

Direction des Opérations

Laboratoire Environnement Ressources Provence Azur Corse

ACRI-ST, Sophia Antipolis

Nicolas Ganzin – Ifremer / LER-PAC, La Seyne sur mer

Avec la participation de :

Antoine Mangin – ACRI-ST, Sophia Antipolis

Annie Fiandrino – Ifremer / LER-LR, Sète

Julien Demaria – ACRI-ST, Sophia Antipolis

Sylvain Coudray – Ifremer / LER-PAC, La Seyne sur mer

Pierre Garreau – Ifremer / DYNECO-PHYSED, Brest

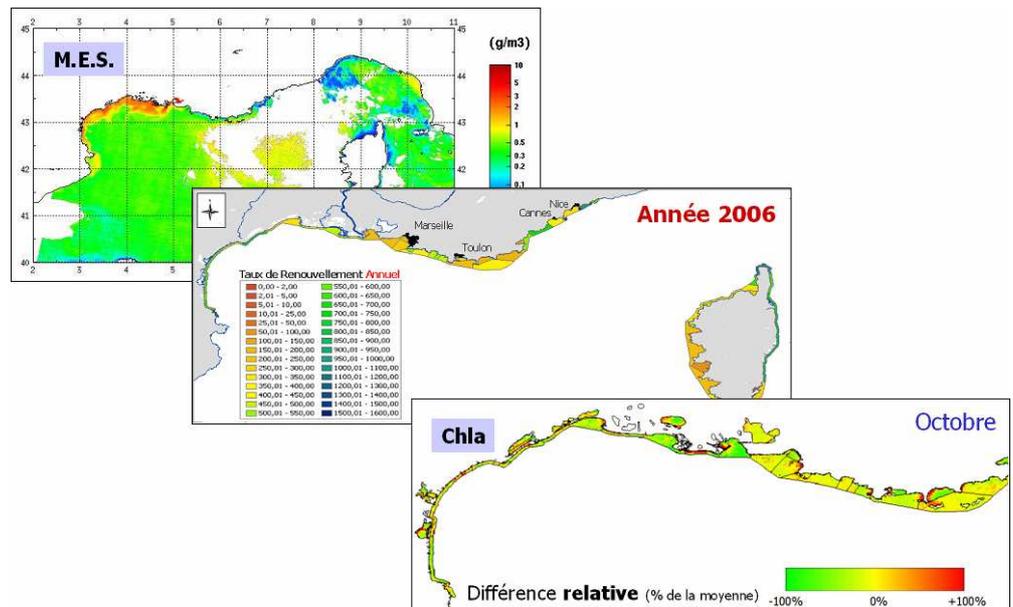
Corinne Tomasino – Ifremer / LER-PAC, La Seyne sur mer

Avril 2010 – RST / LER-PAC / 10 -06



Optimisation de la surveillance des masses d'eau DCE en Méditerranée

Compléments d'utilisation d'imagerie satellite et application d'outils hydrodynamiques



Ifremer



Optimisation de la surveillance des masses d'eau DCE en Méditerranée

Compléments d'utilisation d'imagerie satellite et application d'outils hydrodynamiques

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : RST/LER-PAC/10-06		date de publication : Avril 2010
Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>		nombre de pages : 69
Validé par : B.Andral		bibliographie :
Adresse électronique : bandral@ifremer.fr		illustration(s) :
langue du rapport : Français		
Titre de l'article :		
Optimisation de la surveillance des masses d'eau DCE en Méditerranée - Compléments d'utilisation d'imagerie satellite et application d'outils hydrodynamiques		
Contrat n° 2008 – 0720 Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>		
Auteur(s) principal(aux) :	Organisme / Direction / Service, laboratoire	
Nicolas Ganzin	Ifremer LER / PAC	
Encadrement(s) :		
Cadre de la recherche : convention avec l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (AERM&C)		
Destinataire : AERM&C		
Résumé		
<p>Cette étude vient compléter une précédente étude sur l'utilisation de données spatialisées pour l'optimisation de la surveillance des eaux côtières méditerranéennes dans le cadre de la Directive Européenne cadre sur l'Eau. Cette première étude portait sur la caractérisation de l'état écologique des masses d'eau côtières par les concentrations de surface en Chlorophylle-A (Chl-A) dérivées d'imagerie satellite. La présente étude comporte trois volets : (i) une caractérisation complémentaire des eaux côtières par la matière en suspension (MES) dérivée d'imagerie satellite ; (ii) une caractérisation hydrodynamique des masses d'eau côtières à partir de sorties du modèle hydrodynamique MARS-3D de l'Ifremer, par calcul du taux de renouvellement des eaux, variable indicatrice du potentiel de dilution, donc de la sensibilité à une contamination éventuelle ; (iii) une analyse spatiale sur les données de Chl-A dérivées d'imagerie satellite, analyse qui vise à évaluer la représentativité des points d'échantillonnage dans une masse d'eau. Les résultats sont principalement rendus sous forme d'Atlas cartographiques pour chacun des trois volets de l'étude.</p>		
Abstract		
<p>This study is a complement to a previous study on the use of spatialised data for the optimisation of the surveillance of coastal waters in the Mediterranean within the European Water Framework Directive (WFD). This first study aimed at characterising the ecological status of the coastal water masses through surface chlorophyll-A concentrations (Chl-A) derived from satellite imagery. The present study is focused on 3 main topics (i) a complementary characterisation of coastal waters with Suspended Particulate Matter (SPM) derived from satellite imagery; (ii) a hydrodynamic characterisation of the coastal waters based on outputs from the MARS-3D hydrodynamic model of Ifremer, by computation of the rate of renewal of the waters in each individual water mass defined for the WFD, thus giving an indication of their potential of dilution and therefore their sensitivity to possible contaminations (iii) a spatial analysis on satellite derived Chl-A data aiming at evaluating the representativity of sampling points in a water mass. Results are mainly provided within cartographic Atlases, one for each of the 3 considered topics.</p>		
Mots-clés		
Chlorophylle, imagerie satellite, couleur de l'eau, MERIS, Directive Cadre sur l'Eau, DCE, Méditerranée, Modélisation Hydrodynamique, Taux de Renouvellement, Matière en Suspension		
Key Words		
Chlorophyll, satellite imagery, water colour, MERIS, Water Frame Directive, WFD, Mediterranean, Hydrodynamic modelling, Rate of Renewal, Suspended Matter		

sommaire

1. INTRODUCTION	9
2. CARACTERISATION DES EAUX COTIERES : CONCENTRATION DE SURFACE EN MATIERE EN SUSPENSION INORGANIQUE	11
2.1. MATIERE EN SUSPENSION DERIVEE D'IMAGERIE SATELLITE.....	11
2.1.1. Principe de calcul.....	11
2.1.2. Données MES utilisées pour l'étude.....	12
2.2. VALIDATION DE LA MES AVEC DES DONNEES DE TERRAIN	13
2.3. ATLAS SAISONNIER DE LA MATIERE EN SUSPENSION	14
3. CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DES MASSES D'EAU COTIERES MEDITERRANEENNES	15
3.1. LES SORTIES DE MODELE HYDRODYNAMIQUE MARS-3D ET LE MODELE MENOR	15
3.1.1. Le code de calcul MARS-3D.....	15
3.1.2. Le modèle MENOR.....	16
3.1.3. Eléments de validation du modèle MENOR	16
3.2. TAUX DE RENOUVELLEMENT DES MASSES D'EAU.....	17
3.2.1. Principe de base et outils de traitement.....	18
3.2.2. Atlas du taux de renouvellement des masses d'eau	19
4. ETUDE DE LA REPRESENTATIVITE DES POINTS DE SURVEILLANCE DANS LES MASSES D'EAU DCE	21
4.1. PRINCIPE DE TRAITEMENT ET OUTILS DEVELOPPES	21
4.1.1. La méthode proposée : « P50 – P50m ».....	21
4.1.2. Les outils informatiques spécifiques développés	22
4.2. RESULTATS : ATLAS CHL-A DE LA DIFFERENCE A LA MOYENNE PAR MASSE D'EAU	23
4.3. ANALYSE DE LA REPRESENTATIVITE DES POINTS REPHY ET SOMLIT DE MESURES CHL-A	25
4.3.1. Fenêtres « zoomées » sur les points REPHY ou SOMLIT « Chlorophylle »	26
4.3.2. Synthèse et discussion.....	29
5. SYNTHESE DES RESULTATS ET PERSPECTIVES A COURT TERME	31
5.1. MATIERE EN SUSPENSION.....	31
5.2. HYDRODYNAMIQUE.....	31
5.3. REPRESENTATIVITE DES POINTS DE MESURE CHL-A	32
6. CONCLUSION	33
RÉFÉRENCES	35
ANNEXE 1 : ATLAS DE LA CONCENTRATION DE SURFACE EN MATIERE EN SUSPENSION PAR SATELLITE EN MEDITERRANEE NORD OUEST	37
ANNEXE 2 : ATLAS DE CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE : TAUX DE RENOUVELLEMENT ANNUEL ET MENSUEL DES MASSES D'EAU DCE POUR LA MEDITERRANEE NORD-OUEST	45
ANNEXE 3 : ATLAS DE LA REPRESENTATIVITE DES POINTS DE MESURE CHL-A : CARTES DE L'ECART A LA MOYENNE PAR MASSE D'EAU DE LA CONCENTRATION DE SURFACE EN CHLOROPHYLLE A	51



1. Introduction

Le présent rapport rend compte des activités d'assistance technique de l'Ifremer à l'Agence de l'Eau « Rhône Méditerranée et Corse » (AERM&C) dans le cadre de la Directive européenne Cadre sur l'Eau (DCE), sous la convention AERM&C – Ifremer N° 2008 – 0720. Il fait suite au rapport d'une précédente étude menée dans le même cadre, sous la convention N° 2006 - 1899 et intitulée :

« Optimisation de la surveillance des masses d'eau DCE en Méditerranée - Utilisation de produits dérivés d'images satellites en complément du réseau de mesures in-situ »

Cette première étude s'appuyait sur les produits « couleur de l'eau » **dérivés d'imagerie satellite** à basse résolution spatiale et haute résolution temporelle pour caractériser les eaux côtières de la Méditerranée française dans l'optique DCE. On y prenait en compte le découpage des eaux côtières en « masses d'eau », réalisé pour les besoins de la DCE et dont la répartition est rappelée sur la **figure 1**.

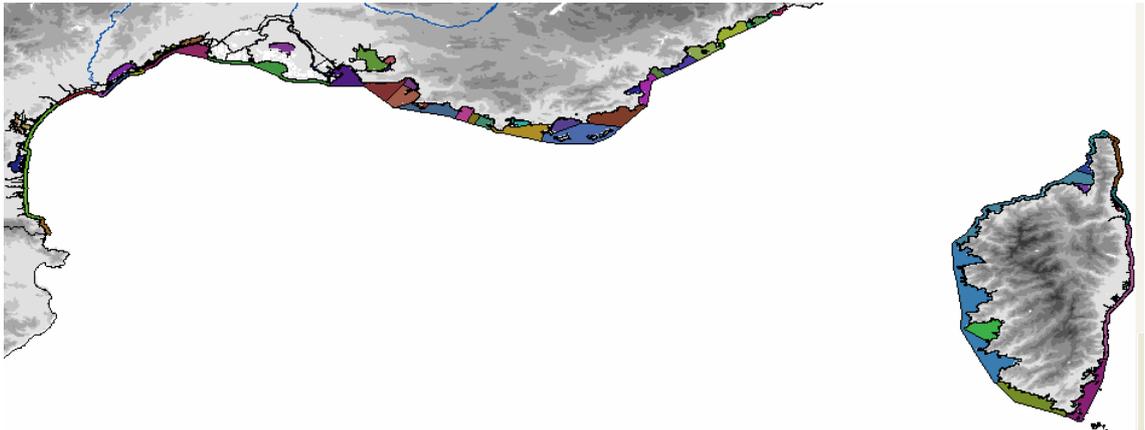


Figure 1 : Les masses d'eau méditerranéennes telles que définies par l'AERM&C et l'Ifremer pour les besoins de la DCE.

Les données satellites utilisées étaient celles fournies au travers du projet Européen MARCOAST par la société ACRI-ST (Sophia Antipolis), avec laquelle les traitements ultérieurs ont été faits, en étroite collaboration. Une intégration dans l'espace et dans le temps de l'importante variable environnementale qu'est la concentration de surface en **Chlorophylle A (Chl-A)** a permis d'obtenir les résultats suivants :

- un atlas de caractérisation « Chl-A » saisonnière des masses d'eau, fabriqué à partir des médianes mensuelles de concentration en Chlorophylle, calculées sur plusieurs années d'images satellites ;
- une caractérisation de l'état écologique des masses d'eau par comparaison au seuil de « bon état » défini pour la DCE pour les différentes « régions » de la méditerranée française, avec des produits cartographiques tel que celui reproduit ici en **figure 2**.

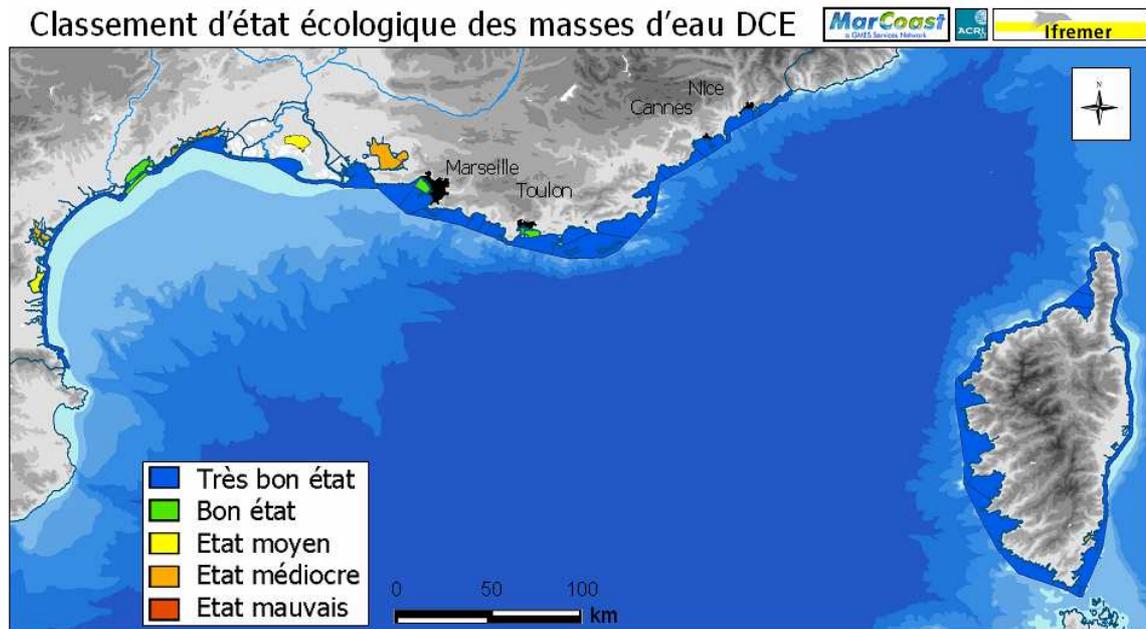


Figure 2 : Classement de l'état écologique des masses d'eau DCE par comparaison du percentile 90 de la concentration de surface en Chl-A à des « seuils de bon état ». Produit obtenu ici à partir de données satellites MERIS de l'année 2004.

Cette nouvelle étude se propose d'aller plus loin dans la caractérisation des eaux côtières en poursuivant l'exploitation de ces données satellites, et en y ajoutant un nouveau type de données : les sorties de **modèles hydrodynamiques**.

Les **données dérivées d'imagerie satellite**, à nouveau traitées en collaboration avec **ACRI-ST**, y sont appliquées de deux façons :

- les estimations de concentration de surface en **matière en suspension inorganique**, considérée comme un bon indicateur de contamination chimique potentielle par les apports fluviaux ou par remise en suspension de sédiments, sont utilisées pour proposer un atlas saisonnier simplifié ;
- les estimations de concentration de surface en **chlorophylle-A** (Chl-A) sont utilisées à nouveau pour compléter les mesures *in situ* et s'efforcer de rendre ainsi plus efficace la surveillance grâce à une analyse spatiale de la représentativité des points ; l'analyse Chl-A de la précédente étude est ainsi approfondie pour cette fois tenter d'optimiser la **localisation** des stations de mesures *in situ* afin qu'elles soient le plus **représentatives** possible de l'ensemble d'une masse d'eau.

Les sorties de **modèles hydrodynamiques** sont exploitées selon une approche similaire à celle appliquée aux images satellites, par intégration dans le temps et dans l'espace. Les développements méthodologiques d'adaptation des méthodes ont été faits en collaboration avec les laboratoires **Ifremer DYNECO** à Brest et **Ifremer LER/LR** à Sète. Toujours sur la base du découpage des masses d'eau, les traitements ont pour objectif d'évaluer la **capacité de renouvellement** des eaux côtières et ainsi de fournir une indication de leur sensibilité aux contaminations éventuelles.

2. Caractérisation des eaux côtières : concentration de surface en Matière en Suspension inorganique

Le traitement d'imagerie satellitaire à basse résolution spatiale (et haute résolution temporelle) permet d'estimer la concentration de surface en Chlorophylle, paramètre reconnu et important de la qualité des eaux côtières (Voir par exemple une application dans Gohin *et al.*, 2008 ; Fanton d'Andon *et al.*, 2005). Il permet aussi d'estimer d'autres paramètres tels que la **matière en suspension** (MES) qui a également son intérêt du fait de son lien avec les rejets fluviaux ou la remise en suspension de sédiments marins, et donc souvent avec les contaminations chimiques ou biologiques associées. Or on dispose, au travers de MARCOAST (ou en interne à l'Ifremer), de données de MES dérivées d'imagerie satellite MERIS ou MODIS sur plusieurs années. Sur la base d'une première expérience du traitement de ce type d'images ainsi que d'outils informatiques spécifiques, il a été possible d'adapter rapidement les techniques appliquées pour la Chl-A et tenter, selon des principes équivalents, de proposer une caractérisation des eaux côtières méditerranéennes du point de vue de la matière en suspension.

La première étape du travail a toutefois consisté en un exercice de validation des données de matière en suspension estimées par satellite pour vérifier leur bonne correspondance avec la réalité. La deuxième étape s'est ensuite attachée à élaborer, comme pour la Chl-A, un atlas de la matière en suspension, annuel pour une caractérisation générale, et mensuel comme référence saisonnière.

2.1. Matière en Suspension dérivée d'imagerie satellite

Les données de Matière en Suspension dérivées d'imagerie satellite font partie, au même titre que la concentration en Chlorophylle A, des données dites « couleur de l'eau ». La concentration de surface en matière en suspension est calculée à partir des réflectances satellites dans le spectre du visible (du bleu au proche infra-rouge). Elle peut être :

- « **totale** » : on parle alors de « Matière En Suspension », MES, avec pour équivalent Anglais «Total Suspended Matter», TSM ;
- « **inorganique** » : on parle alors de « MES Inorganiques » ou en anglais SPIM pour Suspended Particulate Inorganic Matter ; la SPIM est obtenue par suppression de la contribution de la chlorophylle-a à la TSM ;

2.1.1. Principe de calcul

Le principe général du calcul de l'estimation de la concentration des eaux de surface en matière en suspension à partir d'imagerie satellite est, comme pour la chlorophylle, lié aux propriétés optiques de la masse d'eau observée. Les particules en suspension dans l'eau modifient les caractéristiques d'absorption et de rétro-diffusion (principalement) du rayonnement solaire incident, et donc le signal mesuré au niveau des capteurs orbitaux (Froidefond et Doxaran, 2004). De manière générale, la *réflectance* de l'eau augmente avec la quantité de particules en suspension dans toutes les longueurs d'onde du visible. Selon ce principe, des algorithmes empiriques (voir par exemple Nechad et



al., 2003 ; Fettweis *et al.*, 2007 ; Miller et McKee, 2004) ou semi-analytiques (voir par exemple Tommasini *et al.*, 2005) permettent d'estimer la quantité de matière en suspension, totale ou inorganique, à partir de ces *réflectances* satellite.

2.1.2. Données MES utilisées pour l'étude

Les données satellites « couleur de l'eau » utilisées dans cette étude ont été mises à disposition au travers du projet MARCOAST (phase 2) par la société ACRI-ST, qui fournit une estimation quasi journalière de la concentration *totale* en matières en suspensions à partir des données du capteur MERIS de l'agence spatiale Européenne, mais également à partir de produits « merged » utilisant conjointement les capteurs MERIS, MODIS et SeaWiFS (cf. ACRI-ST *et al.*, 2007 : GLOBCOLOUR Product User Guide).

Dans cette étude, seules les données de MES totale générées sur la base de données MERIS ont été utilisées. La **figure 3** montre un exemple d'une image journalière de concentration en MES totale de ce type.

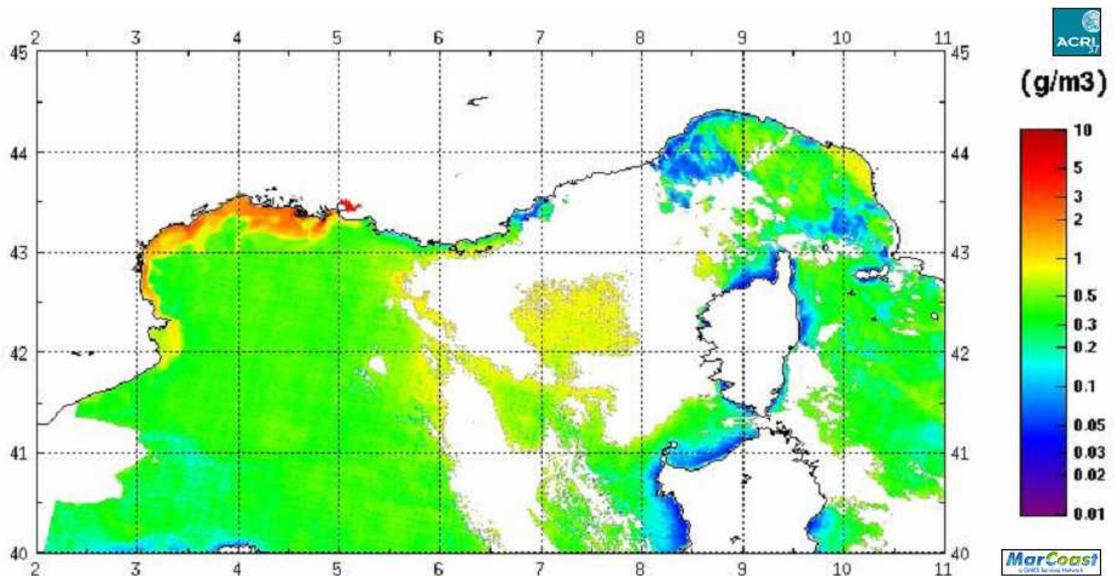


Figure 3 : exemple d'image de concentration de surface en Matière en Suspension dérivée d'imagerie MERIS (Image du 30 octobre 2006) et fournie par ACRI-ST dans le cadre du projet MARCOAST.

Comme pour le calcul de la concentration en Chlorophylle, l'algorithme utilisé prend en compte la notion d'eaux du cas 1 (claires) et du cas 2 (turbides) dans la méthode de calcul (Morel et Prieur, 1977 ; Fanton D'Andon *et al.*, 2005 ; Froidefond et Doxaran, 2004).

On notera que l'équivalent calculé à partir de données américaines MODIS est également mis à disposition en opérationnel par l'Ifremer sur le serveur Nausicaa, mis en place dans le cadre de MARCOAST. Il s'agit dans ce cas de MES *inorganique*, générée grâce à l'algorithme OC5 (Ocean Color 5 canaux, Gohin *et al.*, 2002) proposé par l'Ifremer. Cette donnée n'a toutefois pas été utilisée dans cette étude.

2.2. Validation de la MES avec des données de terrain

Ceci étant la première utilisation des données de MES dérivées d'imagerie satellitaire, la première étape a logiquement consisté en une comparaison des estimations de MES par satellite aux données mesurées disponibles. Celles-ci sont malheureusement peu nombreuses et parfois difficiles à utiliser, ce qui rend le résultat de cet exercice de validation peu concluant. En effet, comme données à comparer aux estimations de MES par satellite, on ne disposait que :

- de données de MES mesurées par le SOMLIT pour 3 stations en Méditerranée;
- de données de *turbidité* mesurées par l'Ifremer pour 11 stations (en mer ou en lagune) dans le cadre du réseau REPHY, et qui ne sont donc pas vraiment des données de matière en suspension mais plutôt une mesure optique ;

L'exercice de validation a, comme dans le cas de la Chlorophylle (Ganzin *et al.*, 2008), consisté à tracer des profils simultanés de la donnée mesurée et de la donnée dérivée d'imagerie satellite. L'analyse se limite à une analyse très générale des niveaux et des tendances d'évolutions saisonnières, la rareté des données concomitantes¹ ne permettant pas de calculer des statistiques telles que les corrélations. Les profils ont été tracés pour les 14 stations disponibles, sachant qu'ils ne sont directement comparables que pour les 3 stations du SOMLIT ou les deux graphiques portent sur la même variable : la MES en grammes par mètre cube. La **figure 2** est un exemple de graphe de comparaison MES/MES pour la station de Banyuls/SOMLIT.

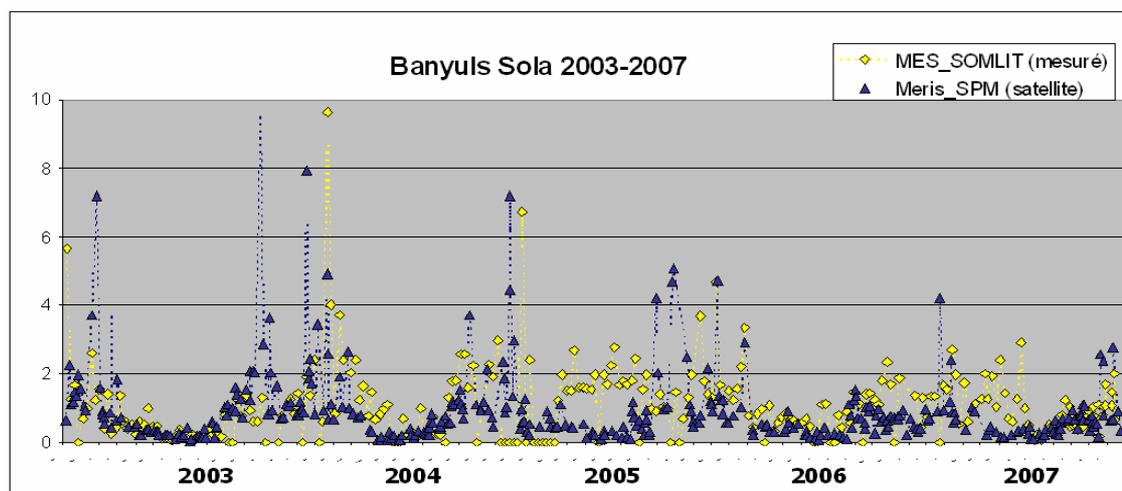


Figure 4 : Exemple de profil de comparaison de MES mesurée et estimée à partir de données satellite MERIS pour la station de Banyuls Sola (Réseau SOMLIT) pour 5 années consécutives.

