanzer, J., Phua, C., Lawrence, A., Gonzales, A., Roxburgh, T. and P. Gamblin (Eds). WWF, Gland, Switzerland 67p.

ANNEXES

Pages 363 et 364

Indice paysagé *Caulerpa cylindracea* - Icar

Fiche de signalisation

Utilisation de l'indice: pour chaque plongée

Informations sur l'observateur

Nom, prénom:

Tél.:

Fax:

E-mail:

Informations sur la prospection

Localisation du site - ex: lat. 42,58477 - long. 8,72874 (**préciser la projection utilisée**, ex: WGS84)
et/ou nom du site, ex: Pointe de la Revellata

Date de l'observation - ex : 17/07/2011

Profondeur du site - ex: 20m

Indice plongeur - ex: P0

Indice couverture *C. cylindracea* - ex : C3 (si on observe une forte disparité sur la zone, noter les différents indices visibles et si possible les différentes coordonnées GPS)

Type de substrat - ex: SG

Superficie (si présence de *C. cylindracea*) - ex: S2

Ces informations sont à communiquer à la Station de Recherches Sous-Marines et
Océanographiques STARESO: e-mail: stareso@ulg.ac.be
On vous remercie pour votre contribution.

Informations contribuant à déterminer les indices ci-dessous présentées au verso

Indice plongeur:

- jamais vu de la caulerpe: **P0**
- déjà observé certains indices de couverture *C. cylindracea* présentés au verso: **P1**
- déjà observé tous les indices de couverture *C. cylindracea* présentés au verso: **P2**

Indice superficie si présence de *C. cylindracea*:

- spot <1m²: **S1**
- spot >1m² ou plusieurs spots: **S2**
- prairie continue: **S3**

Indice substrat:

- sableux: **Sa**
- sable grossier: **SG**
- rocheux avec algue: **Ra**
- rocheux: **Ro**
- posidonie: **Po**
- matte morte de posidonie: **MP**



échelle: cm

Indice couverture *C. cylindracea*

PS: prendre en compte le nombre de frondes comme indice de densité (et pas la longueur des frondes).

Indice C0: Absence de <i>C. cylindracea</i> .	
Indice C1: Fronde parsemées, répartition très irrégulière de l'algue, densité très faible, nombre de frondes facile à compter.	Indice C2: Densité de frondes plus importante mais répartition de <i>C. cylindracea</i> fort irrégulière.
	
Indice C3: Densité relativement importante et régulière. Partie rampante (stolon) en une voir deux couches.	Indice C4: Densité importante et régulière. Partie rampante en plusieurs couches (stolons qui se superposent).
	