

IFREMER

Département Dynamiques de l'Environnement Côtier

DYNECO/PELAGOS

**Atlas de la Température, de la concentration en
Chlorophylle et de la Turbidité de surface du plateau
continental français et de ses abords de l'Ouest européen**

Atlas réalisé, à la demande du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, du Transport et du Logement, dans le but de caractériser l'Etat Initial de la Z.E.E. française pour la Directive Cadre de la Stratégie du Milieu Marin

Auteurs : F. Gohin Ifremer/DYNECO-PELAGOS

avec la participation de :

B. Saulquin (Société ACRI-ST) pour la température de surface de la mer et

P. Bryère (Société HOCER) pour la chlorophylle et la turbidité.

Contact: Francis Gohin – 02 98 22 43 15 - francis.gohin@ifremer.fr

Sommaire

I- OBJET DES ATLAS	3
I.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE	3
I.2 LES VARIABLES CARTOGRAPHIÉES: TEMPERATURE, CHLOROPHYLLE ET TURBIDITE	4
I.2.1 LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA MER	4
I.2.2 LA CHLOROPHYLLE ET LA TURBIDITE DE SURFACE	4
I.3 VALEUR MOYENNE ET PERCENTILES DES DISTRIBUTIONS	5
II- LES DONNEES DES SATELLITES ET LE RESEAU DE VALIDATION	6
II.1 LA ZONE TRAITÉE	6
II.2 LES CAPTEURS SPATIAUX DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA MER ET LES DONNEES DE VALIDATION	8
II.2.1 LES CAPTEURS DE LA TEMPERATURE DE SURFACE	8
II.2.2 ALGORITHMES DE TRAITEMENT	8
II.2.3 DONNEES DE VALIDATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA MER	8
II.3 LES DONNEES DES CAPTEURS SPATIAUX DE LA COULEUR DE L'EAU ET LEUR VALIDATION	13
II.3.1 LES CAPTEURS DE LA COULEUR DE L'EAU	13
II.3.2 ALGORITHMES DE TRAITEMENT	13
II.3.3 VALIDATION DE LA CHLOROPHYLLE ET DE LA TURBIDITE SUR MESURES IN-SITU	15
III- LES ATLAS	24
III.1 CLIMATOLOGIE MENSUELLE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA MER 1986-2009	24
III.2 RECHAUFFEMENT ET VARIABILITE DE LA TSM SUR LA PERIODE 1986-2009	28
III.2.1 PRÉSENTATION	28
III.2.2 VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DE LA TSM ANALYSEE EN COMPOSANTES PRINCIPALES	31
III.2.3 VARIATION INTERANNUELLE DE LA TSM A TRAVERS DES INDICATEURS STATISTIQUES SIMPLES : VALEURS MOYENNE, PERCENTILE 05 ET PERCENTILES 95	33
III.3 CLIMATOLOGIE MENSUELLE DE LA CHLOROPHYLLE-A DE SURFACE 2003-2009	34
III.4 PERCENTILE 90 DE LA CHLOROPHYLLE-A LORS DE LA PERIODE PRODUCTIVE	38
III.5 CLIMATOLOGIE MENSUELLE DE LA TURBIDITE DE SURFACE 2003-2009	39
III.6 DISCUSSION SUR LES ATLAS ET ACCES AUX DONNEES	43
IV- RÉFÉRENCES	44
V- ANNEXE	46
V.1 ATLAS DE LA CHLOROPHYLLE ET DE LA TURBIDITE A 5KM DE SEAWiFS	46

I- OBJET DES ATLAS

I.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Pour caractériser l'état initial de la ZEE française (volet hydrologie et eutrophisation), les informations des satellites peuvent être couplées à celles des mesures *in situ*, obtenues lors de campagnes océanographiques ou à partir de réseaux côtiers.

Les observations des satellites permettent de cartographier la Température de Surface de la Mer ou TSM (Saulquin et al., 2010), la chlorophylle, indicateur de la biomasse du phytoplancton, et la turbidité, indicateur des particules en suspension et de la clarté de l'eau. Elles complètent la description de l'état des couches profondes de l'océan qui ne peut être obtenue que par des mesures conventionnelles (température, salinité, sels nutritifs, oxygène) ou par modélisation. Dans le but de cartographier et de suivre les évolutions de la TSM, chlorophylle et turbidité à la surface de la mer, les satellites fournissent une densité d'observation spatiale inégalée par les méthodes traditionnelles. En fréquence temporelle, seules les bouées instrumentées automatiques de type MAREL leur sont supérieures, mais la couverture spatiale de ces dernières est très faible.