De manière générale, les résultats ne sont pas très concluants. On voit parfois des tendances d'évolution parallèle, mais cette tendance n'est pas suffisamment claire pour mériter un rendu de l'ensemble des graphes dans ce rapport. L'exemple de la station de Banyuls/SOMLIT (**figure 2**) est celui où les correspondances sont les meilleures. Elles sont beaucoup moins claires sur les autres profils, et en particulier sur les profils où on compare MES et turbidité, donc deux variables liées mais différentes.

¹ Il est en effet rare, dans le jeu de données, d'avoir à la fois la donnée satellite et la donnée *in situ* aux mêmes dates.

2.3. Atlas saisonnier de la Matière en Suspension

Malgré les résultats peu concluants de l'exercice de validation, un atlas simplifié de la concentration de surface en matière en suspension inorganique est fourni en annexe de ce rapport. Sans aller jusqu'à l'analyse approfondie des concentrations par masse d'eau DCE, cet atlas propose, en **annexe 1**, une indication des tendances saisonnières au travers de la médiane mensuelle calculée sur 5 ans de données d'imagerie MERIS fournies par le projet MARCOAST. On y voit bien en particulier l'influence du Rhône, avec des différences saisonnières notables.



3. Caractérisation Hydrodynamique des masses d'eau côtières méditerranéennes

Dans le cadre de la DCE, une caractérisation hydrodynamique des masses d'eau côtières a un intérêt indéniable. Connaître les caractéristiques *courantologiques* des eaux côtières a de multiples applications potentielles, notamment d'évaluer les capacités de renouvellement de l'eau et donc la sensibilité *a priori* d'une masse d'eau aux contaminations éventuelles.

Sur la base de l'expérience du traitement des produits dérivés d'images satellites pour caractériser les eaux côtières, une logique similaire a été appliquée à **l'hydrodynamique**, en utilisant à nouveau la délimitation des masses d'eau de la DCE et en appliquant à nouveau une **intégration dans l'espace et dans le temps**. Les données de base sont cette fois des sorties de modèle hydrodynamique, assez similaires aux données satellites car fournies sous forme de grilles de points géo-référencés. Les variables traitées sont toutefois différentes, puisqu'il s'agit de courants (donc de vitesses), et que ceux-ci sont décrits sur 30 couches. Les techniques de traitement sont donc différentes, bien que s'appuyant partiellement sur les mêmes principes d'analyse spatiale. Elles ont fait l'objet du développement d'outils informatiques dédiés, décrits succinctement dans ce rapport.

Pour plus de détails sur les caractéristiques des données, les méthodes appliquées et les outils développés, on pourra se référer au rapport d'une autre étude (Ganzin *et al.*, 2009) faite également pour le compte de l'AERM&C et focalisée sur la Corse :

« **Vérification des conditions de référence des eaux côtières de Corse - Utilisation de la plate-forme de modélisation** » (Convention N° 2007 – 1742)

3.1. Les sorties de modèle hydrodynamique MARS-3D et le modèle MENOR

3.1.1. Le code de calcul MARS-3D

Le code de modélisation hydrodynamique MARS-3D (*3D hydrodynamic Model for Applications at Regional Scale* –Lazure & Dumas, 2008) de l'Ifremer permet de simuler les principales variables hydrodynamiques d'une zone donnée, avec une résolution donnée. On peut ainsi simuler les courants, ainsi que différentes variables d'état, à savoir l'élévation de la surface, la salinité, et la température. Les calculs sont faits sur une grille régulière recouvrant l'ensemble de la zone considérée, et sur l'ensemble de la colonne d'eau divisée en 30 niveaux « sigma », subdivision régulière en proportion de la hauteur d'eau, avec affinement de la résolution au fond et en surface pour bien représenter la couche de fond et la couche de mélange en surface.

Le modèle prend en compte diverses données en entrée : la bathymétrie, la météorologie (en particulier les vents et la pression atmosphérique), l'apport des fleuves et la circulation générale (par une stratégie d'imbrication dans un modèle de plus grande emprise spatiale).



3.1.2. Le modèle MENOR

Les sorties de modèle utilisées dans cette exercice sont celles obtenues en sortie du modèle **MENOR**, modèle de façade qui couvre la zone « Méditerranée Nord-Ouest », (donc la méditerranée française) avec une cellule de grille de 1,2 kilomètres environ. La **figure 5** ci-après montre un exemple de sortie de modèle MENOR sur son emprise complète pour une instance de calcul en Août 2008.

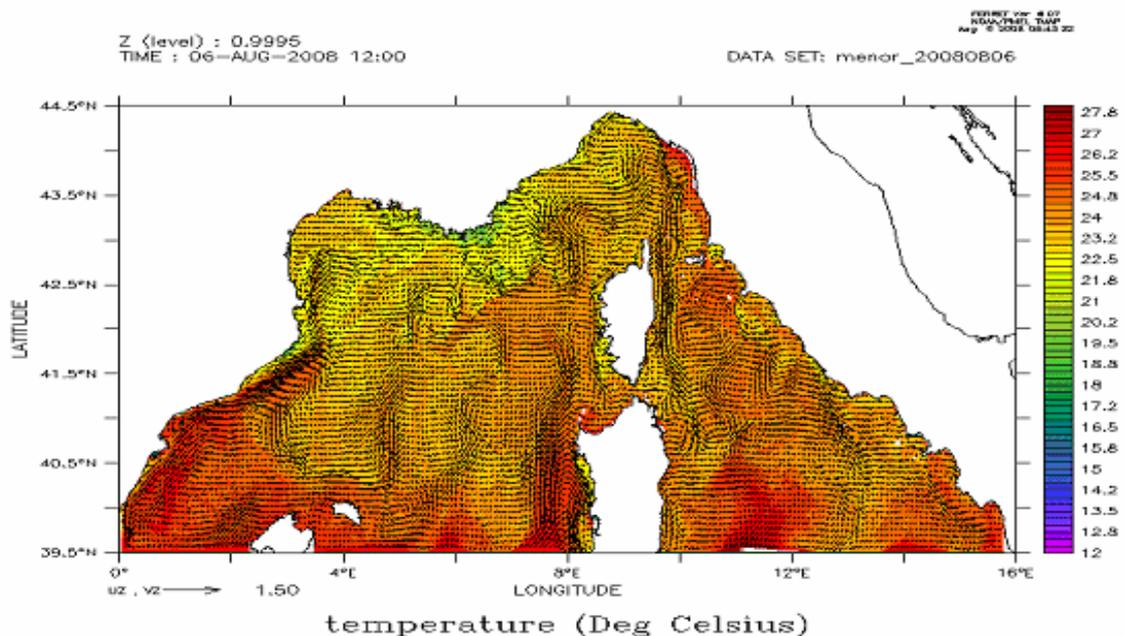


Figure 5 : Exemple de sortie de modèle sur l'Emprise MENOR (Méditerranée Nord-Ouest) - Superposition de la couche de température de surface avec les « vecteurs courants » de surface pour la sortie tri-horaire du 6 août 2008- 12h.

Les données de forçage météorologiques (en particulier les vents) sont issues de simulations atmosphériques à partir du modèle MM5, fournies actuellement par ACRI-ST (Sophia-Antipolis) avec une résolution de 4 km environ.

Les données de conditions aux limites nécessaires pour faire tourner le modèle MENOR sont issues d'un modèle de plus grande emprise couvrant l'ensemble de la Méditerranée, à 7 km de mailles, provenant du projet international MFS/MOON.

A l'heure actuelle, les sorties MENOR sont disponibles en « opérationnel », le système PREVIMER réalisant des simulations MENOR tri-horaires (www.previmer.org).

3.1.3. Eléments de validation du modèle MENOR

Les sorties de modèle MENOR, à 1,2 km de cellule de grille, ont évidemment leurs limites pour les calculs de flux dans des masses d'eau côtières de taille relativement réduite. On peut donc se poser la question de leur validité dans le cadre de cette étude.

En premier lieu, afin de juger de la correspondance des sorties de modèle MENOR avec la réalité de terrain, on citera les activités de validation qui ont été entreprises au sein de l'Ifremer et/ou en collaboration avec d'autres instituts. La validation se fait par comparaison de variables simulées par le modèle Mars-3D, aux mêmes variables obtenues par d'autres voies, par exemple au travers de bouées dérivantes équipées de

matériel de positionnement, d'appareillages de mesures, ou d'imagerie satellite. Ces actions de validation sont en général incluses dans de publications scientifiques.

Une première validation du modèle MENOR a été faite sur la variable Température, avec en particulier l'étude des « upwellings » côtiers dans le Golfe du Lion (Andre et al., 2005). Par comparaison à des données de température de surface (SST : Sea Surface Temperature) dérivées d'imagerie satellite NOAA/AVHRR, l'étude a montré une bonne reproduction de ces « upwellings » en taille et en intensité, tout en soulignant le rôle très important des forçages atmosphériques, et en particulier du vent.

Une autre étude, portant sur le transport des larves d'anchois entre le Golfe du Lion et la mer Catalane (Nicolle et al., 2009) a permis, accessoirement, de montrer sur 8 années de données (2001-2008) la bonne correspondance entre température de surface de la mer simulée par MARS-3D et SST satellite.

Rubio et al. (2009) ont pour leur part effectué une comparaison de trajectoires de bouées océanographiques équipées de matériel de positionnement avec les courants en sortie de modèle sur la partie ouest du Golfe du Lion, avec de bonnes correspondances générales.

André et al. (2009) ont pour leur part fait appel à des données hydrologiques de sondes et de courantomètres Doppler (ADCP²) relevées à l'entrée Est du Golfe du Lion pour valider les sorties de modèle. Une bonne correspondance a en effet été observée entre variables mesurées et simulées de Température, de Salinité et de courants à divers niveaux de profondeur, sur l'ensemble de la colonne d'eau.

Pour des eaux plus côtières et peu profondes, Dufois (2009) a pour sa part utilisé des données ADCP à l'embouchure du Rhône pour comparer des données de courants observées et calculées par le modèle, en trouvant également de bonnes correspondances, et en mettant également en avant, dans le cas des eaux peu profondes, l'effet de la prise en compte de la houle dans le modèle sur la précision de résultats simulés.

En termes de validation, on peut donc dire que, de façon générale, le modèle MARS-3D sur l'emprise MENOR donne de bons résultats dans la simulation de phénomènes hydrodynamiques, bien qu'il reste très certainement des imprécisions dans les résultats. Pour les eaux côtières, en particulier, il est évident que certains phénomènes locaux ne sont pas reproduits de façon satisfaisante à cette échelle et qu'il faudrait des mailles beaucoup plus fines et des données de forçages atmosphériques beaucoup plus précises, ce qui est incompatible avec la couverture de l'ensemble de la Zone MENOR. Néanmoins, pour une étude qui vise à calculer des flux hydrodynamiques aux frontières de masses d'eau, sur des périodes de temps de l'ordre du mois, on peut considérer que les sorties MENOR restituent assez bien les grandes tendances de courants pour que les résultats des calculs soient réalistes.

3.2. Taux de Renouvellement des masses d'eau

Sur la base des variables hydrodynamiques obtenues en sortie de modèle MENOR, on évalue la capacité de dilution d'une contamination éventuelle au travers d'une variable

² ADCP : Automated Doppler Current Profiler. Appareillage fixe pose sur le fond et qui mesure en continu les courants à diverses profondeurs dans la colonne d'eau à la verticale.

calculée pour chaque masse d'eau, son **Taux de Renouvellement (TxR)** pour un temps donné.

3.2.1. Principe de base et outils de traitement

Le principe de calcul du taux de renouvellement d'une masse d'eau est une intégration dans le temps et dans l'espace des courants aux frontières de cette masse d'eau. En d'autres termes, l'approche proposée consiste, pour une masse d'eau donnée et pour une durée donnée (un mois par exemple), à faire le bilan des flux aux frontières de cette masse d'eau. Ce principe de base est résumé dans la **figure 6**.

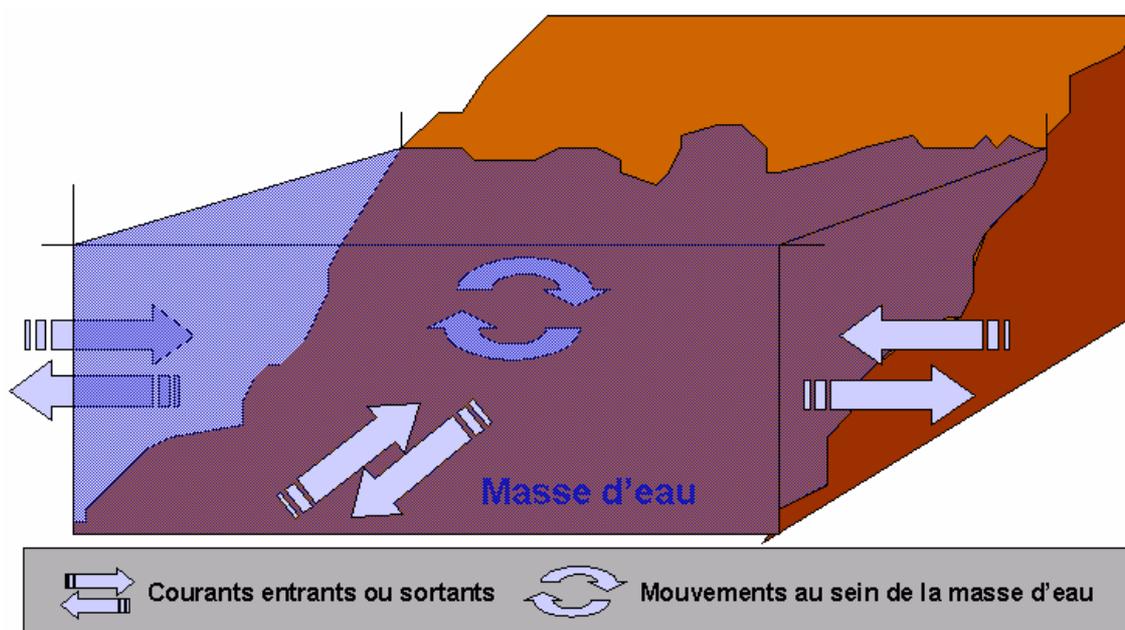


Figure 6 : schéma du principe d'évaluation du taux de renouvellement d'une masse d'eau à partir de sorties de modèle hydrodynamique.

En admettant l'hypothèse de la conservation des volumes (approximation acceptable pour la méditerranée avec de faibles effets de marée), on pourra évaluer le **Taux de Renouvellement (TxR)** à partir de la somme des flux entrants (ou sortants) pour ensuite la comparer au volume de la masse d'eau. Selon ce principe, pour une masse d'eau et pour une période de temps donnée, le TxR sera défini comme :

$$\text{TxR} = \frac{\Sigma (\text{Flux entrants de la période})}{\text{Volume de la masse d'eau}}$$

où Σ symbolise la somme arithmétique pour la période considérée.

Dans la pratique, le calcul du TxR d'une masse d'eau donnée consiste à faire la somme de tous les flux entrants aux travers de mailles « frontières » dans le modèle, mailles identifiées grâce aux limites des masses d'eau. Les données d'entrée sont les courants en sorties de modèle, avec une Composante **U** (Ouest-Est ou Est-Ouest) et une composante **V** (Nord-Sud ou Sud-Nord), la composante verticale **W** étant négligée. Les calculs sont faits grâce à des outils informatiques de traitement développés spécifiquement en étroite collaboration entre les laboratoires LER/LR (Sète) et LER/PAC (Toulon). Ces

utilitaires, qui adaptent des techniques d'analyse spatiale au traitement de flux, consistent principalement en deux modules :

- un programme d'identification (à partir de la couverture géographique des masses d'eau DCE) des mailles « frontières » et de **fabrication des masques** qui seront utilisés pour les repérer par la suite dans les calculs ;
- un programme de **calcul des flux entrants** et du **volume** de chaque masse d'eau sur la base des masques créés précédemment, avec pour résultat final le **Taux de Renouvellement**, par exemple mensuel, dans un format compatible avec les logiciels de SIG pour récupération et intégration à des produits cartographiques (cf. **Annexe 2**).

3.2.2. Atlas du taux de renouvellement des masses d'eau

En utilisant les outils informatiques décrits précédemment, et sur la base des sorties MENOR couvrant l'année 2006, on a généré deux principaux produits :

- le taux de renouvellement **annuel** ;
- les taux de renouvellement **mensuels**.

Les résultats des calculs ont été intégrés à la couverture géographique des masses d'eau côtières (excluant les masses d'eau de transition telles que les lagunes) pour donner lieu à la fabrication de produits cartographiques.

La **figure 7** ci-après présente le **taux de renouvellement annuel**, résumant les caractéristiques hydrodynamiques de l'ensemble des masses d'eau pour l'année 2006, annoté ici des grandes tendances hydrodynamiques de la Méditerranée Nord-Ouest, et également consigné à échelle plus lisible en **annexe 2**.

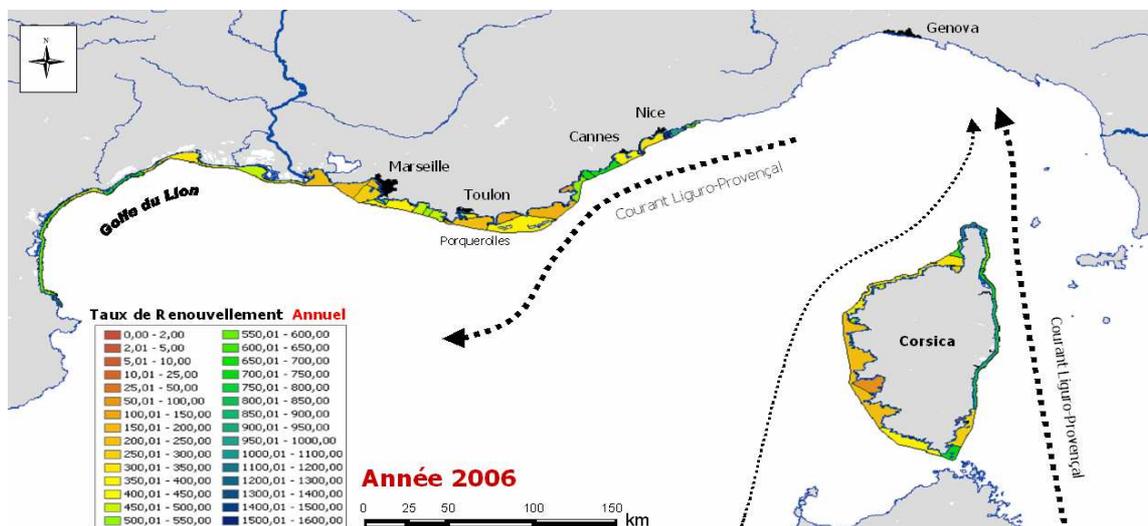


Figure 7 : Taux de renouvellement annuel des masses d'eau DCE obtenu par calcul du bilan annuel des flux au travers des frontières des masses d'eau à partir des sorties de modèle hydrodynamique MARS-3D (emprise MENOR, résolution 1,2km) pour l'année 2006.

On note aisément l'influence des baies et golfes, les zones fermées étant, naturellement, moins bien renouvelées. On détecte aussi quelques grandes tendances, et notamment :

- le renouvellement fort de l'Est Corse par rapport à l'Ouest Corse, correspondant à l'accélération du courant Liguro-Provençal dans la zone moins profonde du canal de Corse ;
- le renouvellement plus fort de l'Est de PACA, sous influence du courant Liguro-Provençal alors que le reste de la côte est moins soumis ; Ouest PACA et le Languedoc sont ainsi moins renouvelés, en moyenne sur l'année ;
- le renouvellement fort de la côte Ouest du Golfe du Lion, non affecté par le courant Liguro-Provençal, et où les courants sont principalement liés au vent ; la côte longiligne, orientée nord-sud, est particulièrement propice à la génération d'un « jet » côtier », d'où le renouvellement fort le long de la côte du Roussillon.

L'Atlas du **taux de renouvellement mensuel** (voir **annexe 2**) montre pour sa part, pour chacun des 12 mois de l'année 2006, des différences saisonnières avec des renouvellements en général plus forts en hiver et plus faibles en été, en relation avec la dynamique des eaux côtières.



4. Etude de la représentativité des points de surveillance dans les masses d'eau DCE

L'hétérogénéité spatiale au sein des masses d'eau individuelles peut avoir des conséquences sur l'efficacité de la surveillance au niveau de stations de mesure. Pour les masses d'eau dans lesquelles se trouve un point « réseau », le choix de la localisation de ce point de relevés ou de mesures est critique, car il peut éventuellement s'y poser :

- un problème de **validité** du point pour représenter l'ensemble de la masse d'eau, avec la possibilité qu'un point existant doive être déplacé vers une localisation plus adaptée ;
- un problème de taux d'échantillonnage, avec la possibilité qu'un seul point ne soit **pas suffisant pour représenter l'ensemble** de la zone si celle-ci est hétérogène.

Un travail a donc été entrepris pour analyser cette notion de **représentativité** d'un point de mesure, en s'appuyant sur la variable environnementale importante qu'est la **concentration en Chlorophylle-A** (Chl-A). Sur une idée originale d'Antoine Mangin (ACRI-ST), une méthode d'analyse spatiale a été développée et a fait l'objet du développement d'outils de traitement spécifiques. Le traitement de données Chl-A dérivées d'imagerie satellite MERIS sur 6 années a permis de générer un Atlas de la représentativité des points, décrit plus en détail dans la suite et présenté en **Annexe 3**.

4.1. Principe de traitement et outils développés

4.1.1. La méthode proposée : « P50 – P50m »

Le principe général de la méthode proposée pour fournir une évaluation de la représentativité d'un point dans l'espace est de calculer la **différence** entre la valeur de la Chl-A au niveau de ce point et la valeur moyenne (ou médiane) de la Chl-A pour **l'ensemble de la zone** (masse d'eau) dans laquelle se trouve ce point.

Comme point de départ du calcul, on se propose d'utiliser le résultat d'une intégration **dans le temps**, par exemple la **médiane** (dite aussi percentile 50 ou « P50 ») **mensuelle** de la Chl-A. A cette valeur, on soustraira la même valeur **intégrée dans l'espace**, sous forme par exemple de la moyenne par masse d'eau, appelée « P50m ». D'où le nom donné à la méthode : « **P50 – P50m** ». Le principe de ce calcul est résumé schématiquement par la **figure 8**.

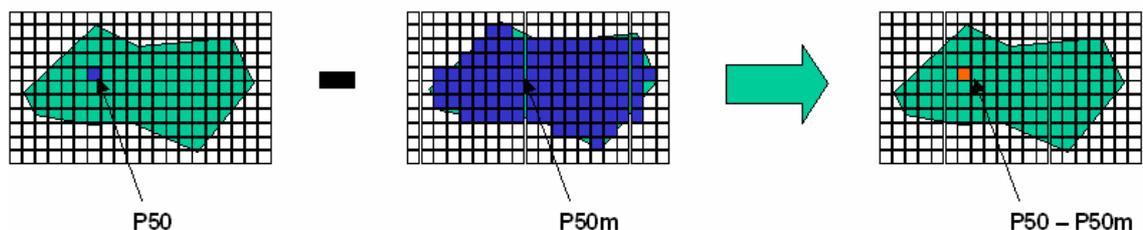


Figure 8 : Schéma du principe de la méthode « P50 – P50m » : calcul de la différence à la moyenne (ou médiane) par masse d'eau

Dans l'image résultante, chaque pixel d'une masse d'eau reçoit pour valeur la différence de la valeur de départ (par exemple la médiane mensuelle de la Chl-A) à la valeur moyenne ou médiane de cette même variable pour la masse d'eau considérée. En raisonnant sur la zone entière, donc la méditerranée française, le principe de cette méthode peut se schématiser plus en détail comme sur **la figure 9** :

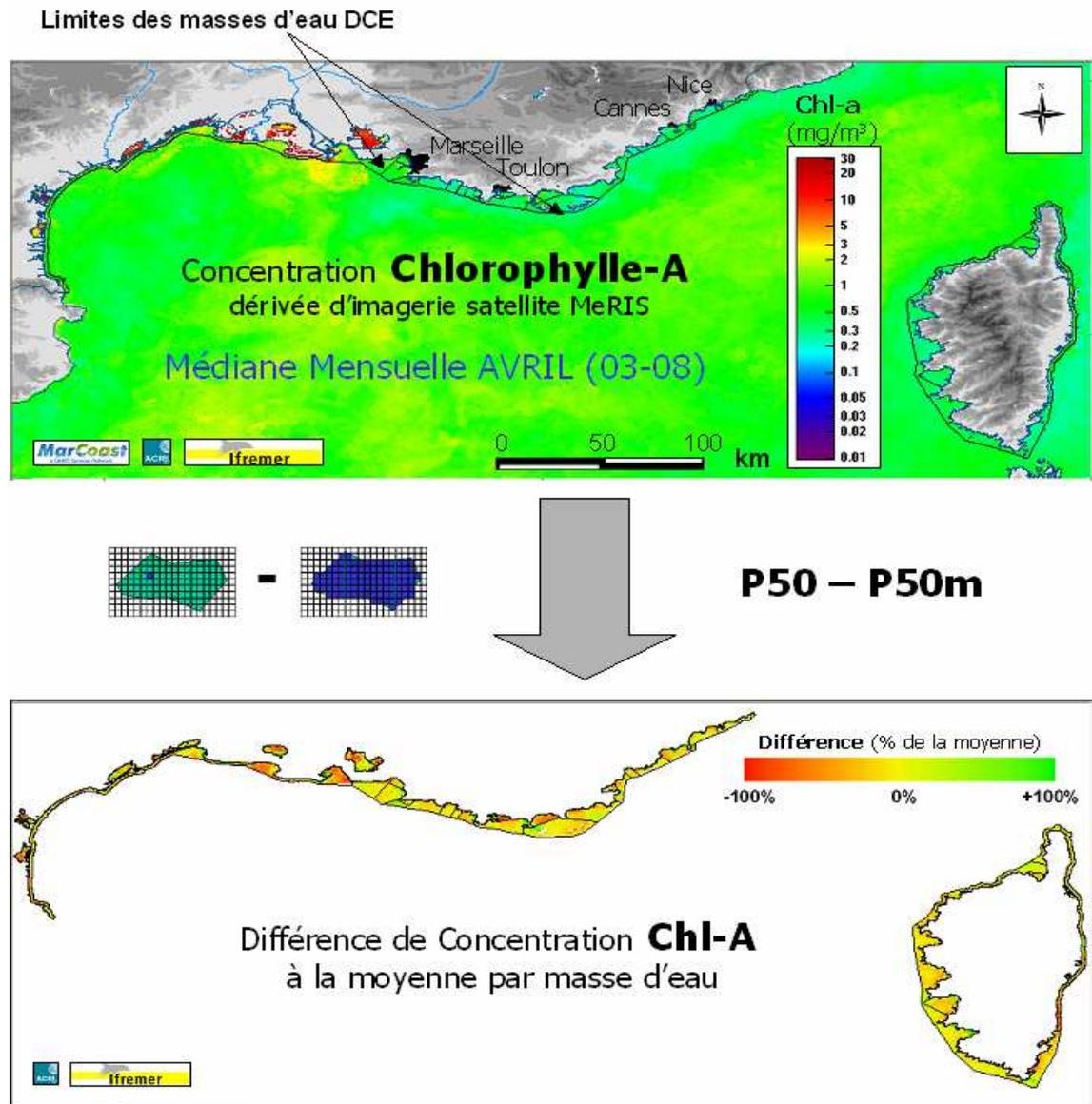


Figure 9 : Principe de calcul « P50-P50m » sur l'ensemble d'une image de la médiane mensuelle Chl-A.

4.1.2. Les outils informatiques spécifiques développés

Bien que la méthode « P50 – P50m » soit assez simple en termes de calcul, elle implique la manipulation d'un grand nombre de fichiers « image » et d'informations annexes. L'analyse spatiale, avec comparaison de chaque pixel à la moyenne (ou médiane) de la masse d'eau est donc assez lourde, et il est difficile d'effectuer les traitements avec des logiciels du commerce. La solution la plus simple pour effectuer ces traitements consiste donc à programmer des outils informatiques de traitement d'images qui permettent d'automatiser et d'optimiser les traitements.

C'est ce qui a été fait en étroite collaboration avec ACRI-ST. En s'appuyant sur la librairie de traitement d'images « Open-Source » GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), plusieurs journées de travail ont été dédiées au développement d'un programme capable de calculer, pour chaque pixel d'une masse d'eau, la différence à la moyenne (ou médiane) de l'ensemble des pixels de la masse d'eau et de stocker le résultat au format image. Le programme comporte des options d'exécution qui permettent de calculer :

- la différence à la **moyenne** par masse d'eau, en **valeur absolue** de concentration en chlorophylle ;
- la différence à la **moyenne** par masse d'eau, en **valeur relative** de concentration en chlorophylle (exprimée en pourcentage de cette moyenne) ;
- la différence à la **médiane** par masse d'eau, en **valeur absolue** de concentration en chlorophylle ;
- la différence à la **médiane** par masse d'eau, en **valeur relative** de concentration en chlorophylle (exprimée en pourcentage de cette moyenne) .

4.2. Résultats : Atlas Chl-A de la différence à la moyenne par masse d'eau

Le résultat des traitements « **P50 – P50m** » a été utilisé comme base de construction d'un atlas cartographique, consigné en **Annexe 3**. Par mesure de simplification, seuls les résultats des traitements selon la seconde option de calcul (différence à la **moyenne** par masse d'eau, en **valeur relative**) sont pris en compte.

Les données de départ sont les résultats d'intégrations temporelles de produits Chl-A fournis dans le cadre de MARCOAST et couvrant 6 années (2003-2008). Il s'agit des images du **percentile 90 Chl-A** pour l'ensemble de l'année, ainsi que des images de **médiane mensuelle Chl-A**³.

L'Atlas est ainsi scindé en deux parties (voir en **annexe 3**) :

- des planches cartographiques détaillées correspondant aux résultats obtenus à partir du P90 annuels sous forme de « zooms régionaux », avec superposition des principaux points de prélèvements d'eau sur le terrain : points du REPHY, de la DCE, du contrôle de surveillance et du contrôle opérationnel (RCS, RCO)⁴ ;
- des planches cartographiques sur l'ensemble de la zone et basées sur les médianes mensuelles pour les 12 mois.

La valeur de la différence à la moyenne par masse d'eau, en valeur relative dans ce cas, y est rendue selon une palette de couleurs suggérant :

- en **vert** des valeurs supérieures à la moyenne;
- en **rouge** des valeurs inférieures à la moyenne;
- en **jaune** des valeurs proches de la moyenne.

³ On pourra se référer au premier Atlas cartographique Chl-A consigné dans la précédente étude pour visualiser ces produits. A noter que dans ce premier Atlas, les intégrations temporelles n'étaient faites que sur 4 années (2003-2006). Elles ont entre temps été mises à jour sur une période plus longue (2003-2008) de par la disponibilité de deux années supplémentaires.

⁴ Il ne s'agit donc ici que des points de prélèvement d'eau, excluant les points de mesures chimiques par capteurs passifs.

La **figure 10** ci-après présente la planche cartographique du « P50 – P50m » calculé à partir du Percentile 90 annuel de la Chl-A, représenté en **valeur relative** (pourcentage de la moyenne), et sur l'ensemble de la zone « Méditerranée nord-ouest » couvrant les côtes françaises, avec en surimpression la localisation des stations de mesure de chlorophylle.

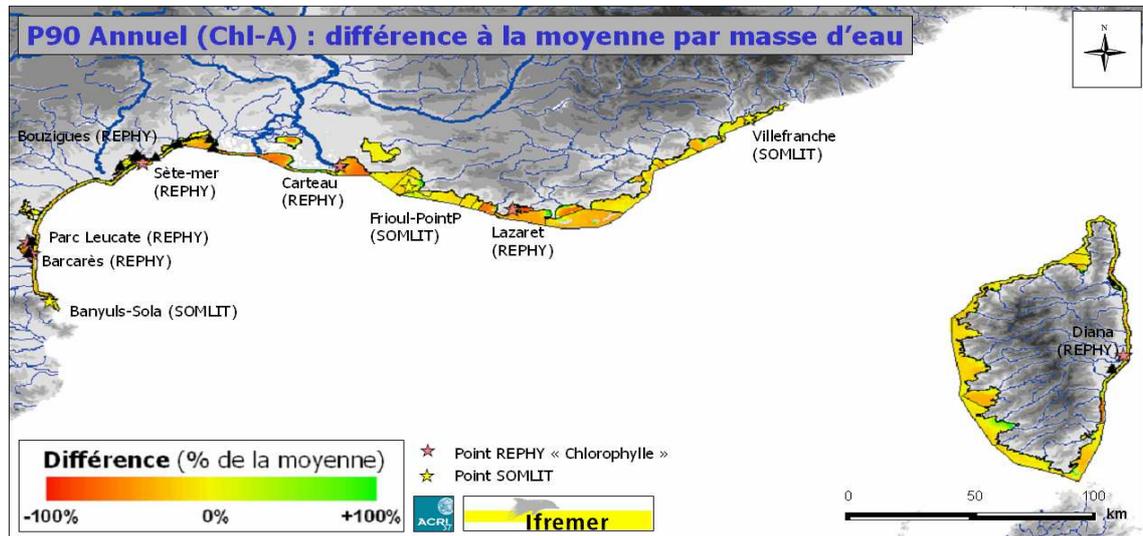


Figure 10 : Image de la différence à la moyenne par masse d'eau du Percentile 90 de la concentration en chlorophylle (dérivée d'imagerie satellite MeRIS), calculé sur 6 ans (2003-2008).

Un produit dérivé du précédent est également consigné en **annexe 3** : une planche cartographique avec une palette de couleurs grâce à laquelle sont représentées :

- En **bleu clair** : les valeurs dont la différence à la moyenne n'excède pas 30% ;
- En **bleu foncé** les valeurs où la différence à la moyenne est supérieur à 30%.

Ce produit simplifié, présenté en **figure 11**, permet de mieux juger de l'hétérogénéité générale des masses d'eau, ainsi que de la représentativité d'un pixel dans une masse d'eau, avec un seuil de représentativité de 30%.

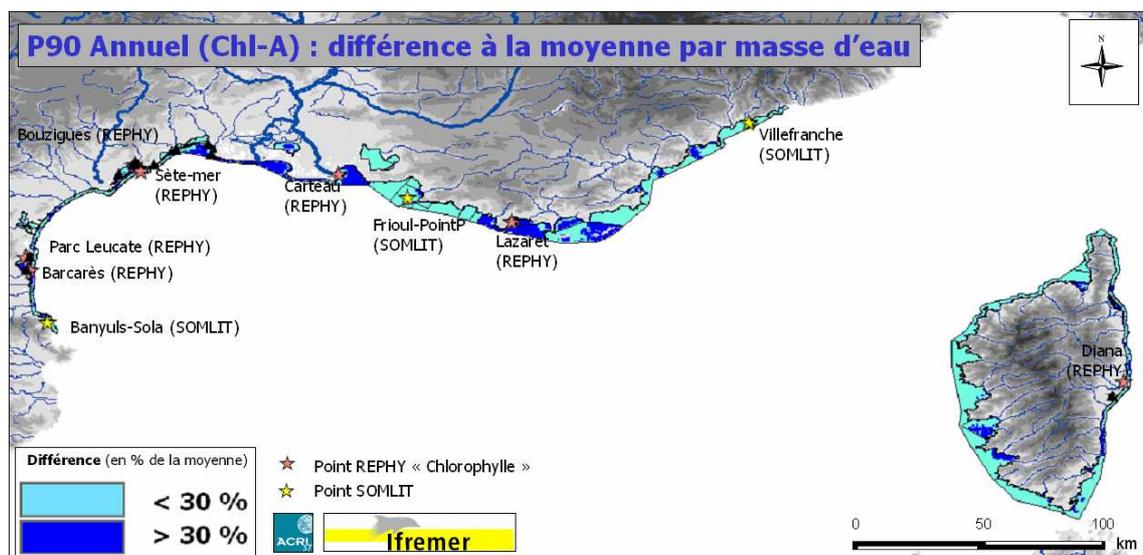


Figure 11 : Image de la différence à la moyenne par masse d'eau du Percentile 90 (Chl-A) calculé sur 6 ans (2003-2008). Classement par rapport au seuil de 30%.

Une première application logique de ce type de données est une évaluation du placement des stations de terrain sur lesquelles sont mesurées les concentrations en Chlorophylle :

- les points du **SOMLIT** (CNRS) – 3 points en Méditerranée ;
- les points du Réseau de mesures Phytoplanctoniques (**REPHY**) de l'Ifremer sur lesquels est échantillonnée la chlorophylle – 7 points en Méditerranée dont 3 en lagunes.

points qui sont représentés en surimpression sur les **figures 10 et 11**.

Les 5 points **DCE « de référence »** (Cap d'Agde, Toulon Grande Rade, Iles du Soleil, Bastia et Calvi), plus récents car implantés depuis 2006, sont également intéressants car complémentaires des stations SOMLIT et REPHY dans le cadre du contrôle de surveillance.

Le paragraphe qui suit est dédié à l'étude de la qualité du placement des points SOMLIT et REPHY pour une bonne représentation de l'ensemble de la masse d'eau correspondante. Les points DCE « de référence » n'y sont pas directement pris en compte mais apparaissent sur les produits cartographiques en Annexe 3 et leur positionnement est également commenté en discussion.

4.3. Analyse de la représentativité des points REPHY et SOMLIT de mesures Chl-A

Afin d'évaluer la représentativité de chacun des 10 points REPHY ou SOMLIT représentés ci-avant sur les **figures 10 et 11**, on présente dans ce paragraphe **7 extraits** de la même image. Ces « zooms » permettent de visualiser clairement la position du point dans la masse d'eau et de juger, en fonction du « P50 – P50m », de sa représentativité. Les étendues géographiques approximatives de ces zooms sont présentées sur la **figure 12**.

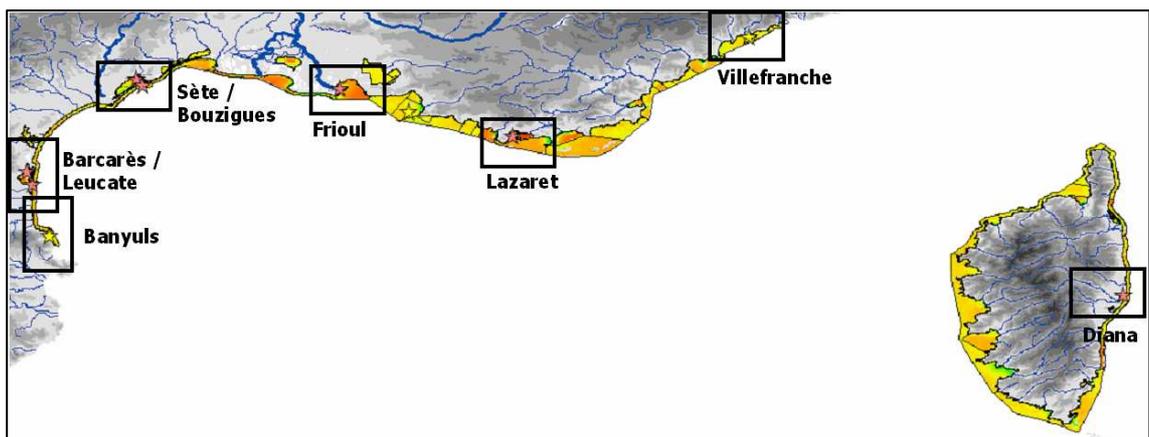
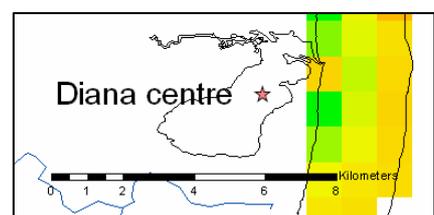


Figure 12 : Les 7 Fenêtres approximatives de Zoom.

Note : dans la suite, la zone de l'étang de Diana, en Corse, n'est pas représentée car elle ne présente aucune donnée (les P50 – P50m n'ont pas été calculés, probablement du fait de la taille réduite de la zone par rapport aux pixels kilométriques, comme on

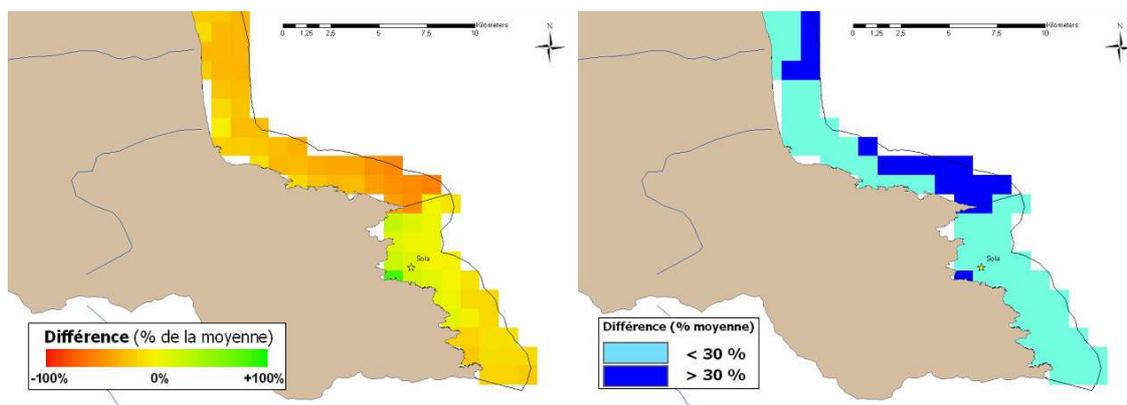


peut le voir sur l'encadré ci-contre).

Les fenêtres valides sont présentées ci-après séquentiellement, d'Ouest en Est, avec un commentaire sur l'homogénéité de la masse d'eau correspondante et sur le positionnement des points REPHY ou SOMLIT pour la représenter.

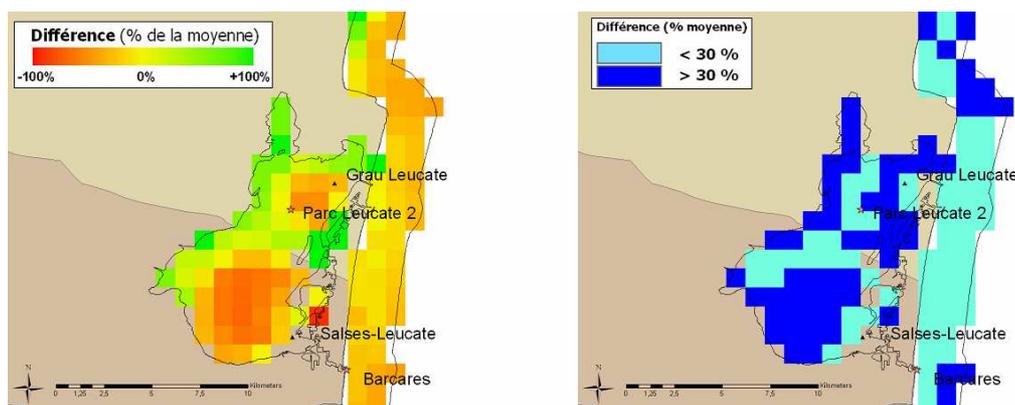
4.3.1. Fenêtres « zoomées » sur les points REPHY ou SOMLIT « Chlorophylle »

Banyuls Sola (SOMLIT)



La station SOMLIT de **Banyuls-Sola** est située dans la masse d'eau côtière "Frontière espagnole - Racou Plage", d'aspect très homogène, et elle représente bien la moyenne de l'ensemble de la zone.

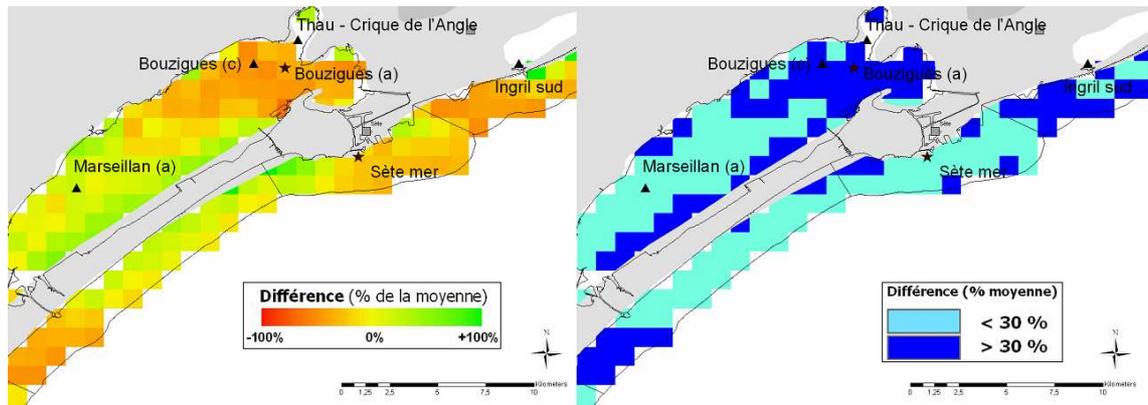
Le Barcarès / Parc Leucate (REPHY)



La station REPHY du **Barcarès** est située dans la masse d'eau côtière "Racou Plage - embouchure de l'Aude", de forme très allongée et assez hétérogène. La station est néanmoins placée dans une zone où elle représente relativement bien la moyenne de l'ensemble de la masse d'eau.

La station REPHY de **Parc-Leucate 2** est située dans la masse d'eau intermédiaire « Etang de Salses-Leucate », d'aspect très hétérogène. Elle est placée à la limite d'une zone bien représentative, mais on voit aisément la difficulté, pour une masse d'eau aux valeurs aussi hétérogènes, de bien représenter l'ensemble.

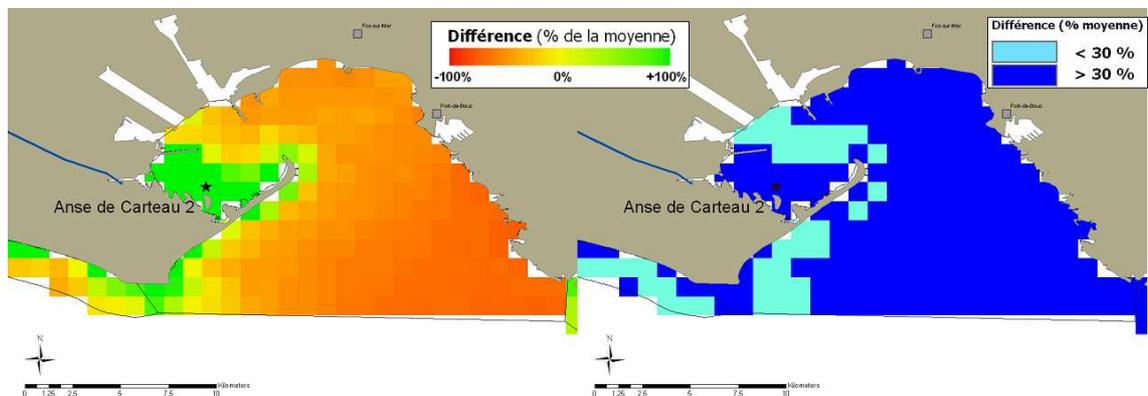
Sète mer / Bouzigues (REPHY)



La station REPHY de **Sète-mer** est située dans la masse d'eau côtière "De Sete a Frontignan", de petite taille et relativement homogène. Elle semble en tout cas être placée dans une zone où elle représente au mieux la moyenne de l'ensemble.

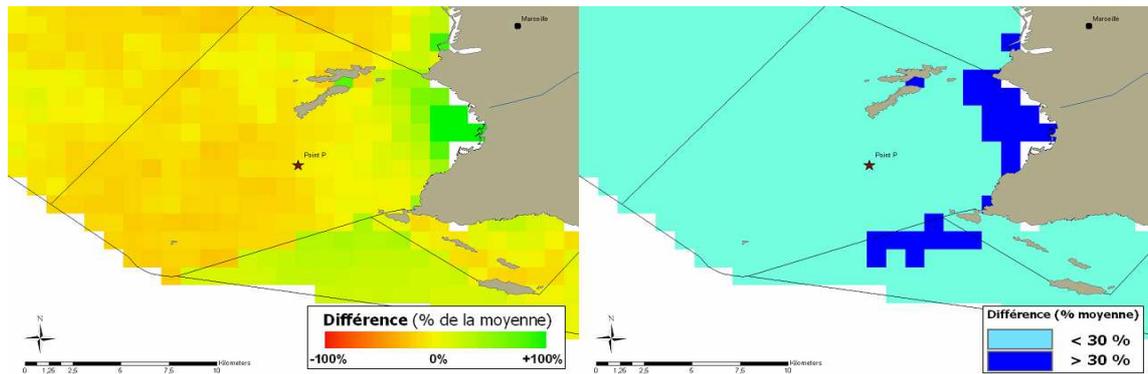
La station REPHY de **Bouzigues** est située dans la masse d'eau intermédiaire « Etang de Thau », assez hétérogène. Elle semble être placée dans une zone où la valeur du P90(ChlA) est nettement inférieure à la moyenne pour l'ensemble, et semble donc peu représentative.

Carteau (REPHY)



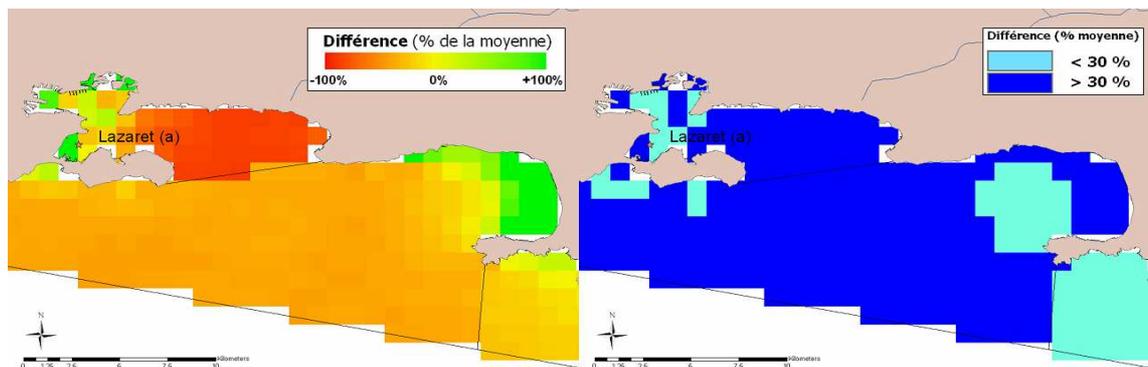
La station REPHY de l' **Anse de Carteau 2** est située dans la masse d'eau côtière "golfe de Fos", extrêmement hétérogène. Sa localisation, dictée par la disponibilité d'échantillons en zone conchylicole, la place dans une zone où elle reflète une valeur très largement supérieure à la moyenne de l'ensemble pour la concentration en Chlorophylle. La représentation de l'ensemble reste de toutes façons problématique du fait de la grande hétérogénéité, et rares sont les endroits représentatifs.

Frioul Point P (SOMLIT)



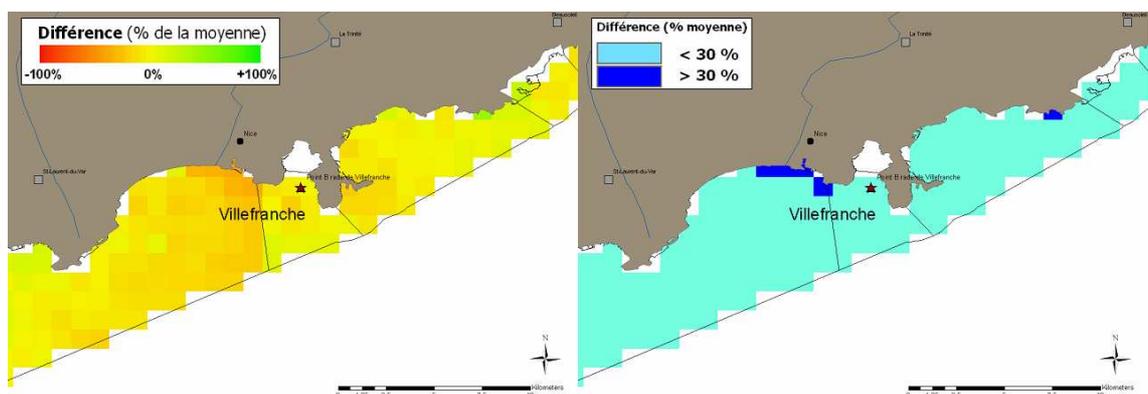
La station SOMLIT du **Point P**, près de l'île du Frioul en rade de Marseille, est située dans la masse d'eau côtière "Pointe d'Endoume - Cap Croisette et île du Frioul". Elle est très homogène, sauf à proximité immédiate de la côte. Le point de mesure, situé assez loin de la côte, représente bien la moyenne de l'ensemble de la zone.

Lazaret (REPHY)



La station REPHY du **Lazaret**, en « petite rade » de Toulon, est située dans la masse d'eau côtière " Cap Cepet - cap de Carqueiranne", extrêmement hétérogène. La position du point fait qu'il reflète une valeur probablement supérieure à la moyenne de la masse d'eau qui est trop hétérogène pour être facilement représentée par un point. La représentation graphique montre très clairement une différence notable entre « grande » et « petite » rade de Toulon, avec suggestion de la séparation en deux de la rade pour prendre en compte cette hétérogénéité marquée et bien délimitée.

Villefranche Point B (SOMLIT)



La station SOMLIT du **Point B**, en rade de Villefranche sur mer, est située dans la masse d'eau côtière "Port de commerce de Nice - Cap Ferrat", d'apparence très homogène. Le point de mesure représente bien la moyenne de l'ensemble de la zone.

4.3.2. Synthèse et discussion

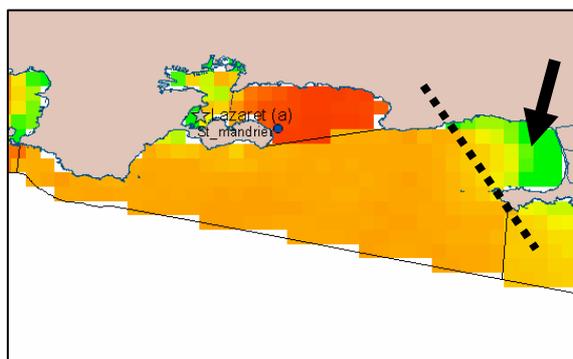
On constate, en observant les résultats ci dessus, que la représentativité des points est très différente selon les masses d'eau, et que l'hétérogénéité au sein de la masse d'eau a une très grande influence.