Ces atlas ont donc été réalisés à partir des données satellite après validation sur des mesures *in situ* prises le long du littoral. Dans le choix des mesures *in situ* nous avons privilégié celles appartenant à des réseaux pérennes comme SOMLIT/INSU et REPHY/Ifremer. Ces mesures des stations côtières sont de plus en plus nombreuses et leur qualité (par intercalibration) ne cesse de s'améliorer au fur et à mesure que se mettent en place les réseaux de surveillance. La méthode d'évaluation des paramètres de surface de l'environnement côtier développée dans cet atlas s'appuie sur celle déjà en cours pour l'application de la Directive Cadre Eau (Gohin et al., 2008) mais en l'étendant considérablement au large. Elle tire bénéfice aussi de l'expérience acquise dans le projet d'océanographie côtière PREVIMER, là encore en élargissant la zone.

I.2 LES VARIABLES CARTOGRAPHIQUES: TEMPERATURE, CHLOROPHYLLE ET TURBIDITE

I.2.1 La Température de Surface de la Mer

La Température de Surface de la Mer est communément obtenue par satellite depuis de nombreuses années. Les satellites de la série NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) lancés par l'agence américaine du même nom sont à l'origine de la plus longue série de données d'observation spatiales de l'océan. En effet depuis 1978 et le lancement de NOAA-7 les données du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) sont enregistrées numériquement et mises à la disposition de la communauté internationale. La série traitée dans ces atlas concerne la température de surface analysée (vérifiée et qualifiée) des données AVHRR de 1986 à 2009. Le principe d'observation de la TSM par satellite repose sur la mesure du signal (température de brillance) émis par la surface de la mer (pellicule fine, de l'ordre du mm) dans l'infrarouge thermique, entre 10 et 11 μm . Les températures de brillance de deux canaux infrarouges sont ensuite combinées pour filtrer au mieux les effets de l'atmosphère (vapeur d'eau) et obtenir la TSM. La méthode est sensible à la présence de nuages qui forment un bouclier totalement opaque. Elle est aussi sensible au réchauffement éventuel de la pellicule de surface océanique qui peut apparaître en absence de vent et sous fort ensoleillement. De ce fait, les données utilisées pour ces atlas sont des observations de nuit, lorsque le mélange de la couche de surface est le plus fort. Ces données ont été calibrées par la NOAA sur des mesures in situ situées à 1 mètre de profondeur. Elles sont intégrées sur un pixel, unité de base d'observation, de l'ordre de $5*5 \text{ km}^2$. Elles correspondent au format GAC (Global Area Coverage) des produits globaux de la NASA. La dimension la plus fine, de l'ordre de 1.2 km sous la trace du satellite, n'étant disponible historiquement qu'à proximité des stations de réception.

I.2.2 La Chlorophylle et la Turbidité de Surface

La chlorophylle-a et la turbidité sont deux paramètres environnementaux issus des capteurs dits de la Couleur de l'Eau. La technique de mesure est comme celle de l'AVHRR dite passive, par opposition aux radars, et sensible aux nuages. Le principe de base consiste à mesurer le signal (radiance) réémis par la couche de surface océanique après absorption et diffusion de la lumière solaire (irradiance). La réflectance marine est le rapport entre la radiance quittant l'eau et l'irradiance entrante. Les longueurs d'onde considérées sont celles du visible (de 400 à 700 nm). Le premier capteur de la couleur de l'eau véritablement opérationnel fut CZCS (Coastal Zone Color Scanner) lancé par la NASA en 1978. Suite au succès de CZCS, d'autres capteurs furent lancés dans les années 80 et 90. Les plus célèbres sont SeaWiFS (Sea-viewing Wide-Field-of-view Sensor), mis en orbite en fin 1997, MODIS/AQUA (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) de la NASA, et MERIS (MEDIUM Resolution Imaging Spectrometer) de l'ESA, l'Agence Spatiale Européenne, depuis 2002. Le but de ces instruments est de mieux comprendre le cycle du carbone, via sa composante phytoplanctonique qui assure de l'ordre de 50% de la photosynthèse globale.

Les composantes optiquement actives de l'océan du large sont l'eau de mer pure, dont les propriétés optiques sont bien connues, et le phytoplancton caractérisé par son contenu en chlorophylle-a, un pigment absorbant fortement dans le bleu (pic majeur à 443 nm) et dans le rouge (second pic d'absorption à 665 nm). Du fait de l'absorption dans le bleu, la concentration en chlorophylle-a est inversement proportionnelle au rapport des réflectance Bleu/Vert. Les eaux riches en phytoplancton apparaissent vertes car les rayonnements bleu et rouge sont préférentiellement absorbés et ne ressortent que partiellement de l'eau.