De manière générale, les stations du **SOMLIT** (Banyuls, Marseille et Villefranche) sont placés dans des masses d'eau plutôt homogènes, donc faciles à représenter par un point. Ces masses d'eau correspondent en général à des zones d'eau oligitrophes, aux concentrations en chlorophylle faibles. En outre, les points de mesure sont situés assez loin de la côte et dans des endroits où les valeurs du « P50-P50m » les indique comme représentant bien l'ensemble de la masse d'eau.

En revanche, les stations du **REPHY** dans lesquelles on mesure la concentration en Chlorophylle sont plus problématiques. En dehors du *Barcarès* et de *Sète-mer*, situées dans des masses d'eau plutôt homogènes, ces stations sont implantées dans des masses d'eau aux valeurs très hétérogènes. Qu'il s'agisse des points « lagunes » (*Leucate* et *Bouzigues*), ou des points situés dans des baies fermées (*Carteau* et *Lazaret*), les masses d'eau apparaissent comme très hétérogènes et donc difficiles à représenter par un point unique. Il s'agit d'ailleurs en général de zones de fortes concentration de chlorophylle. Les points de mesure sont en général situés dans des endroits plutôt défavorables, avec une surestimation évidente dans le cas de *Carteau*, par exemple et une sous-estimation évidente dans le cas de *Bouzigues*. Pour *Leucate* et *Lazaret*, les points sont à la limite d'une zone assez favorable. Les produits cartographiques suggèrent en tout cas des positions plus favorables pour ces points, où ils reflèteraient mieux la valeur de la concentration en chlorophylle moyenne de l'ensemble de la masse d'eau.

En ce qui concerne les stations **DCE « de référence »**, dont on peut voir le placement sur les produits cartographiques en Annexe 3, ils semblent être placés de façon convenable pour une bonne représentativité. Les points « Cap d'Agde », « Iles du Soleil », « Calvi » et « Bastia » sont placés dans des zones relativement homogènes et représentatives. Seul le point « Toulon Grande Rade » (ou « St Mandrier ») est placé en limite de bonne représentativité.

On notera que l'on constate assez souvent que des masses d'eau hétérogènes montrent des *ruptures* nettes des valeurs de « P50-P50m », comme par exemple sur la baie formée par la partie ouest de la presqu'île de Giens (plage de l'Almanarre, signalée par la flèche sur la figure ci-contre). Cette rupture nette suggère un éventuel re-découpage selon ce critère d'homogénéité de la concentration de surface en Chlorophylle, avec sur cet exemple une possibilité de découper une sous-zone correspondant à la baie (ligne pointillée).





5. Synthèse des résultats et perspectives à court terme

Le présent chapitre passe en revue les résultats obtenus en regard des échéances et des objectifs fixés, avant d'aborder les perspectives pour une suite éventuelle de cette action.

On peut en tout cas considérer que, par rapport aux échéances de la convention n° **2008 – 0720**, les objectifs ont été atteints pour les trois sujets abordés, passés en revue ci-après, avec quelques réserves concernant la matière en suspension.

5.1. Matière en Suspension

La caractérisation des masses d'eau DCE par la matière en suspension dérivée d'imagerie satellite peut être considérée comme un essai utile, mais qui est finalement peu concluant du fait des difficultés de validation par les données de terrain.

On a néanmoins pu fournir un Atlas saisonnier qui donne une bonne référence générale de la concentration en MES et des différences au fil des saisons, mais qui a été volontairement gardé dans un état simplifié par rapport à celui fourni pour la Chl-A, donnée considérée comme essentielle et au travers de laquelle on est allé très loin dans les traitements. En cours de traitements et au vu des résultats intermédiaires, il a donc été décidé de considérer, en accord avec l'AERM&C, de ne pas approfondir le sujet.

Il existe toutefois diverses façons d'estimer la MES par satellite, comme on l'a vu au paragraphe 2.1.1. On pourrait donc, si nécessaire, s'y intéresser à nouveau avec dans les perspectives éventuelles :

- l'utilisation d'autres données satellites, par exemple les données MODIS traitées par l'algorithme OC5 de l'Ifremer, d'autant qu'il s'agit dans ce cas de MES minérale (inorganique), contrairement à la MES totale utilisée dans cette étude ;
- l'application d'autres algorithmes sophistiqués qui prennent en compte la Chl-A dans le calcul de la MES.

Reste à savoir si une étude complémentaire vaut la peine d'être entreprise, si la MES est une variable environnementale suffisamment importante pour qu'on lui consacre des ressources et du temps.

5.2. Hydrodynamique

Le traitement des données hydrodynamiques pour la caractérisation des masses d'eau au travers de leur « taux de Renouvellement » a pour sa part donné de bons résultats et permis de fournir des produits cartographiques clairs et concis. Il donne une bonne idée de la sensibilité *a priori* des masses d'eau à une contamination éventuelle, avec un produit synthétique annuel, et des produits mensuels montrant les différences saisonnières.

On peut toutefois considérer qu'il reste une marge de progrès importante pour améliorer les résultats. Les calculs ont en effet été réalisés sur 1 seule année de données de



courants à 1,2 km de résolution, un peu anciennes... On pourrait donc, dans les perspectives éventuelles faire des nouveaux calculs :

- avec des sorties de modèle MARS-3D version 8, version qui contient des améliorations dans la simulation des phénomènes de petite échelle, et qui rendra donc mieux compte des courants côtiers ;
- en utilisant des sorties de modèle sur plusieurs années, et non pas seulement sur l'année 2006 ;
- en utilisant 4 sorties par jour (sur les 8 sorties tri-horaires disponibles) au lieu de 2, comme cela a été fait jusqu'à présent ;
- en travaillant sur des zones plus petites mais à résolution plus fine, à 400m par exemple, comme cela est en cours de développement pour les zones PACA et CORSE.

On pourra d'ailleurs penser aussi à s'intéresser à d'autres paramètres hydrodynamiques, comme par exemple la résultante des courants pour l'ensemble d'une masses d'eau, qui permettrait d'appréhender le sens dominant de transport des contaminants éventuels.

5.3. Représentativité des points de mesure Chl-A

L'application de la méthode « P50 – P50m » a également donné de très bons résultats et permis de créer des produits originaux, faciles à interpréter et pratiques pour juger :

- de l'hétérogénéité spatiale de la Chl-A dans les masses d'eau ;
- du placement et de la représentativité des points de surveillance dans ces masses d'eau.

S'agissant d'une technique de traitement nouvelle et des premiers essais, il reste très certainement des progrès à faire, avec en particulier des traitements plus approfondis et une analyse spatiale plus poussée dans une but d'optimisation de la surveillance. On pourra donc, en termes de perspectives, penser à un travail d'évaluation du nombre et de la position des points de mesure, ainsi qu'à une révision éventuelle des masses d'eau, avec re-découpage ou regroupement éventuel.

On pourra aussi garder comme perspective la reprise des traitements sur des données satellites plus fines. Les données MERIS sont en effet, depuis peu, accessibles à l'Ifremer à pleine résolution, à savoir 320 mètres. Le passage de 1,2 km à cette résolution 4 fois plus fine pourra donner des résultats intéressants en milieu côtier, avec les problèmes d'interface terre-mer que l'on connaît. Le traitement de données à pleine résolution aura un intérêt tout particulier pour les masses d'eau de petite taille, comme par exemple les petites baies très fermées, ou même l'étang de Diane en Corse où il n'a pas été possible d'obtenir de résultats dans cette étude.

On gardera toutefois à l'esprit qu'il s'agit d'une analyse spatiale **sur un seul paramètre**, la Chl-A qui, bien que reconnu comme important, ne reflète pas forcément les autres critères de qualité du milieu.

6. Conclusion

Cette seconde étude « Optimisation » semble apporter de bons compléments à la première, rendue début 2009, à laquelle elle ajoute de nouveaux éléments utiles et des méthodes originales pour élaborer l'information.

Tout d'abord, elle complète la caractérisation des masses d'eau côtières de la DCE par deux nouvelles variables environnementales : la **matière en suspension**, donnant ainsi une idée de la turbidité par remise en suspension des sédiments ou par apports fluviaux, et l'hydrodynamique, avec l'évaluation du **taux de renouvellement**, indication du potentiel de dilution et donc de la sensibilité à une contamination éventuelle.

Ensuite, elle apporte un complément essentiel sur la concentration en **Chlorophylle a**, variable environnementale dont l'importance est unanimement reconnue, avec une indication de l'hétérogénéité des masses d'eau et de la représentativité des stations échantillonnées dans le cadre des réseaux nationaux de surveillance.

Les résultats obtenus confirment en tout cas l'excellent potentiel des **données spatialisées** (imagerie satellite et sorties de modèles hydrodynamiques) pour la caractérisation environnementale, en particulier dans des applications comme la DCE, avec des entités bien délimitées telles que les masses d'eau. On voit à nouveau clairement combien ces données sont complémentaires des données de terrain, qu'elles ne visent pas à remplacer, mais bien à compléter et même à optimiser (en particulier dans leur positionnement). On entrevoit même, au travers de certains résultats, la possibilité d'une révision critique du découpage (voire regroupement) des masses d'eau en tenant compte de nouveaux critères comme leur homogénéité dans la concentration en Chlorophylle a, en particulier.

On peut donc conclure que les nouveaux éléments apportés par cette étude ont un bon potentiel pour améliorer la surveillance des eaux côtières, surveillance qui est et reste fondée sur les indispensables mesures de terrain, avec leur diversité et leur précision que vient bien compléter la représentativité spatiale des données spatialisées. Il reste toutefois une marge de progression et des perspectives d'amélioration des résultats en poursuivant les traitements par les mêmes méthodes, mais sur des données de bases plus fines et plus représentatives dans le temps.

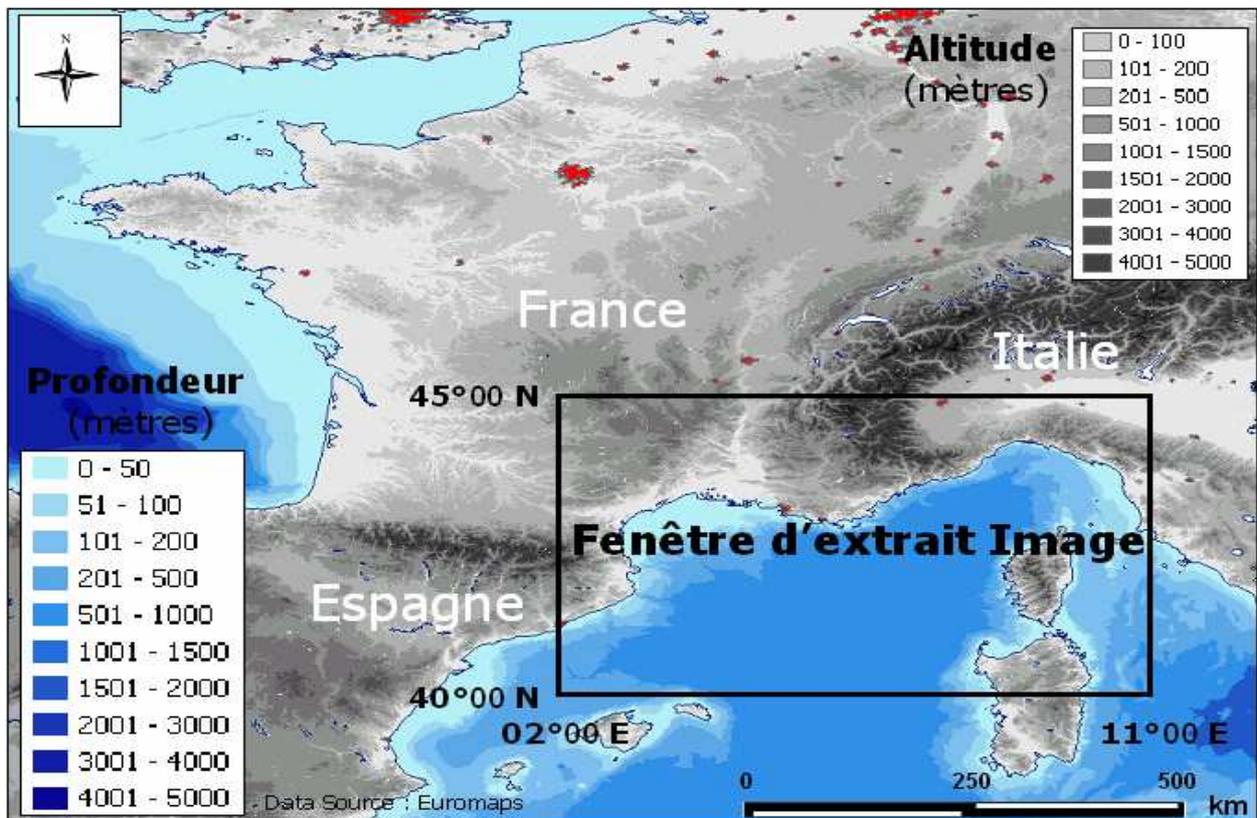
Références

- André G., Forget P. (2007).** Can satellite derived chlorophyll imagery be used to trace the surface dynamics in coastal zone ? A case study in the Mediterranean, *Sea Sensor Journal*, 7 884-904. <http://dx.doi.org/10.3390/s7060884>
- André G., Garreau P., Fraunié P. (2009).** Mesoscale slope current variability in the Gulf of Lions. Interpretation of in-situ measurements using a three-dimensional model. *Cont.Shelf. Res.* 29(2) : 407-423. [doi:10.1016/j.csr.2008.10.004](https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.10.004)
- André G., Garreau P., Garnier V., Fraunié Ph. (2005).** Modelled variability of the sea surface circulation in the North-western Mediterranean Sea and in the Gulf of Lions, *Ocean Dynamics* 55: 294-308. DOI:10.1007/s10236-005-0013-6
- Chavez P.S., Velasco M. and Sides S. (1997) :** Mapping Suspended Sediments Using Remotely Sensed Satellite Images: San Francisco Bay. Proceedings of the U.S. Geological Survey (USGS) Sediment Workshop, February 4-7, 1997.
<http://water.usgs.gov/osw/techniques/workshop/chavez.html>
- Dufois F., Garreau P. Le Hir. P., Forget P. (2008).** Wave- and current-induced bottom shear stress distribution in the Gulf of Lions. *Cont. Shelf Res.* 28(10) : 1920-1934.
[doi:10.1016/j.csr.2008.03.028](https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.03.028)
- ESA/ACRI-ST (2000) :** MERIS Level 2 Algorithm Theoretical Basis Documents (ATBD).
<http://envisat.esa.int/instruments/meris/atbd/>
- ACRI-ST LOV / BC DLR / ICESS / NIVA / UoP (2007) :** GlobColour : Product User Guide.
www.globcolour.info/CDR_Docs/GlobCOLOUR_PUG.pdf
- Fanton d'Andon O., Garnesson Ph., Mangin A., Ganzin N., Sauzade D., Morel A., 2005.** Use of ocean colour observations to support the Water Framework Directive implementation. Session Ocean Colour II - 29 September 2005. Workshop MERIS (A) ATSR – European Space Agency (ESA)/ESRIN, Frascati, Italy.
- Fettweis M., Nechad B., and Van den Eynde D. (2007) :** An estimate of the suspended particulate matter (SPM) transport in the southern North Sea using SeaWiFS images, in situ measurements and numerical model results. *Continental Shelf Research* 27 (2007) 1568–1583.
- Froidefond J. M. et Doxaran D. (2004) :** Télédétection Optique Appliquée à l'étude de eaux côtières. *Télédétection*, 2004, vol. 4, no. 2, pp. 157-174
- Ganzin N., Fiandrino A., Garreau P., Coudray S., et Sauzade D. (2009) :** Vérification des conditions de référence des eaux côtières de Corse - Utilisation de la plate-forme de modélisation. Rapport Ifremer LER/PAC/09-02, juin 2009, 54 pages
- Ganzin N., Mangin A., Saulquin B., et Gohin S. (2008) :** Optimisation de la surveillance des masses d'eau DCE en Méditerranée - Utilisation de produits dérivés d'images satellites en complément du réseau de mesures in-situ. Rapport Ifremer, LER/PAC/08-06, février 2008, 68 pages.
- Gohin, F., Druon, J. N., Lampert, L., (2002).** A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 1639-1661.

- Gohin F., Saulquin B., Oger-Jeanneret H., Lozac'H L., Lampert L. Lefebvre A., Riou P. and Bruchon F. (2008)** :, Towards a better assessment of the ecological status of coastal waters using satellite derived chlorophyll-A concentrations. *Remote Sensing of Environment* vol. 112, no 8 (2008) 3329-3340.
- Lazure P, Dumas F (2008)** : An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources* 31:233-250
- Miller R.L. and McKee B.A. (2004)** : Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters *Remote Sensing of Environment* 93 (2004) 259–266.
- Morel, A. and Prieur L. (1977)** : Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22, 709-722.
- Nechad, B., V. De Cauwer, Y. Park, and K. Ruddick (2003)** : Suspended Particulate Matter (SPM) mapping from MERIS imagery. Calibration of a regional algorithm for the Belgian coastal waters. MERIS user workshop, 10-13th November 2003 . (Frascati). ESA SP-549
- Nicolle A., Garreau P, Liorzou B. (2009)**. Modelling for anchovy recruitment studies in the Gulf of Lions (Western Mediterranean Sea). *Ocean Dynamics* DOI10.1007/s10236-009-0221-6 doi:[10.1007/s10236-009-0221-6](https://doi.org/10.1007/s10236-009-0221-6)
- Pinkerton M.H., Richardson K.M., Boyd P.W., Gall M.P., Zeldis^c J., Oliver M.D. and Murphy R.J. (2005)** : Intercomparison of ocean colour band-ratio algorithms for chlorophyll concentration in the Subtropical Front east of New Zealand. **Remote Sensing of Environment**. Volume 97, Issue 3, 15 August 2005, Pages 382-402
- Rubio A., Taillandier V., Garreau P. (2009)**. Reconstruction of the Mediterranean Northern Current variability and associated cross-shelf transport in the Gulf of Lions from satellite-tracked drifters and model outputs. *Journal of Marine System* 78:563:578 . doi:[10.1016/j.jmarsys.2009.01.011](https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.011)
- Tommasini, M., Mori, S., Poli, G., & Pellegrini, P. F. (2005)** : Suspended Particulate Matter (SPM) on a Regional Scale (Tuscan Archipelago) from AVHRR and MERIS Data. *Proceedings of the MERIS (A)ATSR Workshop 2005 (ESA SP-597)*. 26 - 30 September 2005 ESRIN, Frascati, Italy. Editor: H. Lacoste. Published on CDROM., p.51.1

Annexe 1 : Atlas de la concentration de surface en Matière en Suspension par satellite en Méditerranée Nord Ouest

La présente annexe contient un atlas simplifié de la concentration de surface en Matière en Suspension Inorganique (MES) pour les côtes méditerranéenne française, dérivé de données satellitaires MERIS pour les années 2003, 2004, 2005, 2006 et 2007, extraites sur la fenêtre géographique « Méditerranée Nord-Ouest », représentée par la figure qui suit.



Cet atlas a été développé sur la base de produits générés à la fois dans le cadre du projet MARCOAST et pour l'assistance technique à l'AERM&C pour la DCE, dans un but de caractérisation saisonnière de référence de la concentration en MES.

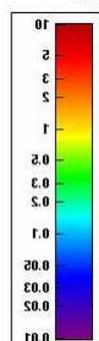


Il comprend une image du **percentile 90 annuel** et 12 images de **médiane mensuelle** pour une description de base de la MES en fonction des diverses saisons de l'année.

Les produits montrent, en surimpression, la limite des masses d'eau côtières définies pour les besoins de la DCE. Ils se limitent néanmoins à une simple intégration dans le temps (P90 annuel, médiane mensuelle), sans aller jusqu'au détail de l'intégration dans l'espace (par masse d'eau). Ce travail n'a pas été jugé utile étant données les limites de précision dans les évaluations de la MES par et le manque de résultats tangibles de validation.

Les concentrations en MES de la couche de surface sont exprimées en grammes de Matière en suspension par mètre cube d'eau de mer, selon la légende ci-contre.

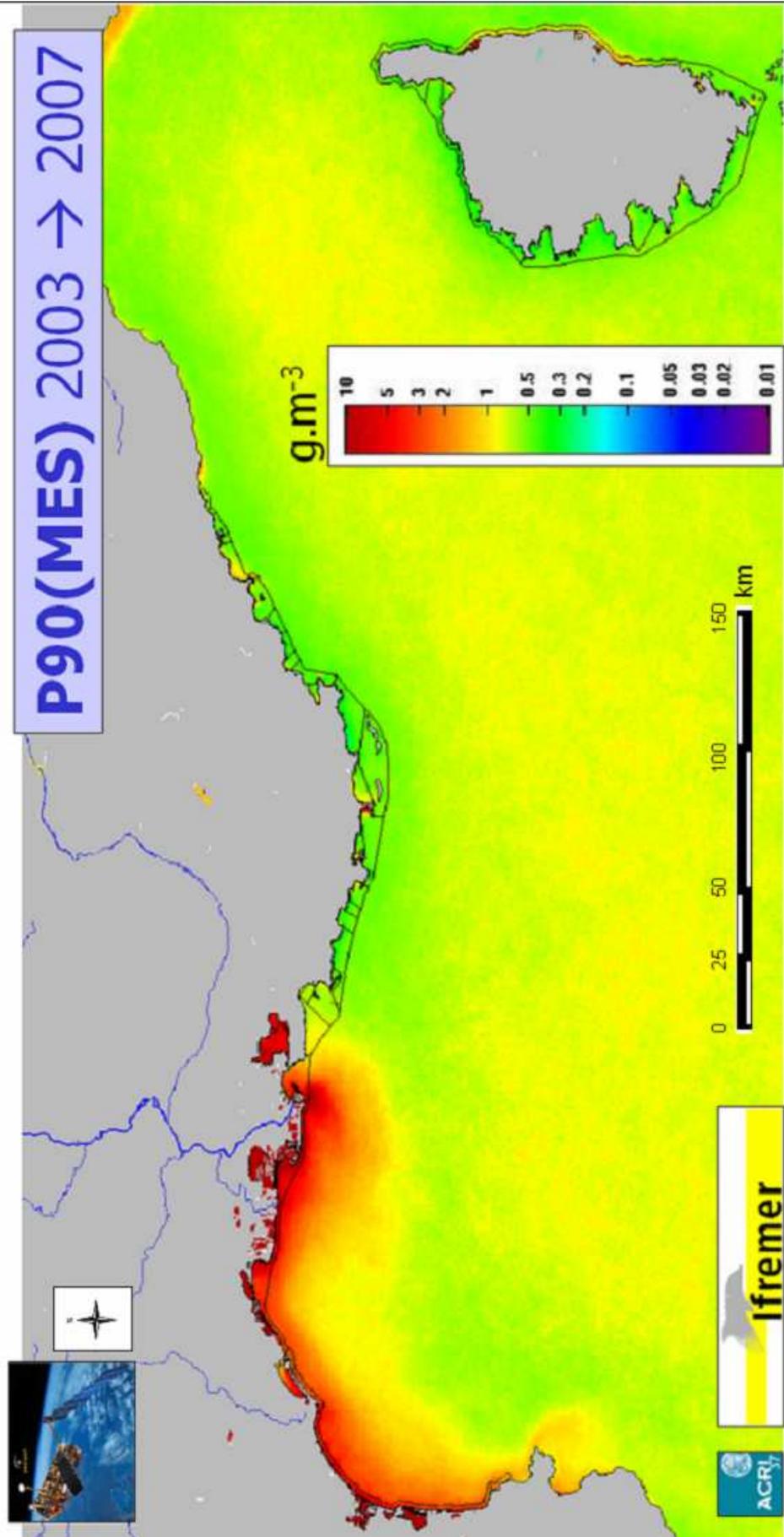
MES
(g m⁻³)



Matière en Suspension Inorganique

dérivée d'imagerie satellite MERIS

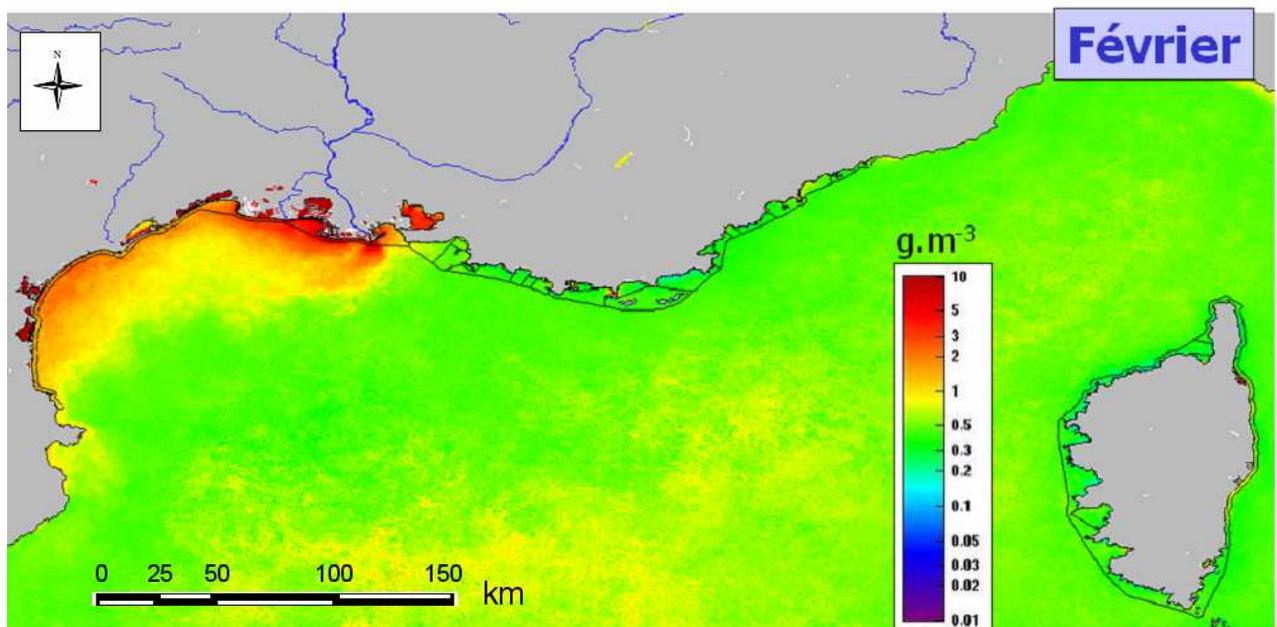
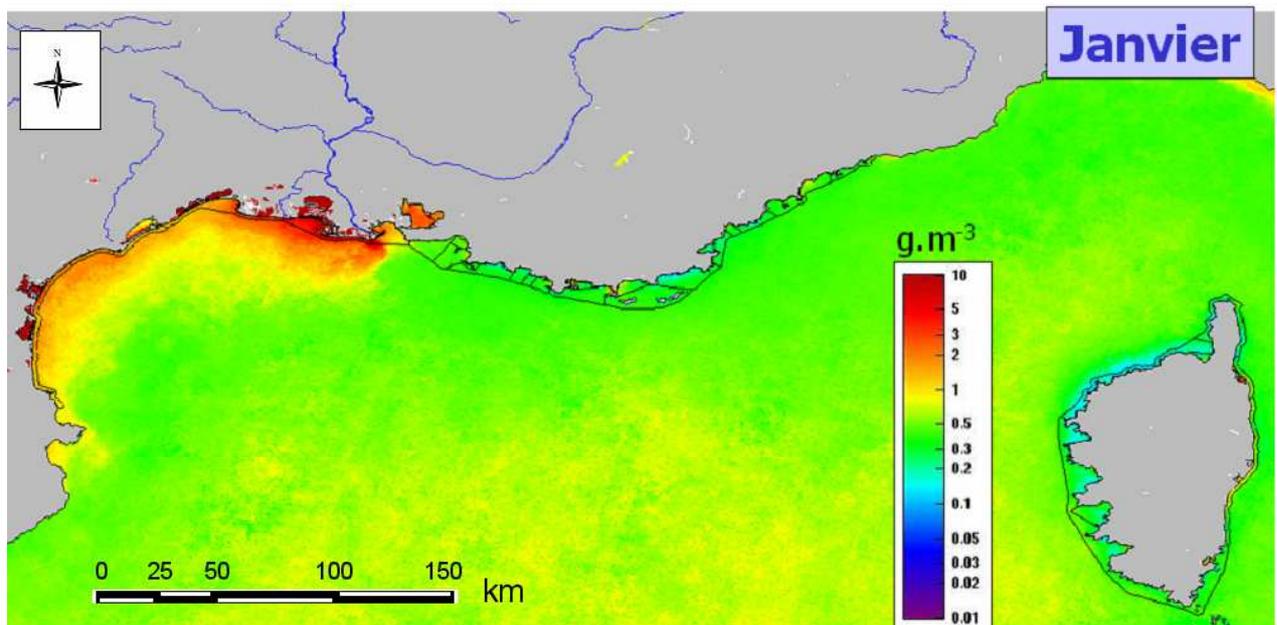
Percentile 90 (MES) annuel sur 5 années (2003-2007)



Matière en Suspension Inorganique

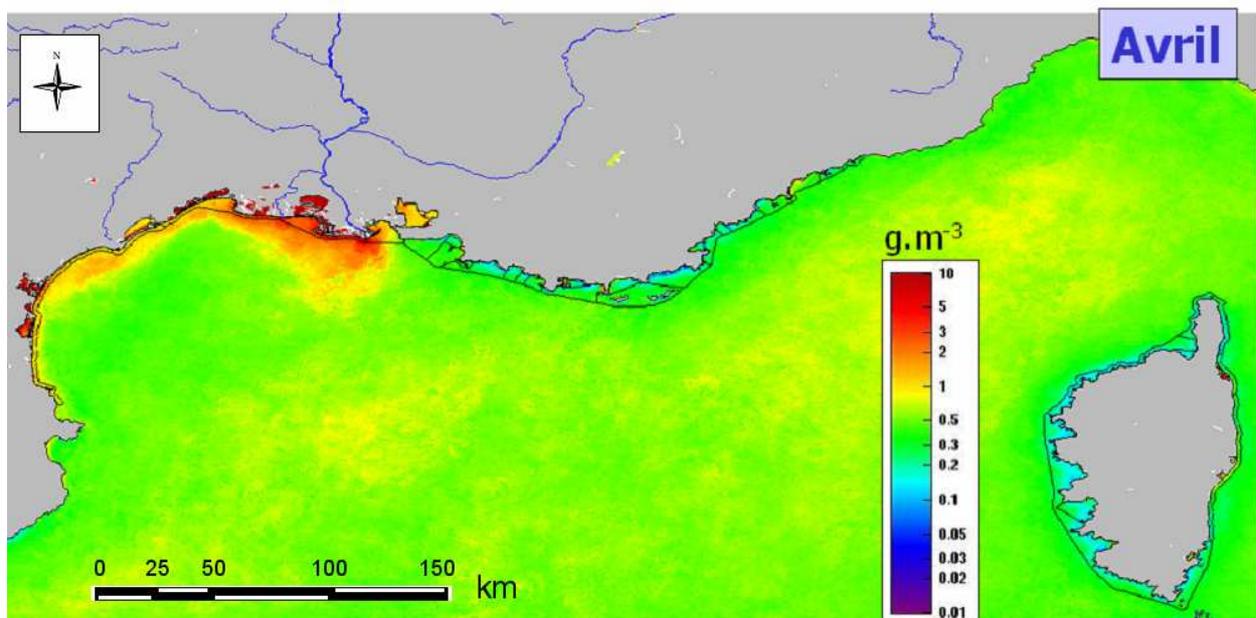
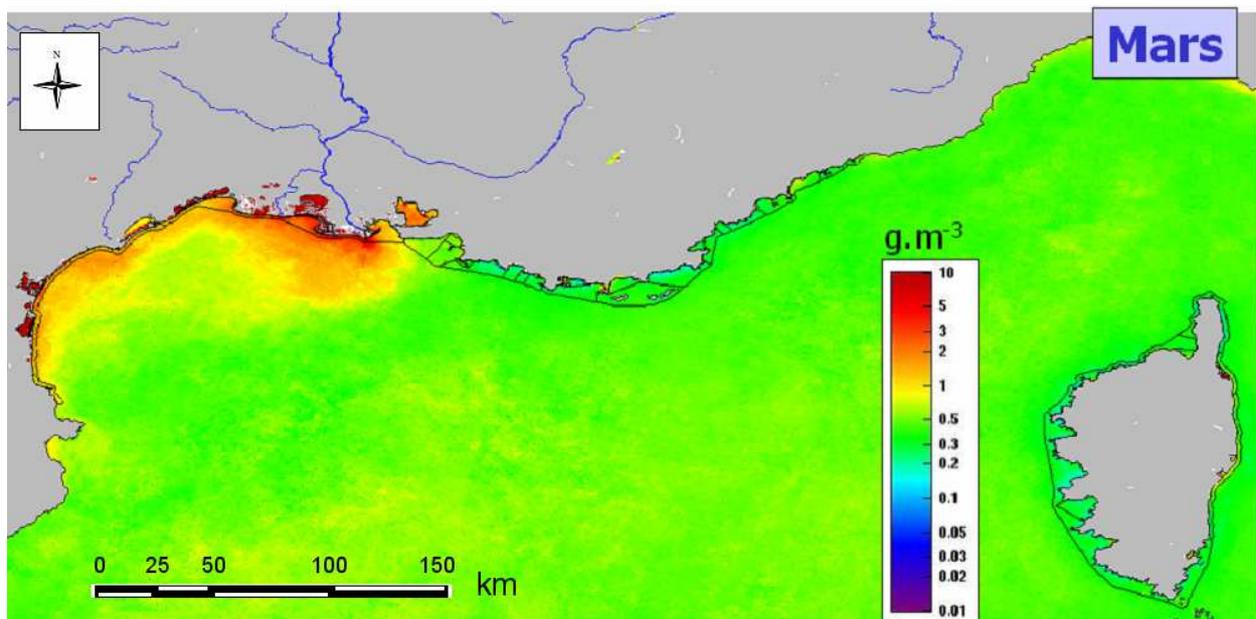
dérivée d'imagerie satellite MERIS

Médiane Mensuelle (MES) sur 5 années (2003-2007)



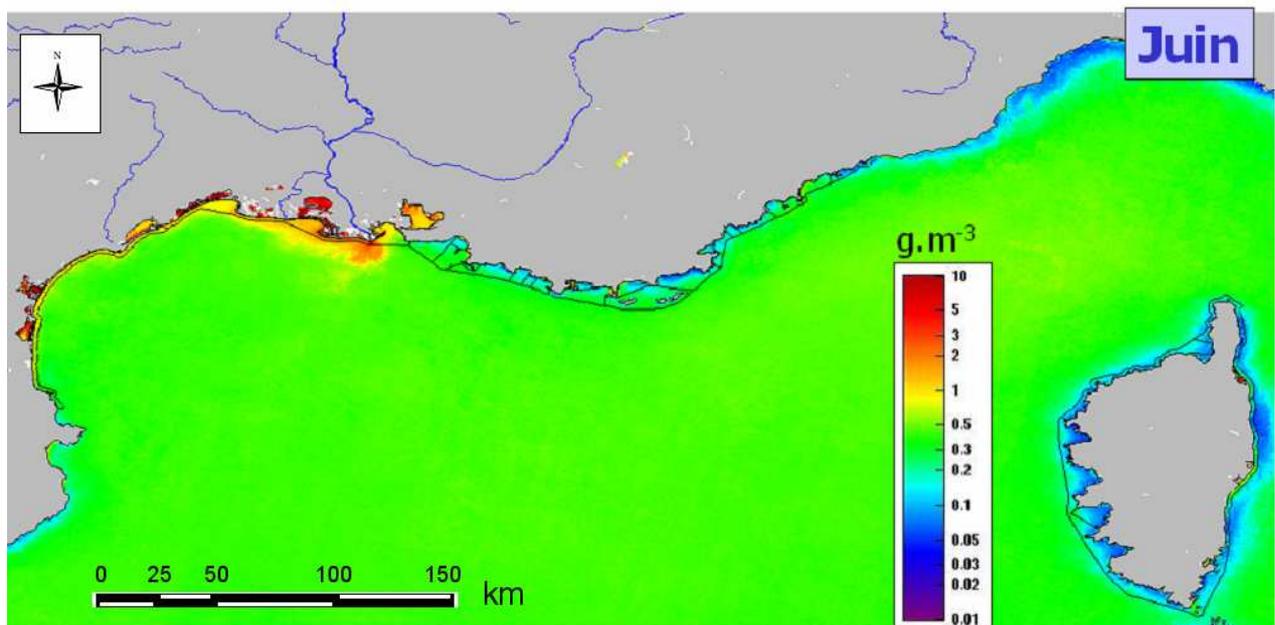
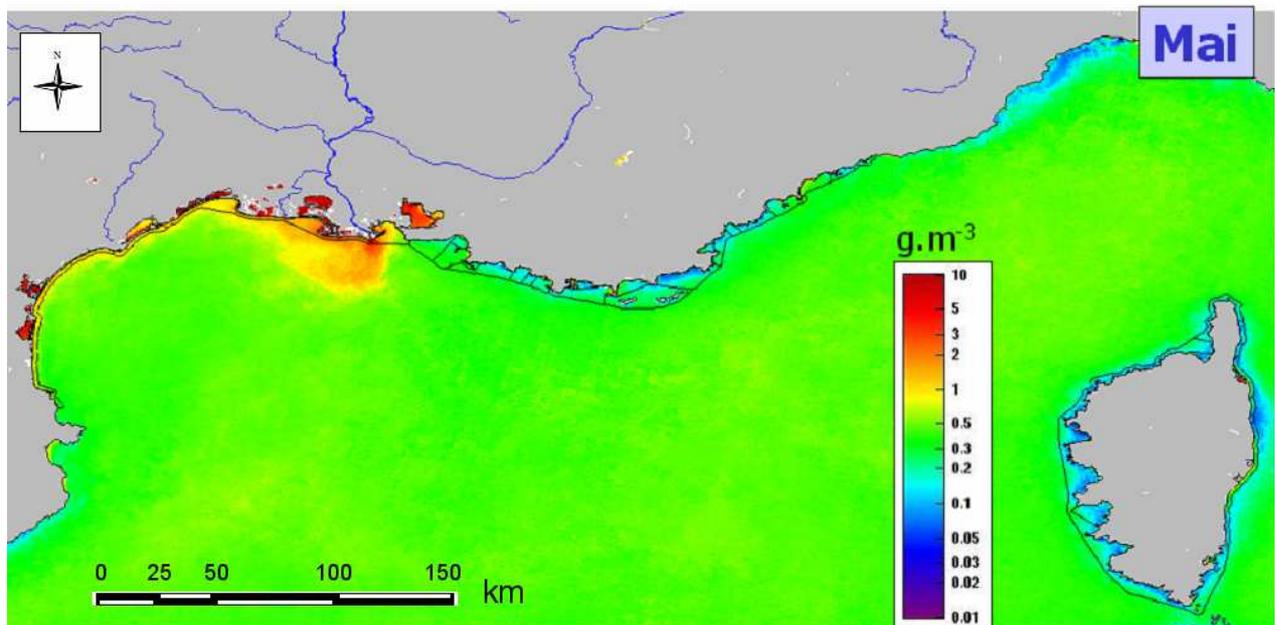
Matière en Suspension Inorganique dérivée d'imagerie satellite MERIS

Médiane Mensuelle (MES) sur 5 années (2003-2007)



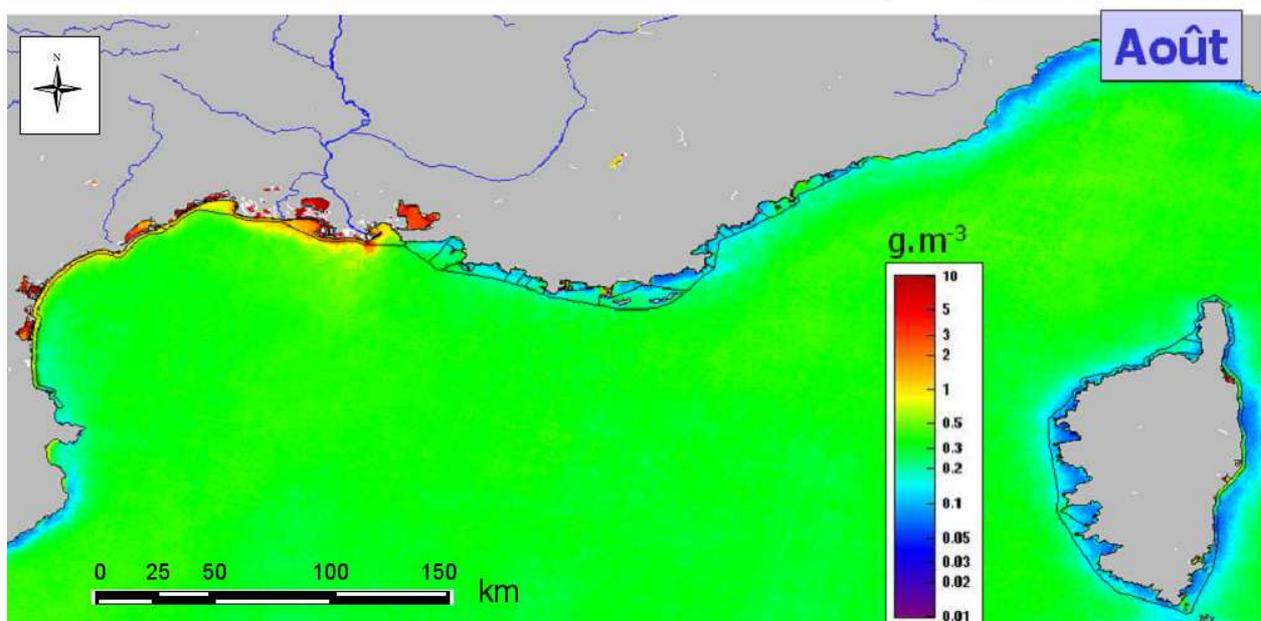
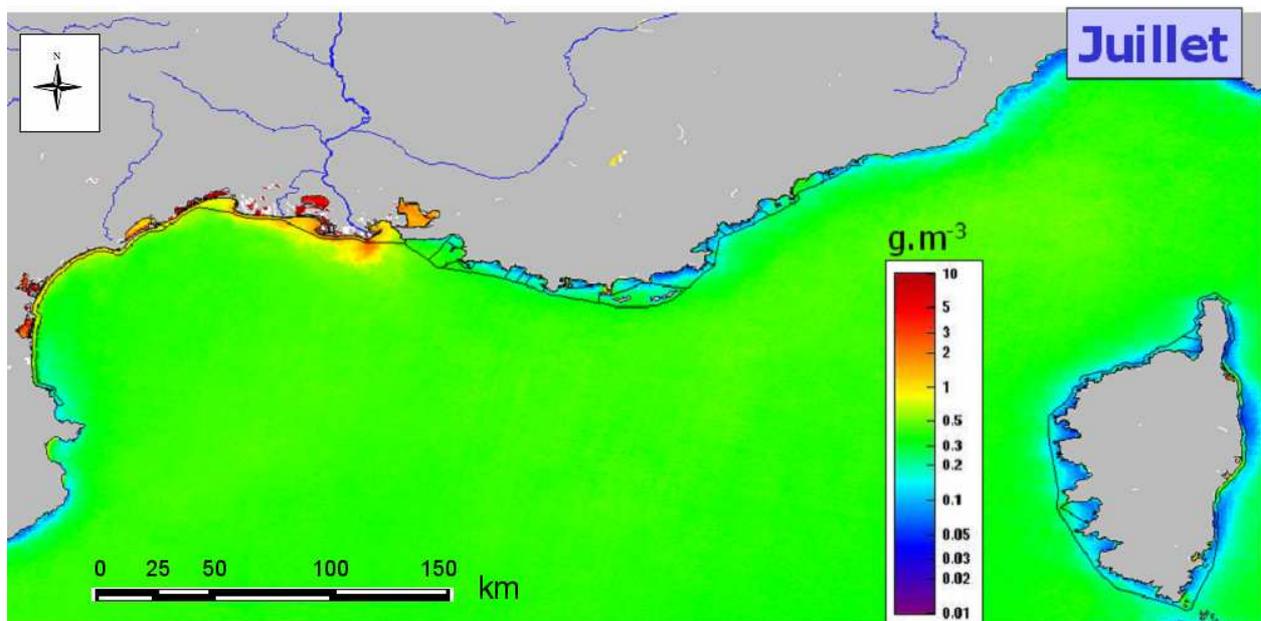
Matière en Suspension Inorganique dérivée d'imagerie satellite MERIS

Médiane Mensuelle (MES) sur 5 années (2003-2007)



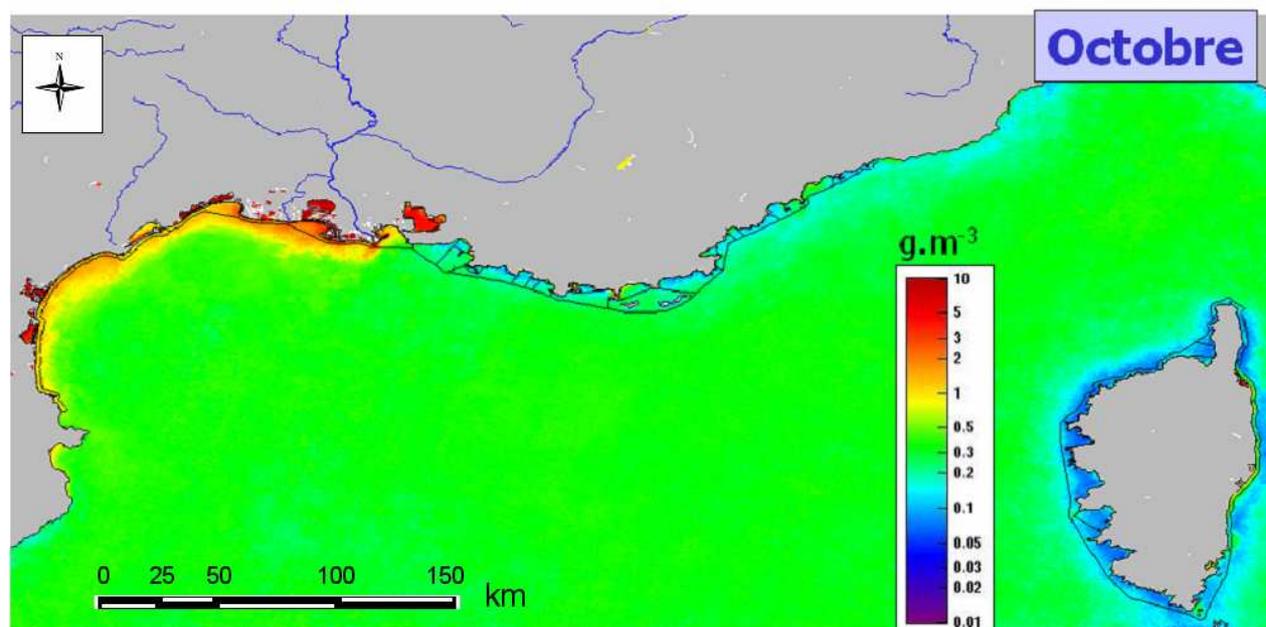
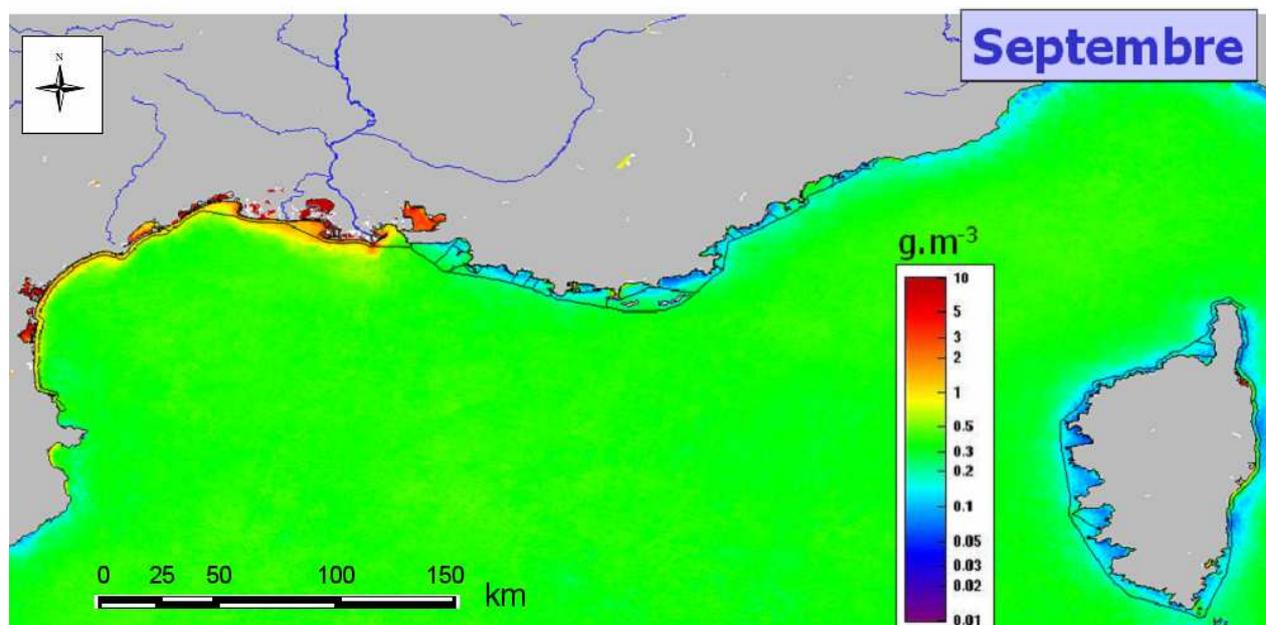
Matière en Suspension Inorganique dérivée d'imagerie satellite MERIS

Médiane Mensuelle (MES) sur 5 années (2003-2007)



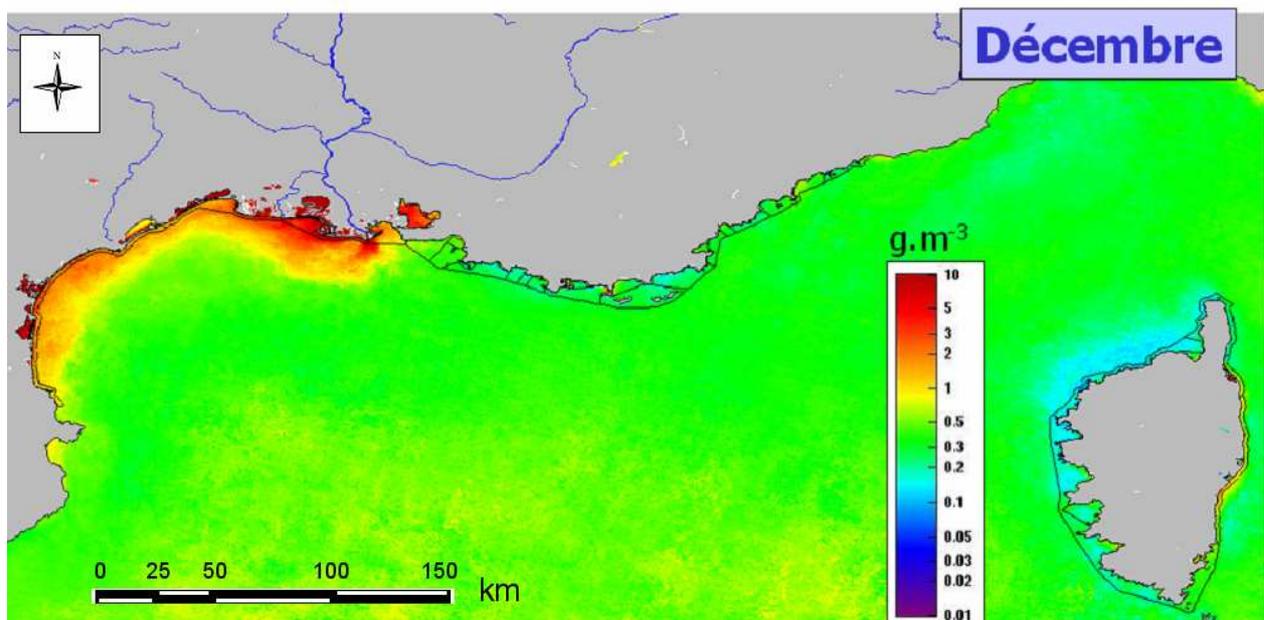
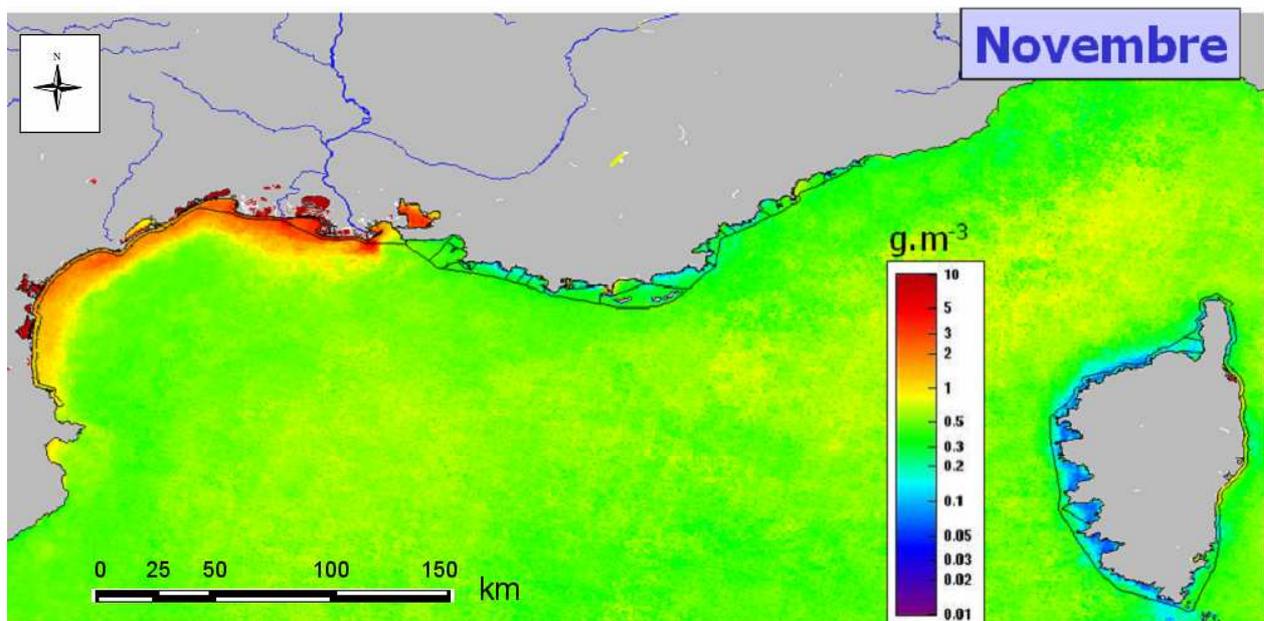
Matière en Suspension Inorganique dérivée d'imagerie satellite MERIS

Médiane Mensuelle (MES) sur 5 années (2003-2007)



Matière en Suspension Inorganique dérivée d'imagerie satellite MERIS

Médiane Mensuelle (MES) sur 5 années (2003-2007)



Annexe 2 : Atlas de caractérisation hydrodynamique : Taux de Renouvellement Annuel et Mensuel des masses d'eau DCE pour la Méditerranée Nord-Ouest

Cette annexe présente un Atlas simplifié de **caractérisation hydrodynamique** des masses d'eau **côtières** (excluant les masses d'eau intermédiaires) de la Méditerranée française à partir de sorties de modèle hydrodynamique MARS-3D.