Dans les eaux côtières, le milieu est optiquement complexe car les matières minérales remises en suspension par le courant de marée et les tempêtes ainsi que les substances organiques dissoutes colorées véhiculées dans le panache des fleuves vont ajouter leurs effets à l'eau pure et au

phytoplancton. Si la chlorophylle est estimée par une technique empirique dérivée du rapport des réflectances Bleu/Vert, les matières en suspension (MES) sont déduites d'un algorithme semi-analytique faisant intervenir les propriétés optiques inhérentes du milieu, l'absorption et la rétrodiffusion. La turbidité sera ensuite calculée simplement, à partir de la concentration en chlorophylle (biomasse du phytoplancton) et de la concentration des MES minérales.

Il est important de noter que la turbidité moyenne calculée dans ces atlas est exprimée en unité NTU (Nephelometric Turbidity Unit, U.S.E.P.A 180.1) alors que les mesures récentes sont en unité FNU (Formazin Nephelometric Unit, ISO 7027). Il s'agit d'un choix volontaire pour tenir compte du fait que la plupart des mesures *in situ* ayant servi à la qualification des observations satellite sont en NTU. Les données exprimées en NTU ont été obtenues par la mesure de la diffusion à 90+/-30° d'un rayon lumineux (de type lampe au tungstène) dans la gamme 400-680 nm. Les mesures en FNU sont plus précises car elles sont obtenues à partir d'une lumière incidente à 860 +/- 60 nm (LED) diffusée à 90 +/- 2.5°. Si les mesures sont similaires sur les échantillons étalons, dans le milieu côtier les mesures en NTU peuvent être plus sensibles à la présence de substances organiques dissoutes colorées (substances jaunes) que celles en FNU. Toutefois, et bien que l'estimation de la turbidité de l'espace n'ait été que rarement pratiquée à l'échelle de la région traitée dans cette étude, les résultats apparaissent très convaincants par comparaison aux mesures *in situ* en NTU, ou ramenées en NTU. Le passage en unité FNU se fera sans aucun problème ultérieurement, au fur et à mesure que la part relative de ces données augmentera.

I.3 VALEUR MOYENNE ET PERCENTILES DES DISTRIBUTIONS

Les validations des produits des satellites seront effectuées essentiellement par comparaison de leurs cycles annuels moyens à ceux observés *in situ* sur un certain nombre de stations sélectionnées. Pour ces comparaisons les données seront regroupées et moyennées par période de 15 jours sur une durée de plusieurs années (souvent 2003-2009 pour la validation des produits de MODIS, suivant la disponibilité des observations *in situ*). Les percentiles 05 et 90 des distributions seront aussi fréquemment évoqués. Le percentile 90 d'une distribution correspond au niveau tel que 90% des observations lui sont inférieures. Il est un indicateur des forts niveaux, excluant toutefois les valeurs les plus extrêmes qui peuvent être douteuses. Il a semblé utile pour ces atlas destinés à dresser l'Etat Initial de la Stratégie du Milieu Marin de calculer le percentile 90 de la chlorophylle (lors de la période productive : de début mars à fin octobre) puisque c'est cet indicateur qui a déjà été choisi par la DCE (Directive Cadre Eau) pour évaluer le risque d'eutrophisation des masses d'eaux côtières. Par extension, il s'est avéré intéressant de proposer aussi des évaluations par année des percentiles 05 (valeurs froides) et 95 (valeurs chaudes) de la température de surface de la mer pour caractériser de façon aussi simple que possible les années « chaudes » ou « froides ».

II- LES DONNEES DES SATELLITES ET LE RESEAU DE VALIDATION

II.1 LA ZONE TRAITÉE

La zone traitée est représentée sur la figure 1. L'archive utilisée pour la production des atlas couvre quotidiennement la région indiquée. La donnée est disponible à l'Ifremer depuis janvier 1986 pour le capteur infrarouge AVHRR, janvier 2003 pour la Couleur de l'Eau observée de MODIS (NASA), et janvier 2007 pour MERIS (Agence Spatiale Européenne). Les cartes de la Température de Surface de la Mer sont déduites des données obtenues dans l'infrarouge thermique par le capteur AVHRR (satellites NOAA) alors que la Chlorophylle et la Turbidité sont déduites des réflectances marines reliées à la Couleur de l'Eau. Bien que la zone traitée déborde largement les limites de la ZEE française la validation des atlas sera réalisée sur des stations côtières du littoral français. La zone traitée, pour sa composante Sud (péninsule Ibérique) correspond à l'engagement Ifremer dans la réalisation des produits de la zone IBI-ROOS (Ireland-Biscay-Iberia Regional Operational Oceanography System) du centre « Couleur de l'Océan » du projet GMES/MyOcean. Les données Ifremer de la Mer du Nord ont par ailleurs donné lieu à des inter-comparaisons avec les données du CEFAS britannique ou du UK-MetOffice dans différents projets européens, comme MarCoast et MarCoast2 (financés par l'Agence Spatiale Européenne) et ECOOP (financé par l'Union Européenne). L'intérêt de traiter une zone plus vaste que la zone requise pour la stricte ZEE française tient à une extension possible de la validation et qualification des produits ainsi qu'aux inter-comparaisons par recoupement avec les produits DCSMM de nos voisins européens.