La variable de base pour cette caractérisation est le **taux de renouvellement (TR)** de chaque masse d'eau, défini comme le quotient des flux entrants dans une masse d'eau et de son volume. Selon cette définition, un TR de 50 correspond à un flux entrant représentant 50 fois le volume de la masse d'eau au cours de la période de temps considérée. La masse d'eau se renouvelle 50 fois pendant cette période de temps.

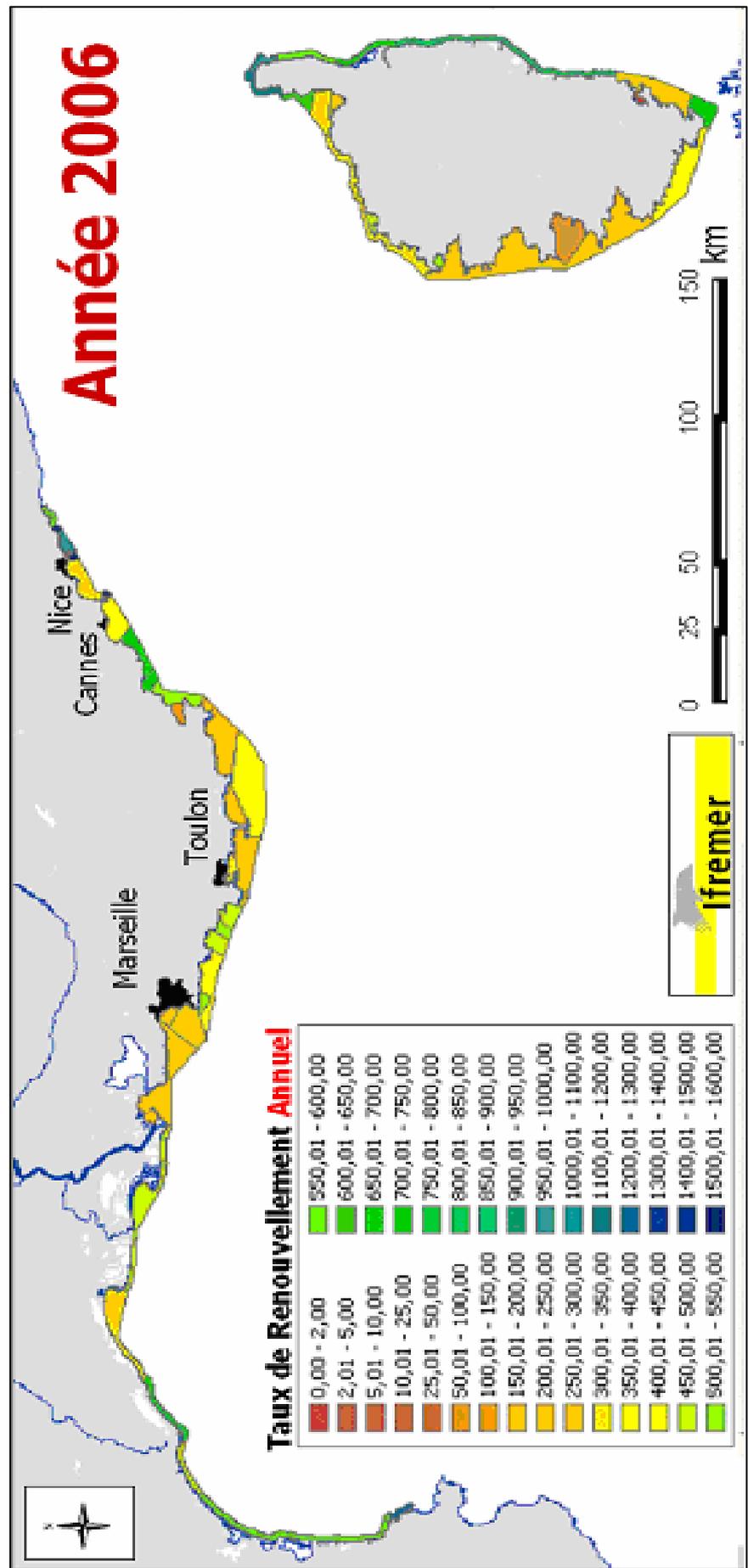
La légende correspondant aux 13 figures de l'Atlas (une figure annuelle et 12 mensuelles) s'appuie sur la table de couleurs ci-contre qui suggère un **Taux de Renouvellement (TR)** des eaux croissant en allant des rouges vers les bleus en passant par les jaunes et les verts.



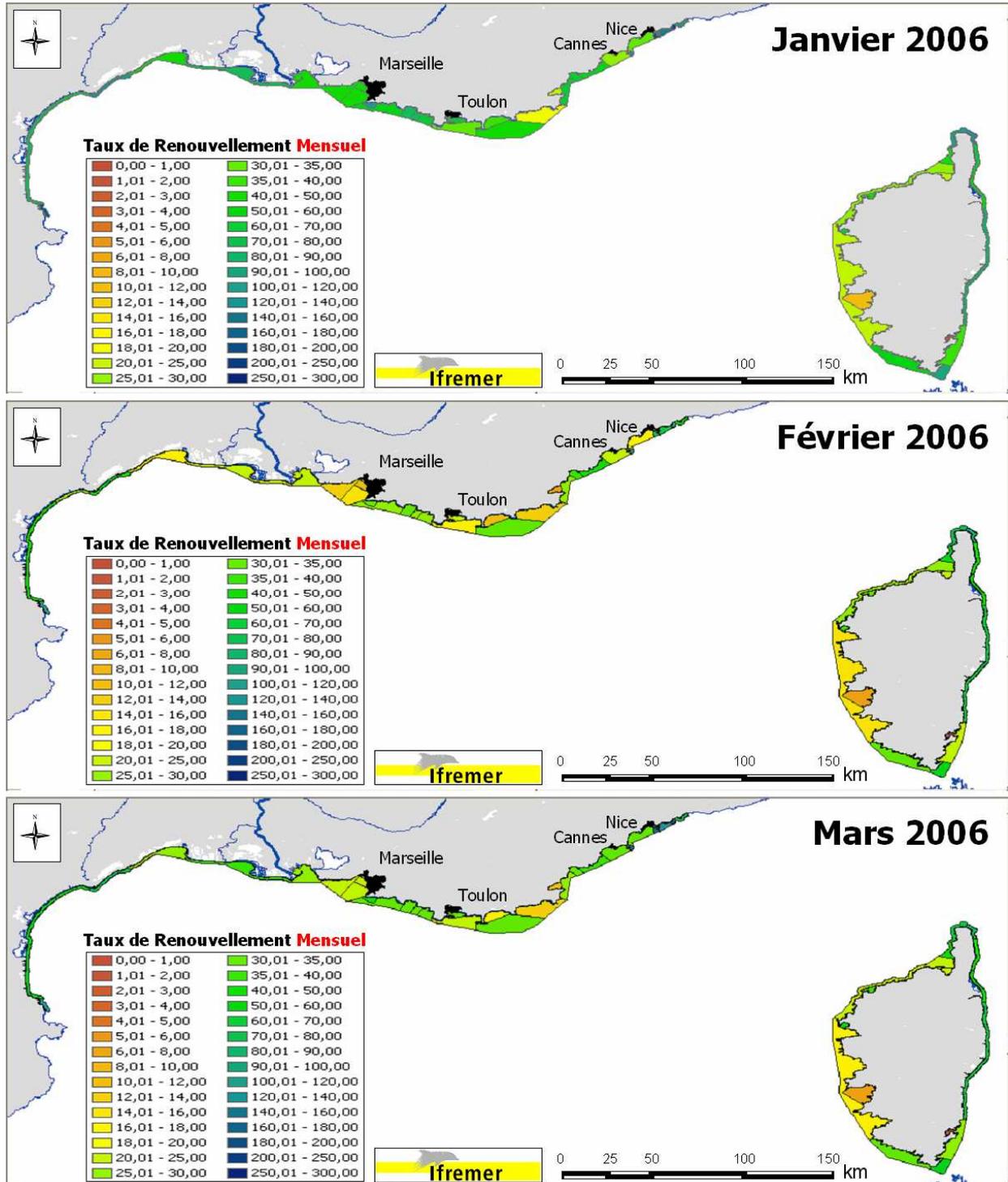
Pour la figure sur le Taux de Renouvellement **annuel**, la gamme des valeurs va de 0 à 1500. Pour les figures sur le Taux de Renouvellement **mensuel**, les valeurs vont de 0 à 300.

Taux de Renouvellement Annuel : (Année 2006)

Calcul à partir des sorties du modèle hydrodynamique MARS-3D sur la zone MENOR (résolution 1,2 km) sur l'année 2006.

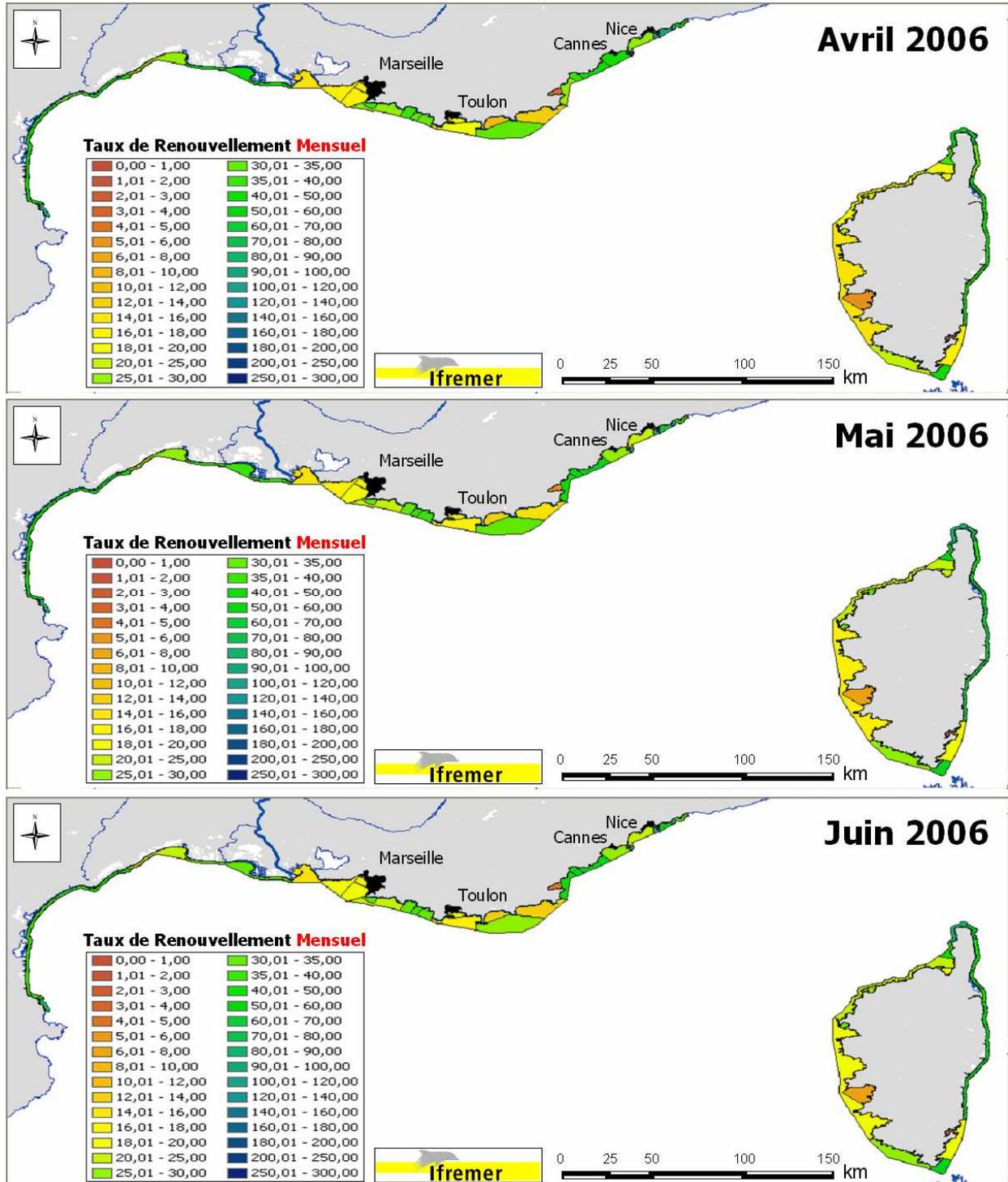


Taux de Renouvellement mensuel : Janvier, Février et Mars 2006

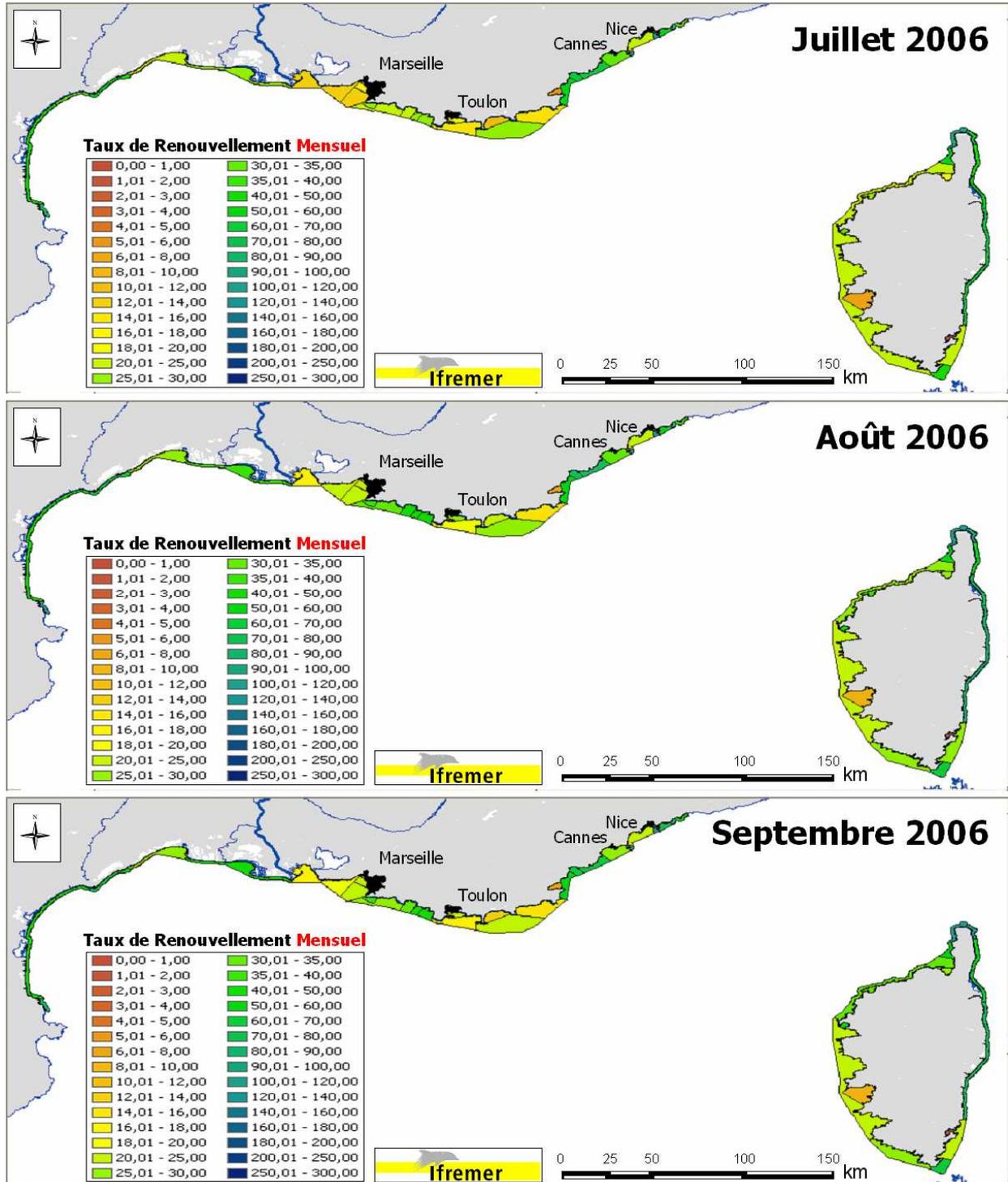


Taux de Renouvellement mensuel :

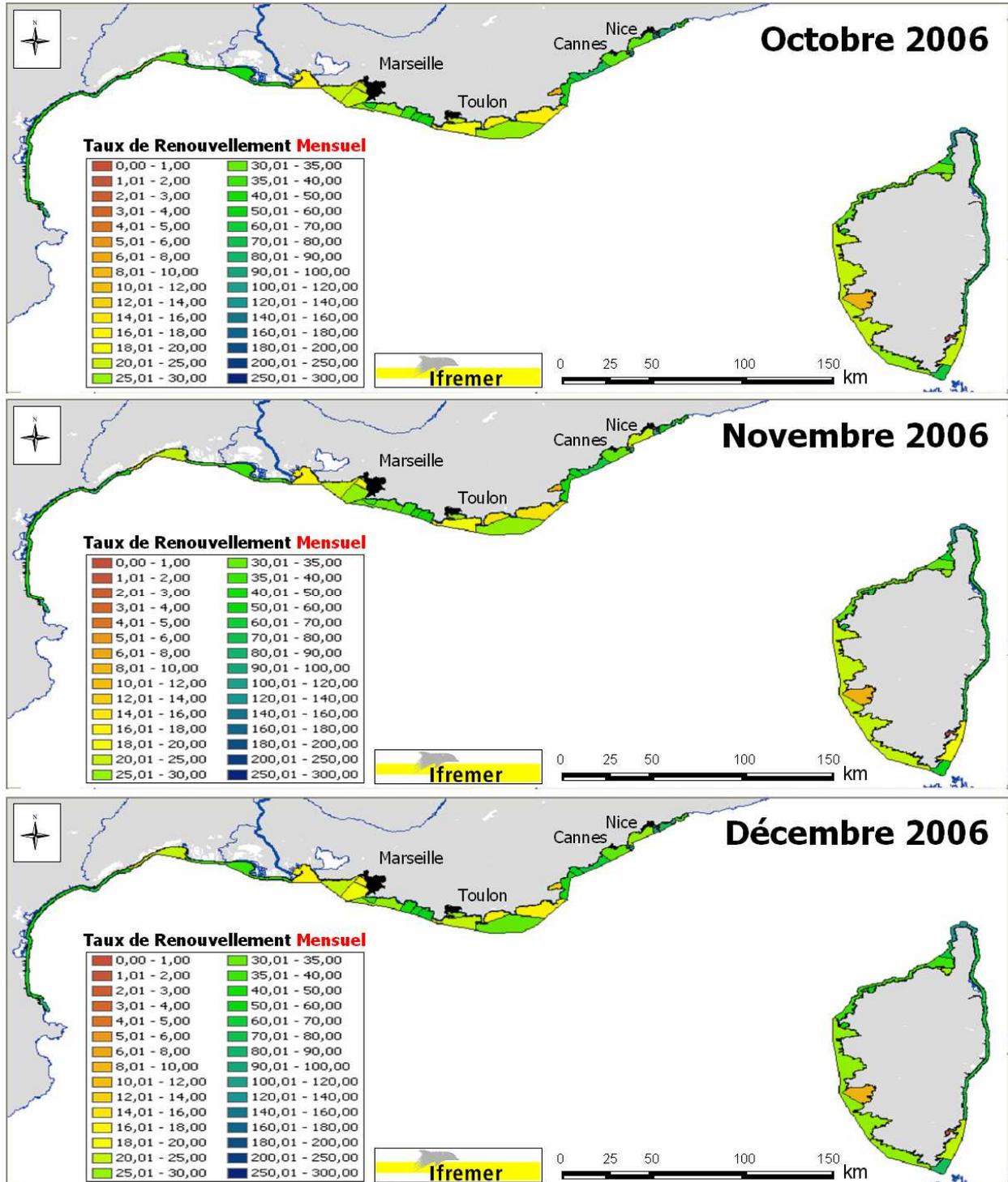
Avril, Mai et Juin 2006



Taux de Renouvellement mensuel : Juillet, Août et Septembre 2006



Taux de Renouvellement mensuel : Octobre, Novembre et Décembre 2006



Annexe 3 : Atlas de la représentativité des points de mesure Chl-A : cartes de l'écart à la moyenne par masse d'eau de la concentration de surface en Chlorophylle A

Dans la présente annexe, on propose sous forme d'Atlas cartographique, une indication de la représentativité d'un point dans une masse d'eau, sur la base de la Chlorophylle A estimée par satellite (6 ans de données : 2003 → 2008).

La **donnée de base** est une intégration temporelle de la ChlA : le **P90 annuel** (pour les principaux produits), et la **médiane mensuelle** pour donner une idée de la variabilité saisonnière.

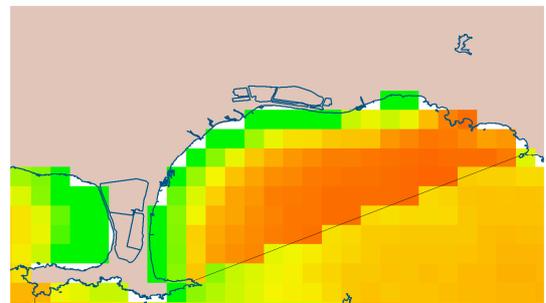
Les produits cartographiques proprement dits reflètent l'**écart** de cette valeur **à la moyenne par masse d'eau**, donnant ainsi une idée de la représentativité de chaque point de l'image par rapport à l'ensemble de la masse d'eau. Ils peuvent être de deux grands types, s'appuyant sur deux tables de couleurs distinctes :

- un produit « normal » qui reflète directement la différence relative à la moyenne (le « P50-P50m » exprimé en pourcentage de la moyenne par masse d'eau), avec une table de couleur allant du **rouge au vert** en passant par le jaune pour représenter en rouge les différences négatives, en vert les différences positives, et en jaune les valeurs proches de la moyenne sur l'ensemble de la masse d'eau ;

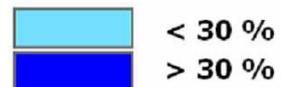


Note importante : bien que la légende indique des valeurs maxima de la différence à +/- 100%, ces **valeurs peuvent largement dépasser ces limites** ; à l'affichage, toutefois, les couleurs resteront les mêmes au delà de +100% et -100%.

La masse d'eau représentée ci-contre ("Cap de l'Esterel - cap de Brégançon") est un exemple typique qui illustre bien le propos. La fine bande verte le long de la côte représente des valeurs fortes, souvent supérieures à 100% (entre 120 et 300% environ), alors que la bande rouge en limite extérieure correspond à des valeurs plus faibles, bien que largement négatives (environ 70%).

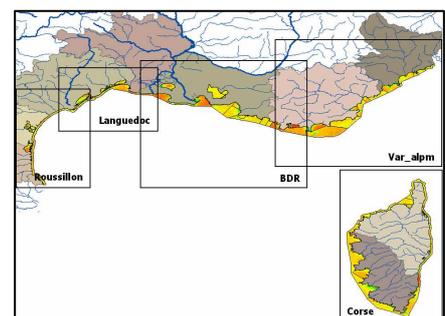


- un produit simplifié qui reflète la différence comparée à un seuil de 30%, avec une table de couleur binaire, avec en **bleu foncé** les différences à la moyenne supérieures à 30% en valeur absolue, et en **bleu clair** les différences inférieures (donc indiquant une bonne représentativité de l'ensemble de la masse d'eau).



Les représentations cartographiques sont consignées en deux parties séparées et à **2 échelles** :

- à **grande échelle** (de l'ordre de 1 :500 000^{ème} ou 1 :750 000^{ème}) pour les produits **annuels** basés sur le **P90**, livrés sur **5 sous-zones** zoomées: Languedoc, Roussillon, Bouches du Rhône (BdR), Var-Alpes Maritimes (Var_alpm), et Corse (Voir figure ci-contre).



Sur ces produits « zoomés », on a représenté **les points « réseau »** de surveillance pour lesquels sont faites des mesures ou des prélèvements **d'eau**⁵ (voir légende ci-contre) afin de visualiser leur position et juger ainsi de leur représentativité. On y retrouve les stations du **REPHY**, avec les points « chloro » où sont faites les mesures de chlorophylle et les autres points du REPHY, ainsi que les points du **SOMLIT** et les stations **DCE** correspondant au Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS) et au Réseau de Contrôle Opérationnel (RCO).

- | | |
|---|------------------------|
| ● | Point « Eau » DCE |
| ★ | Point SOMLIT |
| ▲ | Point REPHY |
| ☆ | Point REPHY « Chloro » |

- à **petite échelle** (de l'ordre de 1 : 3 000 000^{ème}) pour les produits **mensuels**, sur l'ensemble de la méditerranée française. Ces produits moins précis sont plutôt à vocation d'information générale sur les différences saisonnières.

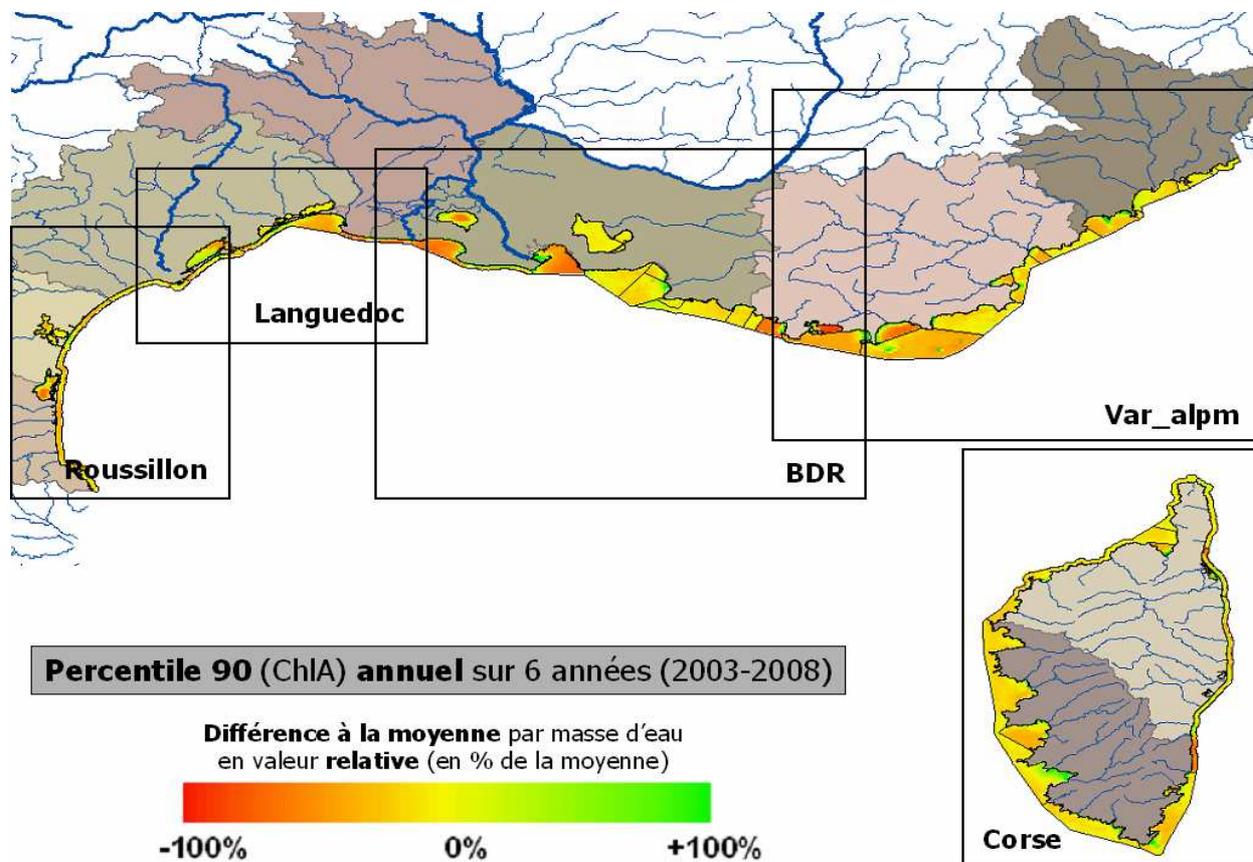
⁵ A l'exclusion, par exemple des points « chimie » qui s'appuient sur des capteurs passifs et sur lesquels il n'est pas pratiqué de prélèvement d'eau.

Annexe 3 : Partie 1

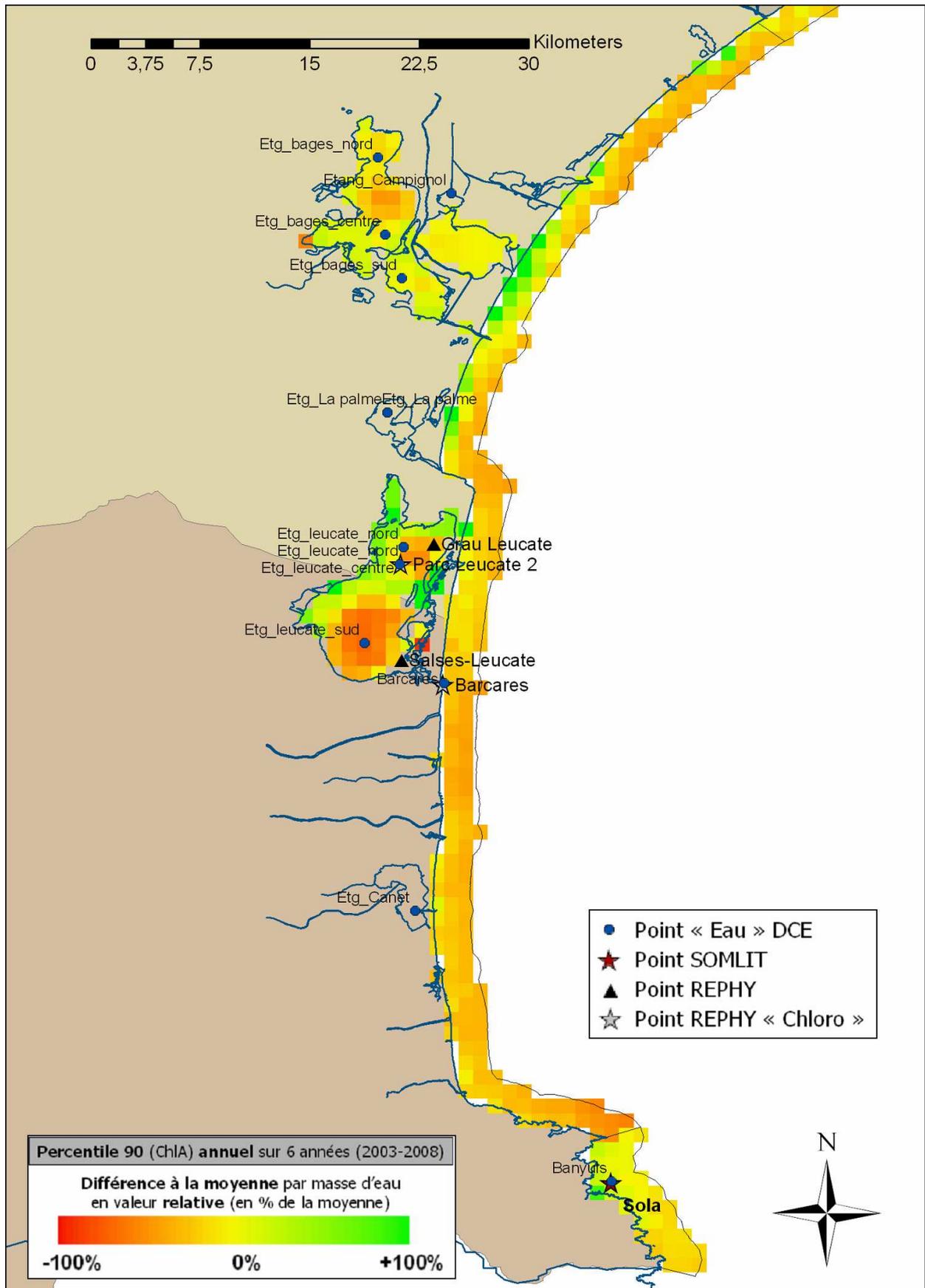
Atlas de la différence du Percentile 90 (ChIA) annuel (2003-2008) à la moyenne par masse d'eau

Sur 5 sous zones Zoomées :

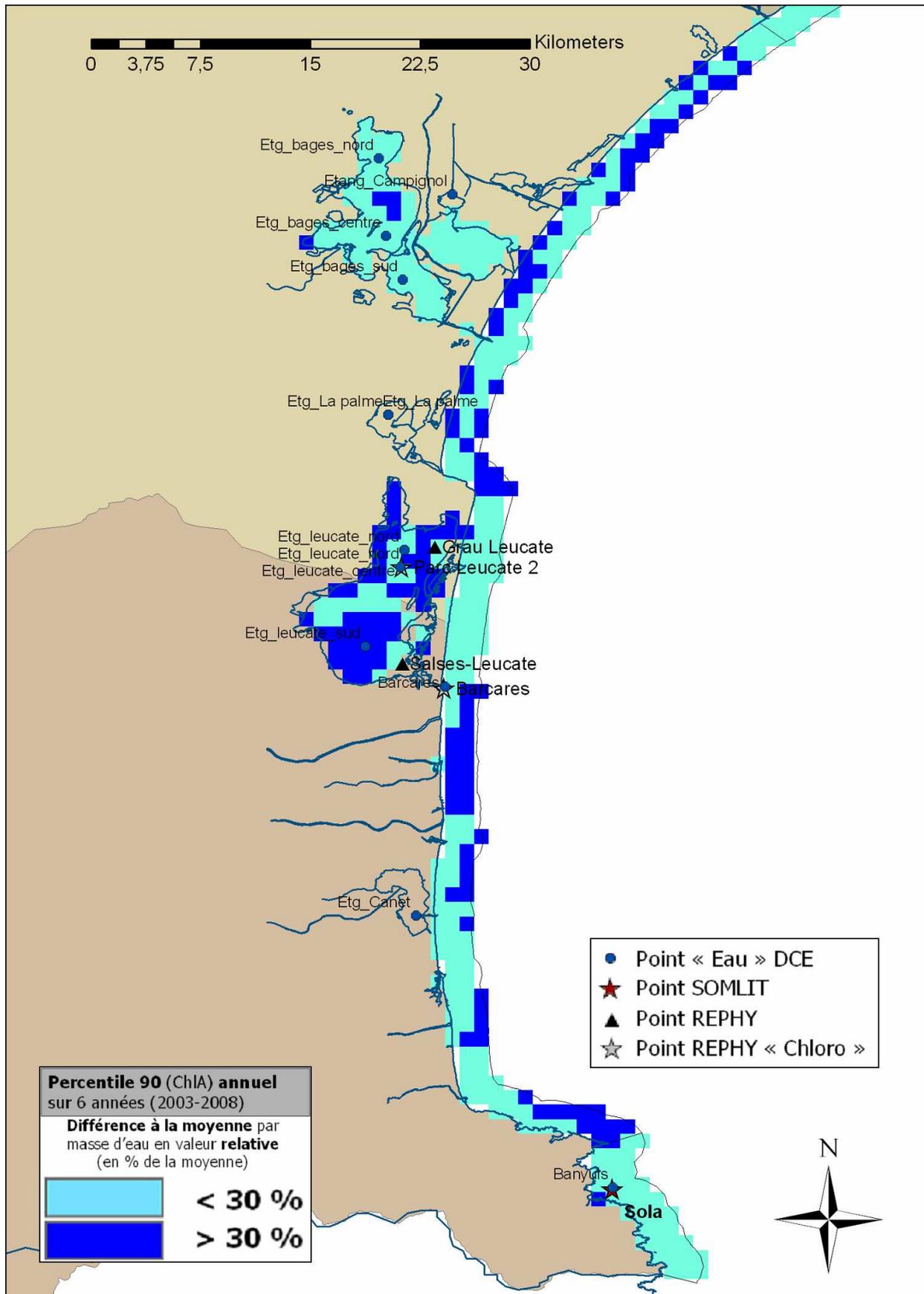
Différence à la moyenne du P 90 (ChIA) sur l'ensemble de la méditerranées française et fenêtres approximatives de Zoom :



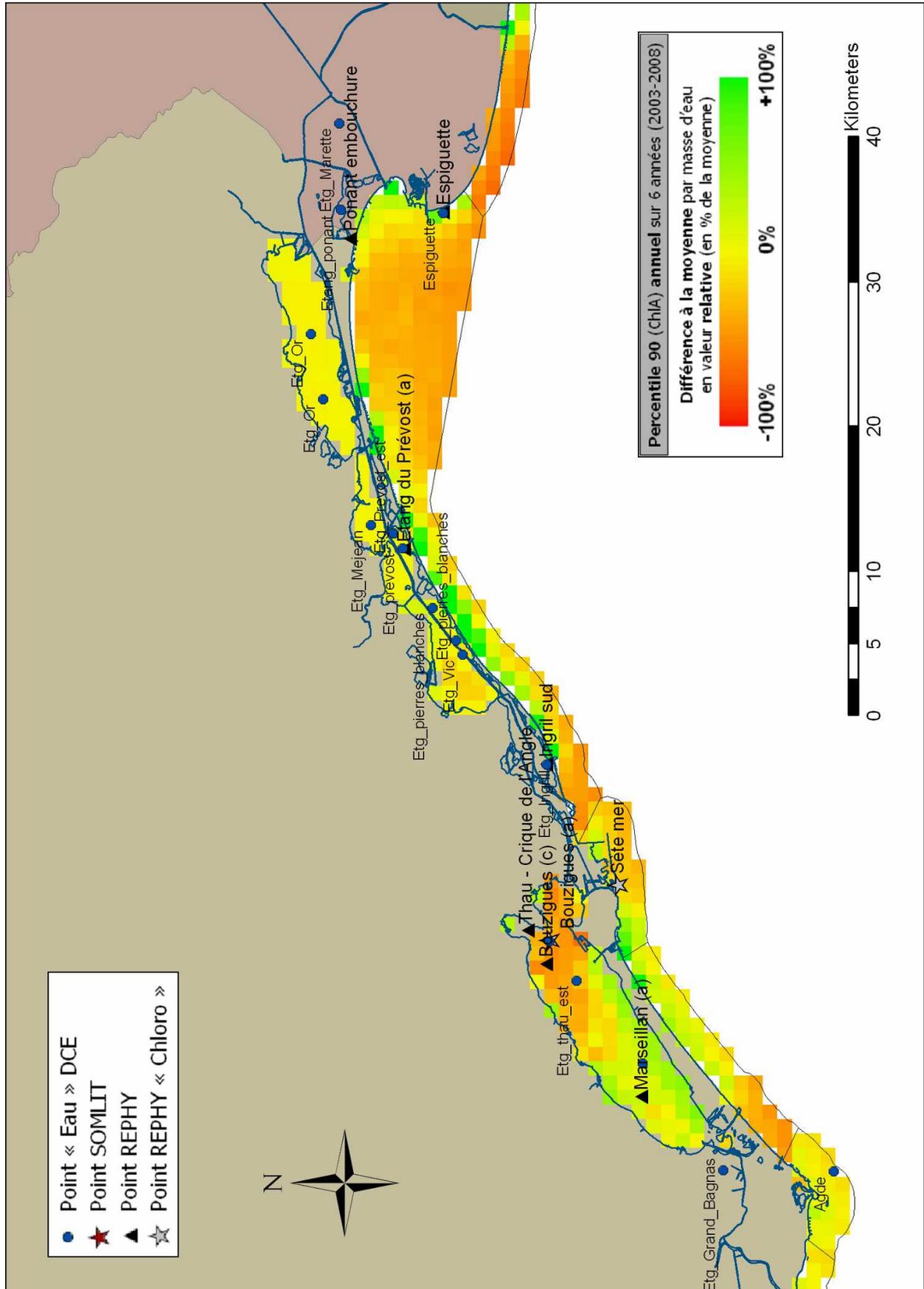
Zoom : Roussillon



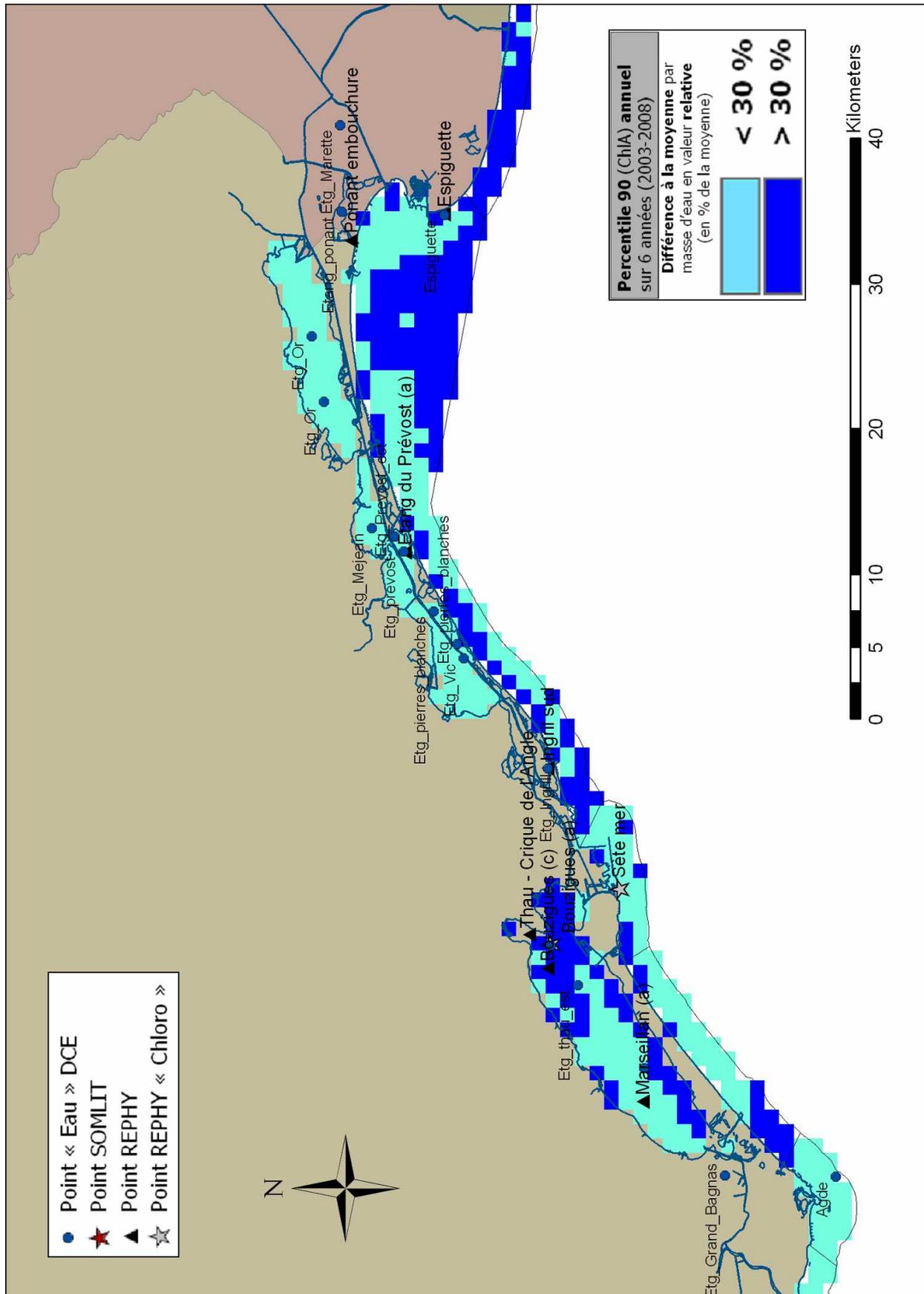
Zoom : Roussillon



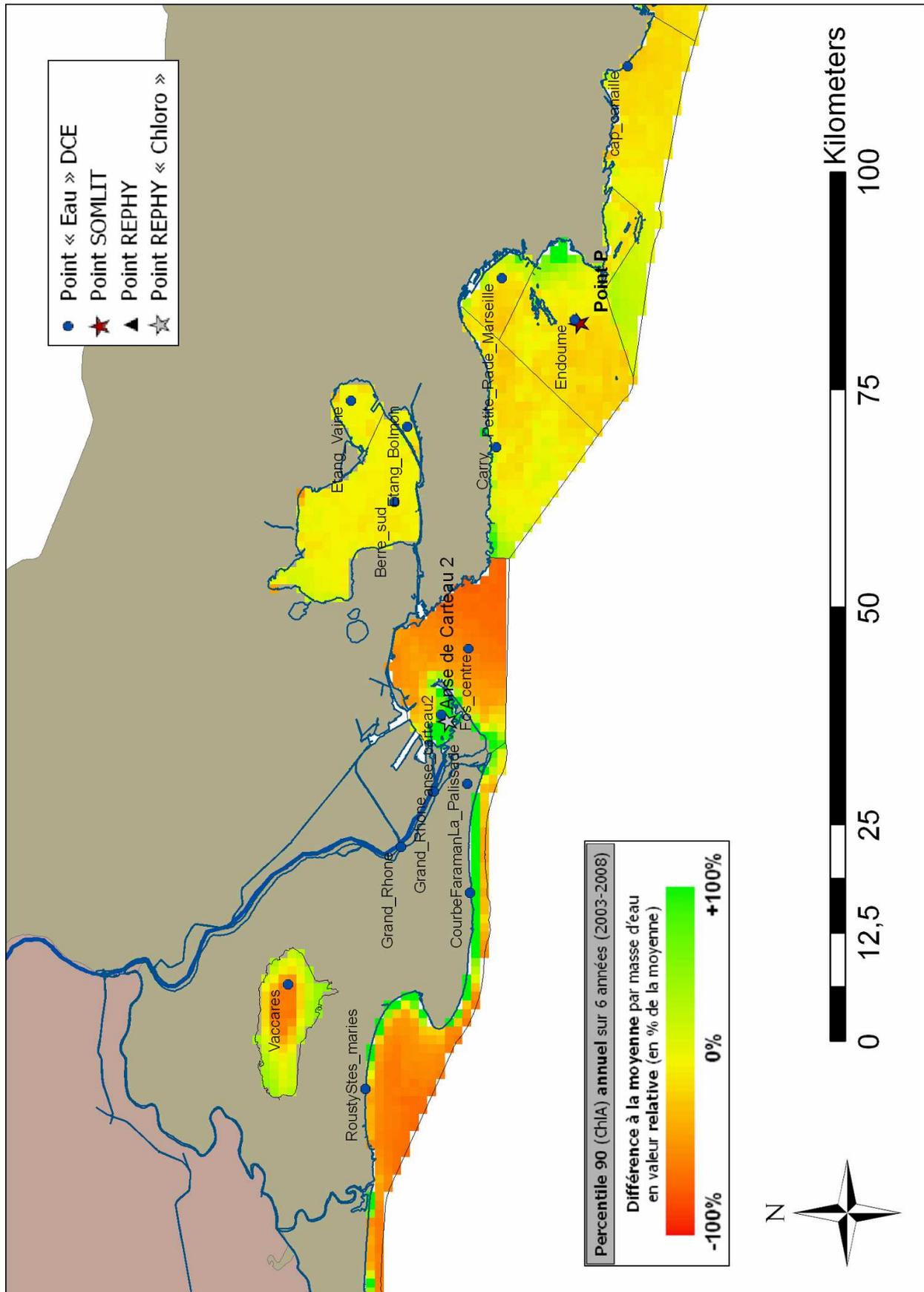
Zoom : Languedoc



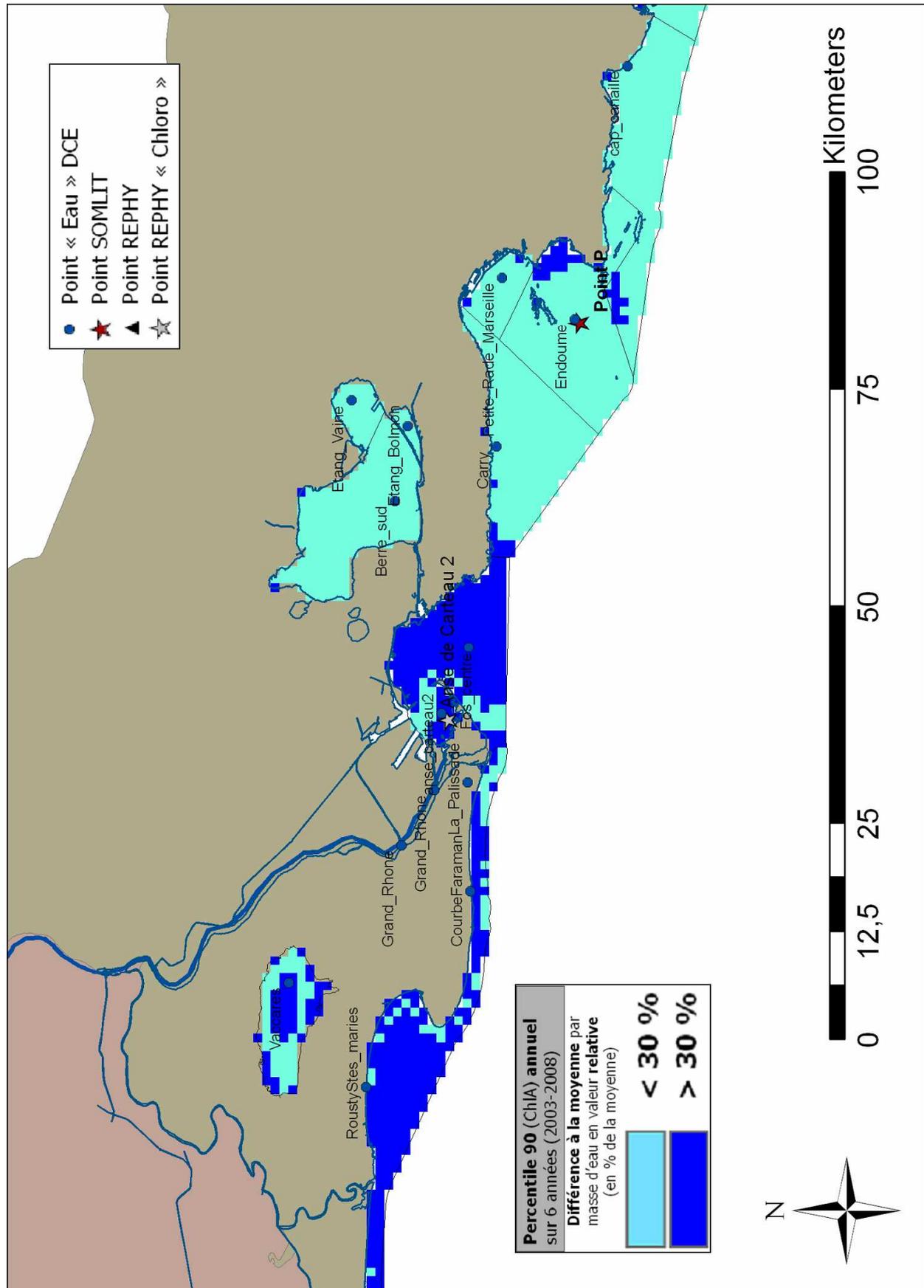
Zoom : Languedoc



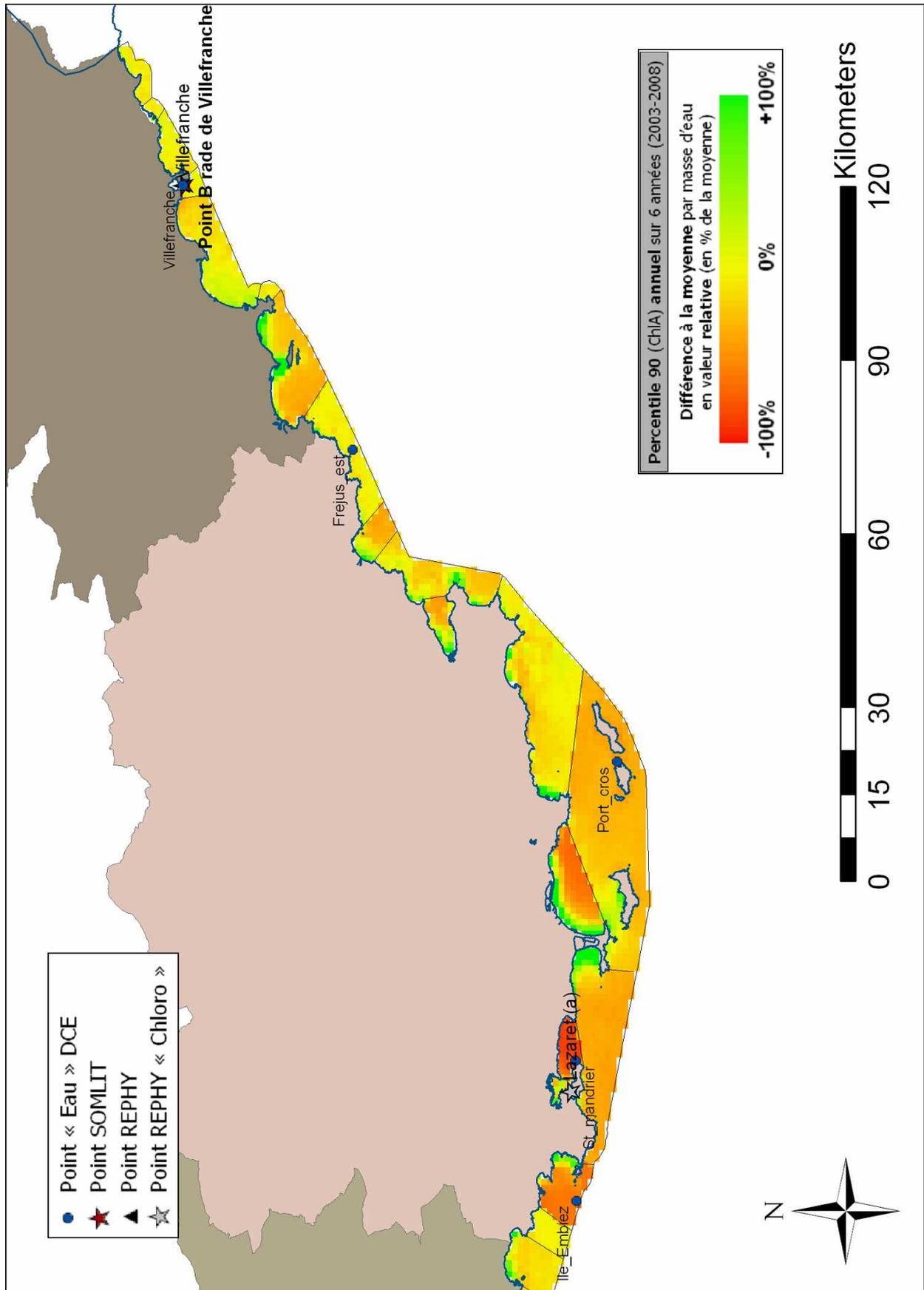
Zoom : Bouches-du-Rhône



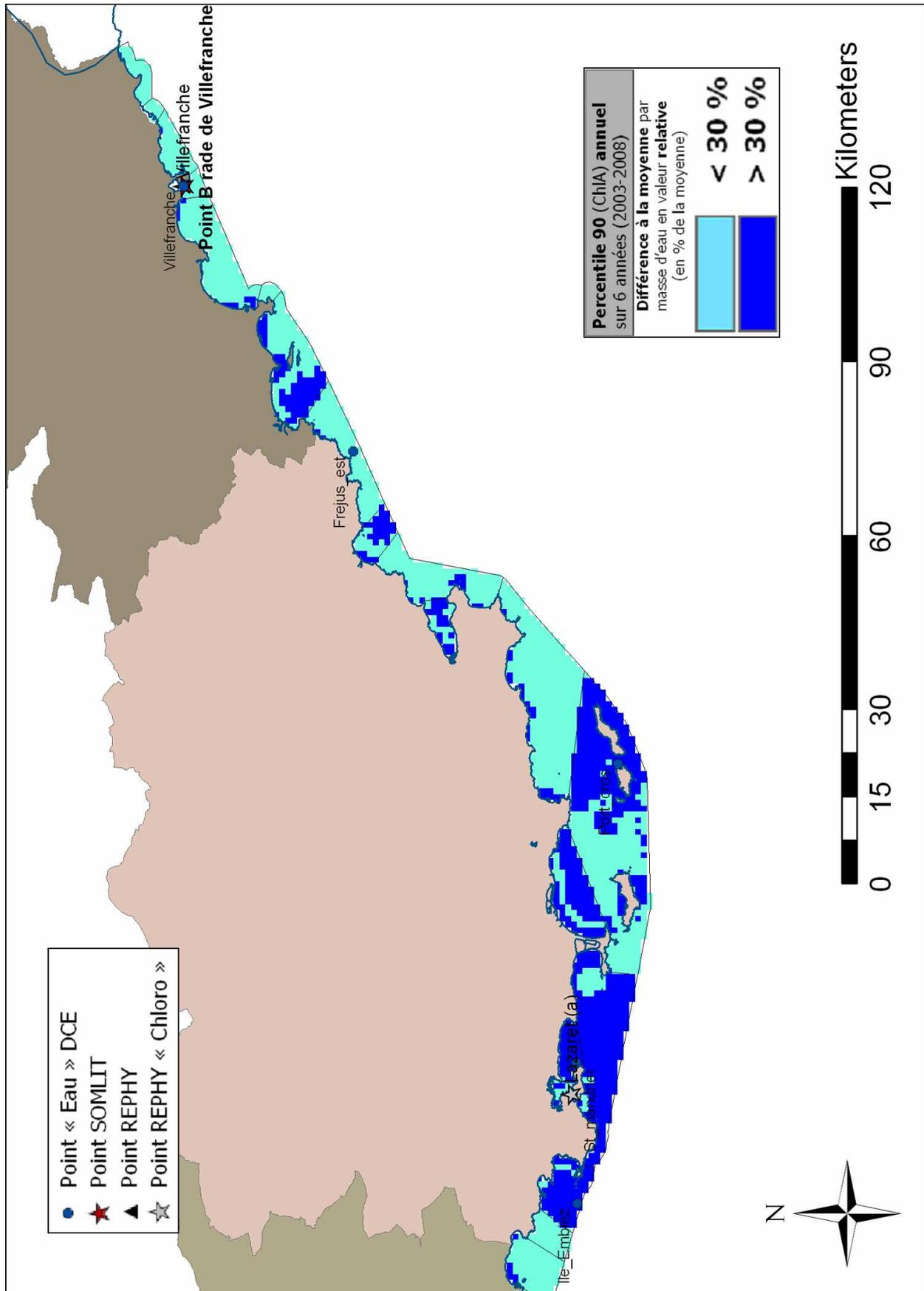
Zoom : Bouches-du-Rhône



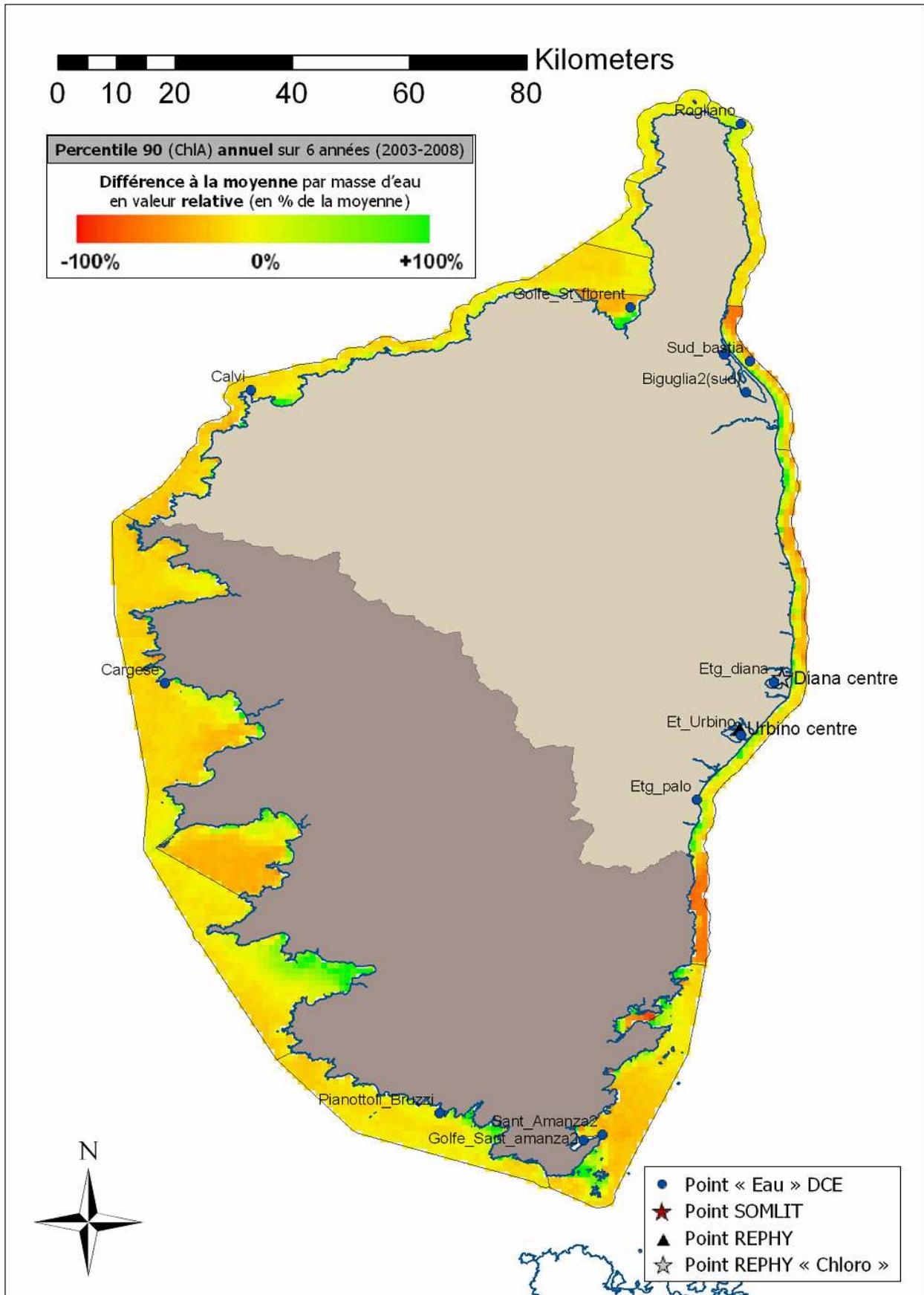
Zoom : Var / Alpes Maritimes



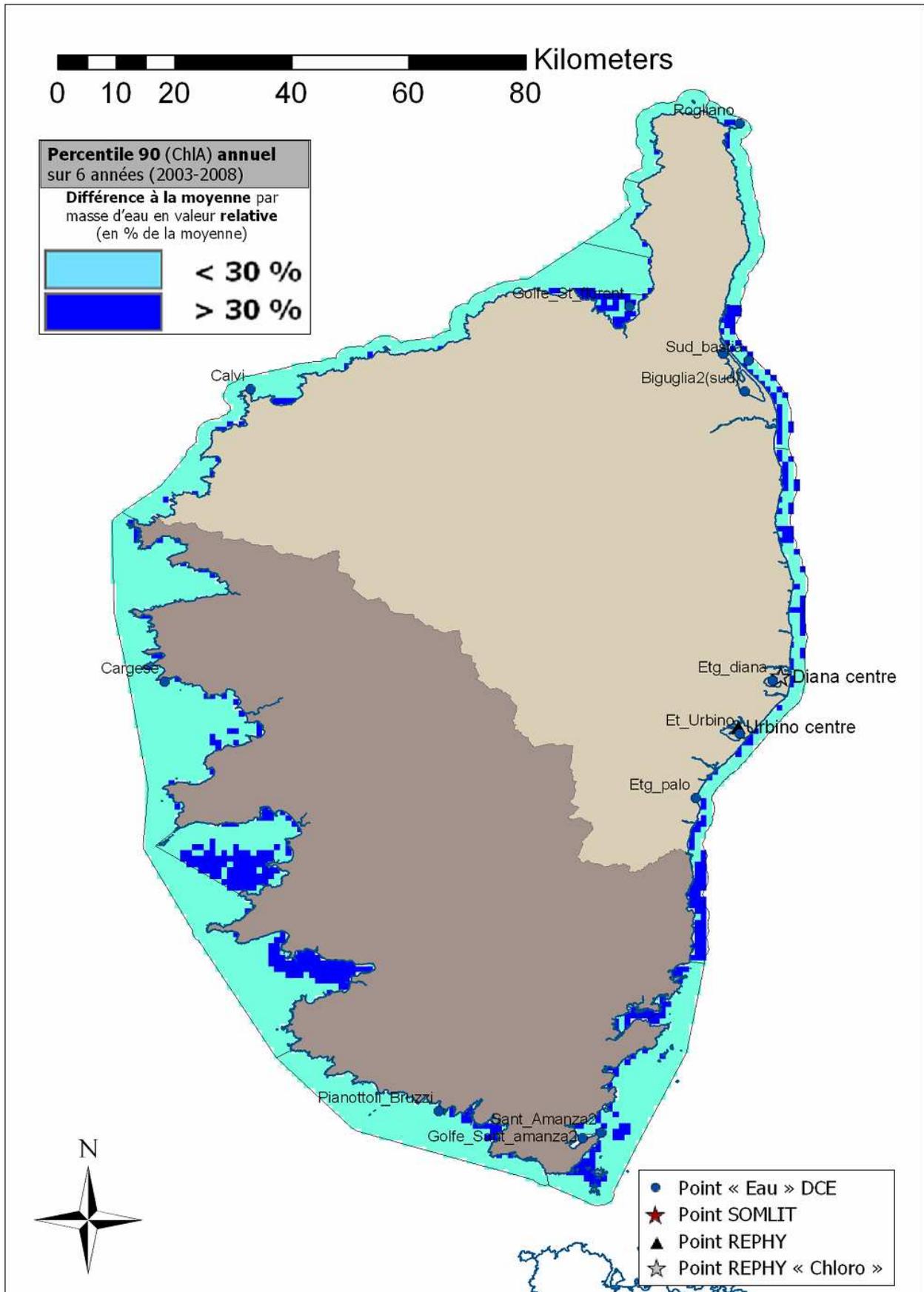
Zoom : Var / Alpes Maritimes



Zoom : Corse



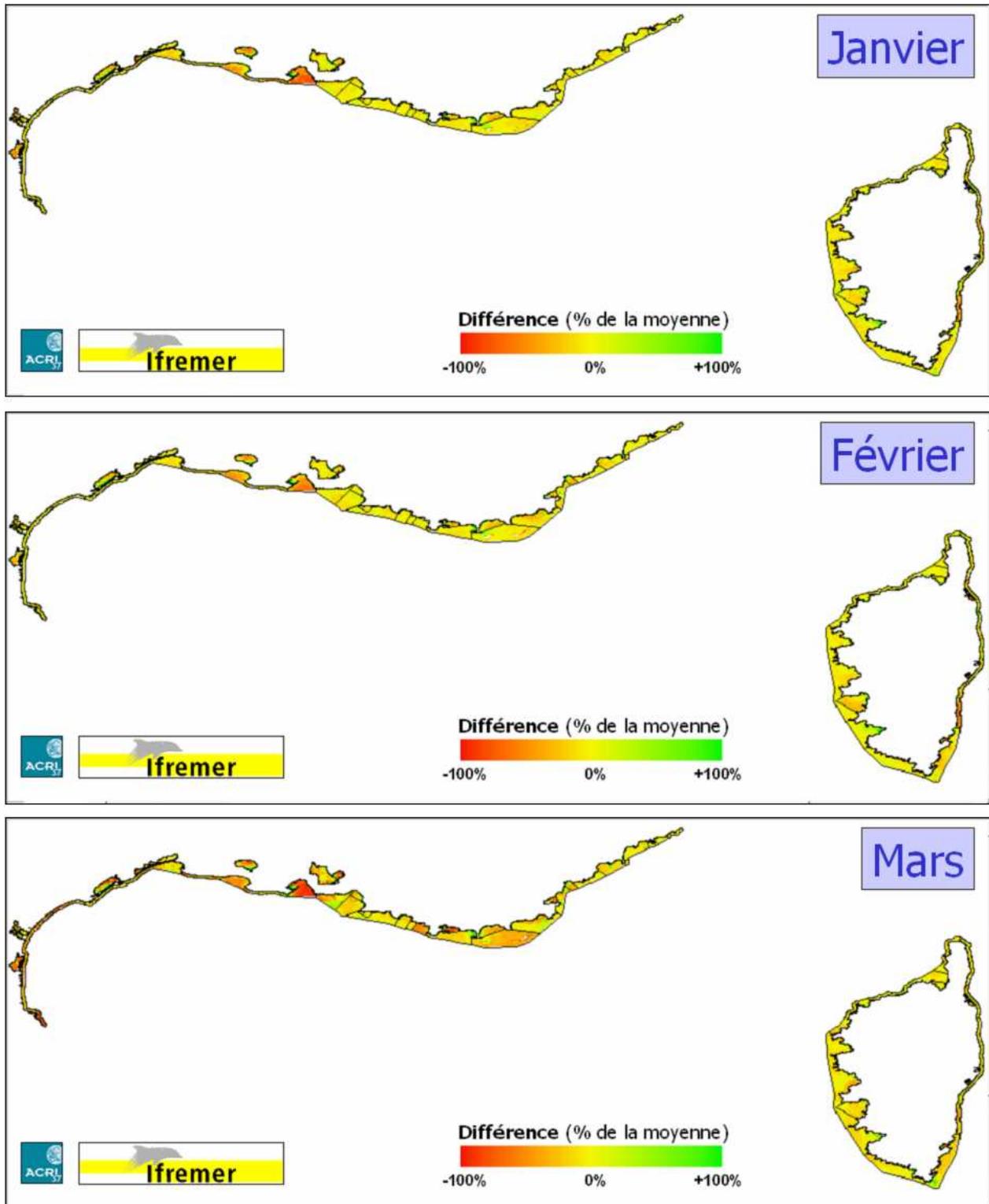
Zoom : Corse



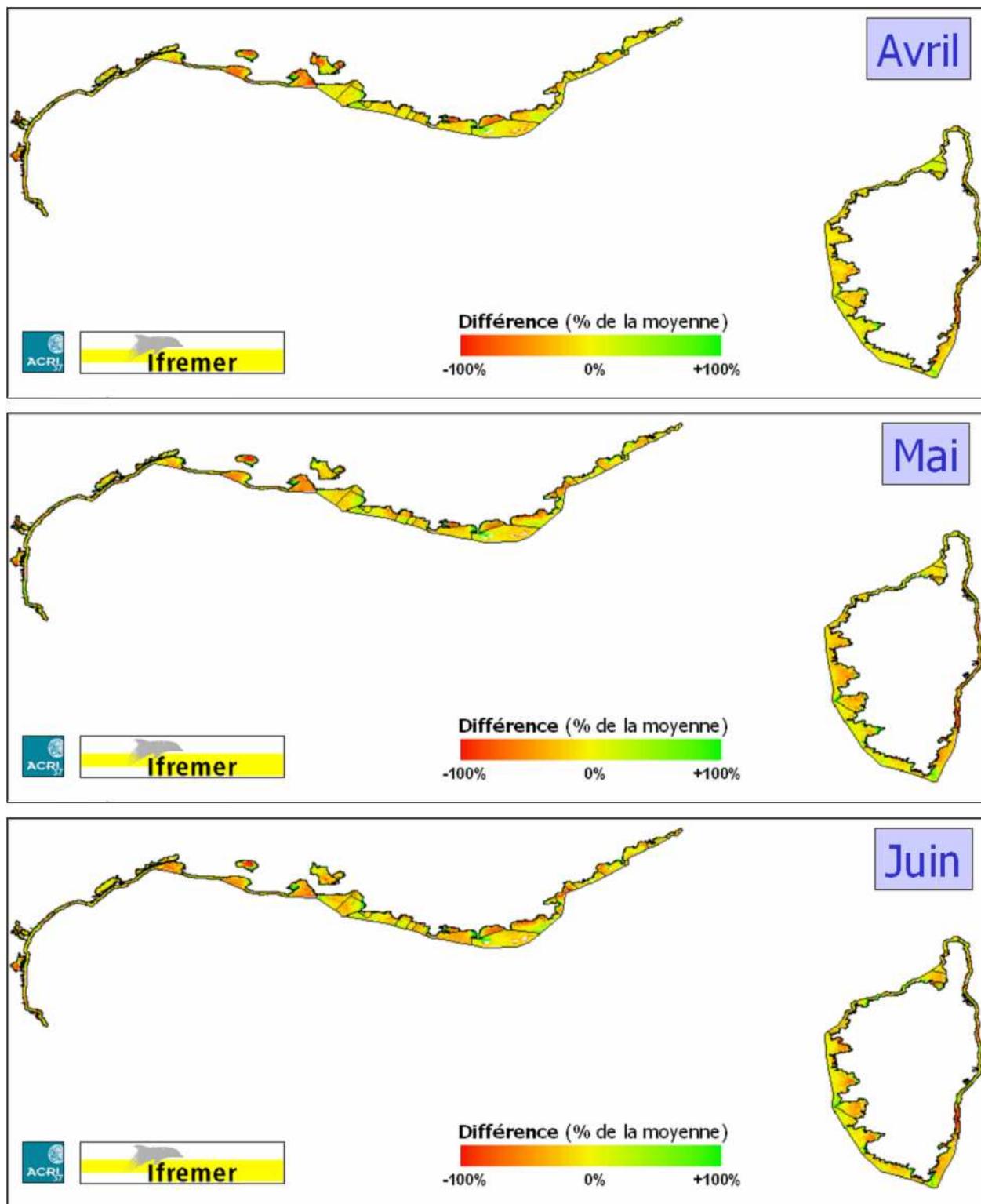
Annexe 3 : Partie 2

**Atlas différence de la médiane mensuelle (ChIA)
Calculée sur 6 années de données (2003-2008)
à la moyenne par masse d'eau
sur l'ensemble de méditerranée française**

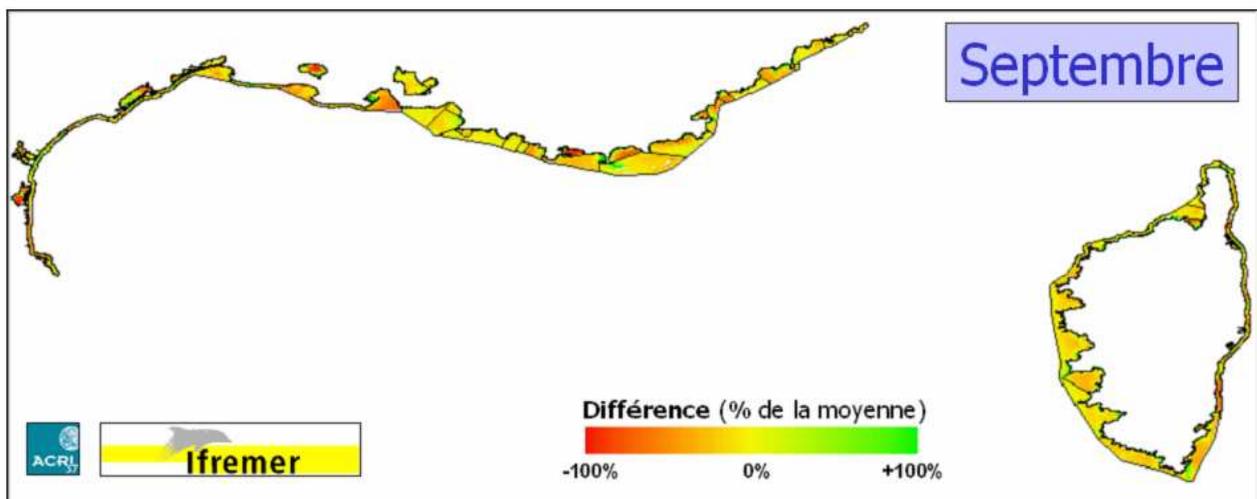
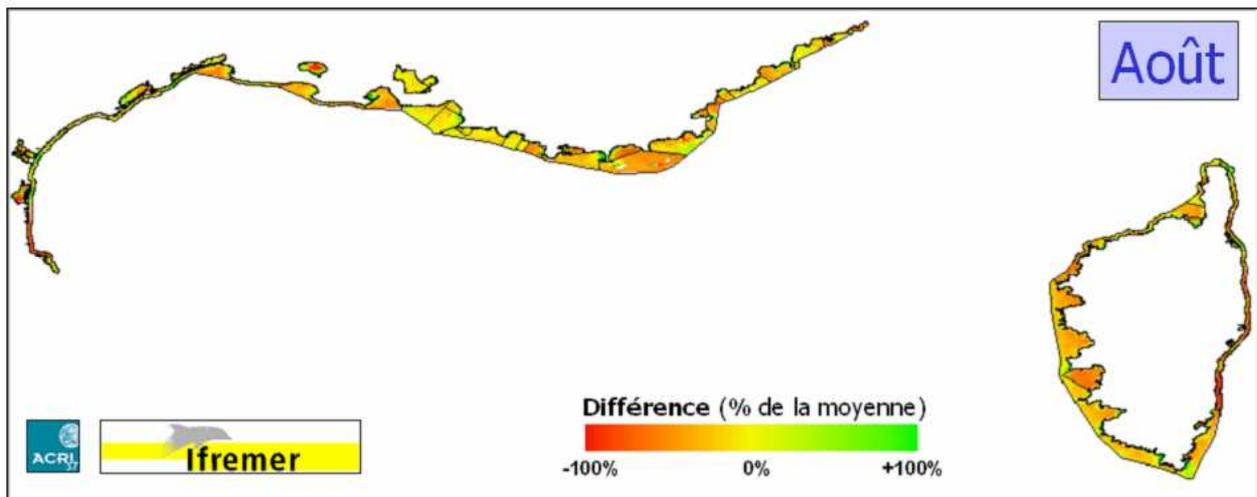
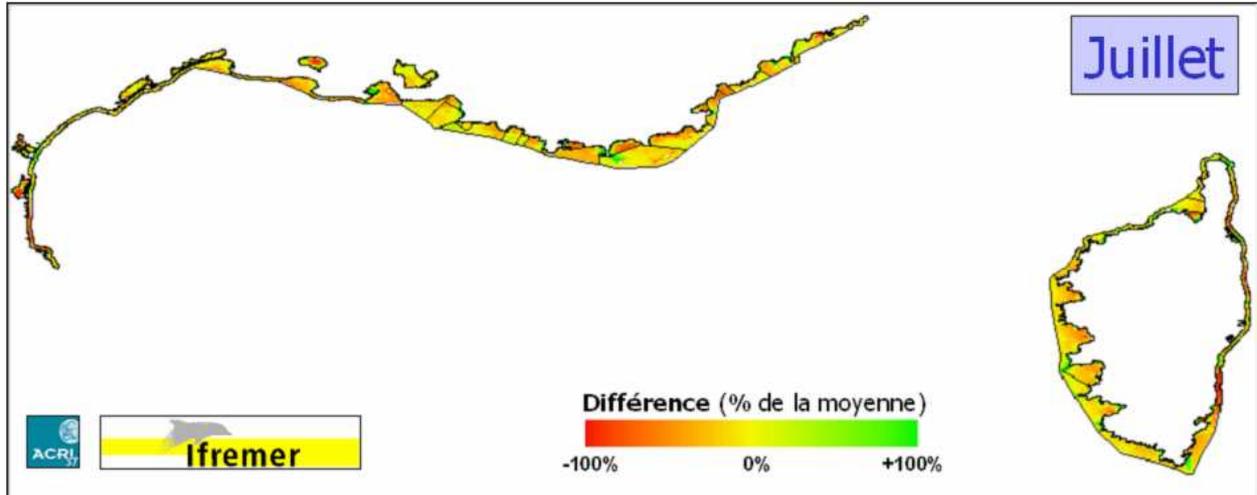
ChIA : différence à la médiane mensuelle par masse d'eau Janvier, Février et Mars (2003-2008)



ChIA : différence à la médiane mensuelle par masse d'eau Avril, Mai et Juin (2003-2008)



ChIA : différence à la médiane mensuelle par masse d'eau Juillet, Août et Septembre (2003-2008)



ChIA : différence à la médiane mensuelle par masse d'eau Octobre, Novembre et Décembre (2003 – 2008)