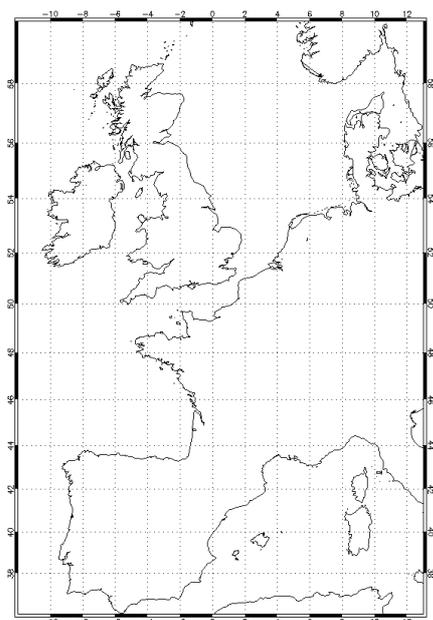


Fig. 1. La zone traitée quotidiennement à l'Ifremer et retenue pour la réalisation des atlas des différents paramètres

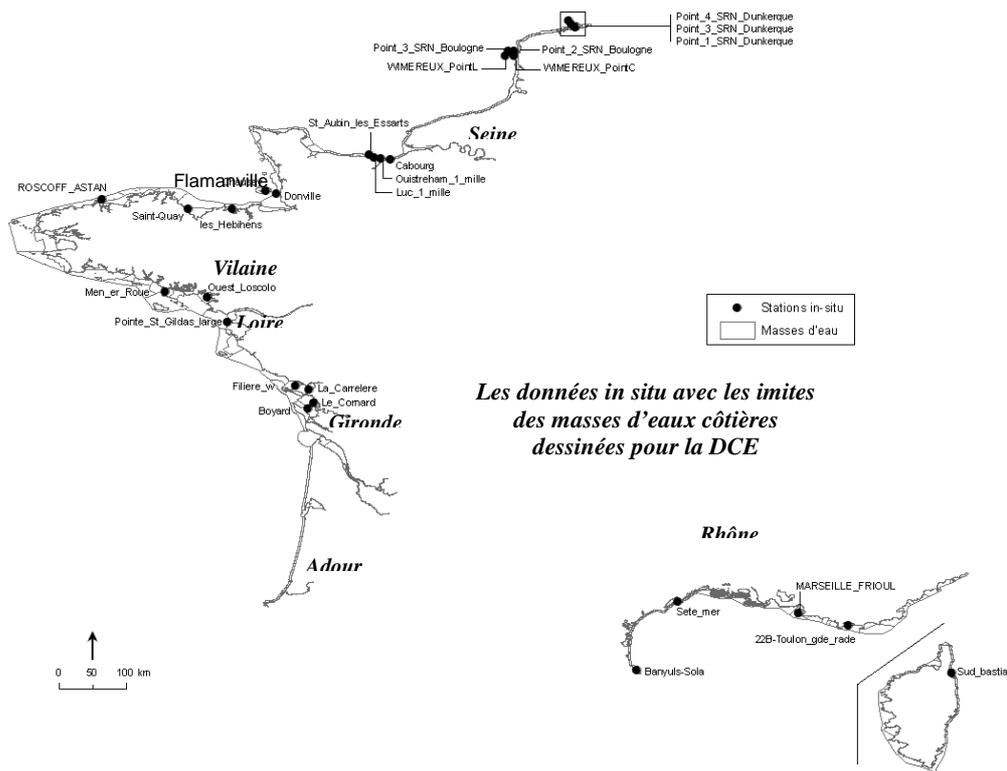


Fig. 2. Le réseau des 28 stations REPHY et SOMLIT et la centrale nucléaire de Flamanville sélectionnées pour les validations

Les stations ont les codes suivants dans notre base de données REPHY et SOMLIT:

'Point_1_SRN_Dunkerque', 'Point_3_SRN_Dunkerque', 'Point_4_SRN_Dunkerque',
 'Point_2_SRN_Boulogne', 'Point_3_SRN_Boulogne', 'WIMEREUX_PointC', 'WIMEREUX_PointL',
 'Cabourg_Shifted', 'Luc_1_mille', 'Ouireham_1_mille', 'St_Aubin_les_Essarts', 'Donville', 'Chausey',
 'les_Hebihens', 'Saint_Quay', 'ROSCOFF_ASTAN', 'Men_er_Roue', 'Ouest_Loscolo',
 'Pointe_St_Gildas_large', 'Filiere_w', 'La_Carrelere', 'Le_Cornard', 'Boyard', 'BANYULS_SOLA',
 'Sete_mer', 'MARSEILLE_FRIOUL', '22B_Toulon_gde_rade', 'Sud_Bastia'.

Les stations SOMLIT ont des codes en majuscule, par exemple: 'WIMEREUX_PointC', 'ROSCOFF_ASTAN'

La figure 2 présente les stations sélectionnées pour les validations. Si certaines stations présentent l'ensemble des mesures, TSM, Chl et turbidité, certaines (SOMLIT, en caractère majuscules dans la liste) ne fournissent pas d'indication de turbidité. La station nucléaire de Flamanville ne fournit que des données de TSM, mais sur une longue période 1986-2009. Ces données, mesurées par EDF, nous ont été transmises par Luc Drévès (Ifremer).

II.2 LES CAPTEURS SPATIAUX DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA MER ET LES DONNEES DE VALIDATION

II.2.1 Les capteurs de la Température de surface

Les données satellite de température de surface sont issues des capteurs AVHRR embarqués sur les plateformes NOAA, de NOAA9 à NOAA18, successivement en vol de 1986 à aujourd'hui. Ces satellites décrivent une orbite polaire autour de la terre avec deux passages par jour au niveau de l'équateur (un de jour et un de nuit).

Le produit Pathfinder V : http://podaac.jpl.nasa.gov/DATA_PRODUCT/SST/index.html est une nouvelle analyse (au sens où les données ont été validées) de la série des AVHRR réalisée par l'université de Miami et la NOAA. Ces données sont à une résolution de 4.5 km.

Pour la réalisation de l'atlas dans sa version 2.0, nous avons utilisé la TSM de nuit, Pathfinder V5.0, pour éviter les effets diurnes de réchauffement de la couche de surface.

II.2.2 Algorithmes de traitement

L'estimation de la TSM (température de surface de la mer) du produit Pathfinder est basée sur un algorithme non linéaire développé par Walton et al. (1998):

$$\text{TSM}_{\text{sat}} = a + b T_4 + c (T_4 - T_5) \text{TSM}_{\text{ini}} + d (T_4 - T_5) (\sec(\theta) - 1) \quad (1)$$

T4 et T5 sont les températures de brillance des canaux 4 and 5 de l'AVHRR. TSM_ini est une première approximation de la TSM, et θ l'angle zénithal du satellite. Les coefficients a, b, c, et d ont été estimés en utilisant des observations co-localisées (matchups) en espace et en temps entre des données *in situ* et satellite. La température de surface ainsi estimée est ensuite transformée en température moyenne, comparable à une température mesurée à un mètre de profondeur. Les champs journaliers de TSM sont ensuite utilisés en entrée d'une procédure d'interpolation optimale (Saulquin & Gohin 2009) pour fournir des champs analysés (sans trou dus aux nuages).

Pour cette étude, la climatologie quotidienne des TSM Ifremer a été mis à jour et la version 2 de cette analyse est disponible à l'adresse : <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/sst-14hr-AVHRR-fnd/V2/>

Dans la suite de ce rapport la dénomination TSM satellite indiquera les images TSM de base (comprenant des manques dus aux nuages) alors que le terme TSM analysée (l'analyse) est choisi pour les images interpolées (par krigeage).

II.2.3 Données de validation de la Température de Surface de la Mer

Les données satellite de TSM et de l'analyse ont été validées par comparaison aux données *in situ* de nos stations sélectionnées du plateau continental français. La figure 3 présente le cycle moyen des températures aux stations observées *in situ*, par la mesure satellite et par l'analyse. La résolution de 4.5Km du produit Pathfinder et de l'analyse, ainsi que les effets d'environnement liés notamment à la proximité des côtes, ne permettent pas toujours de fournir une mesure satellite à l'exacte position de la station *in situ*. Pour cela, la mesure *in situ* est parfois comparée à une mesure satellite décalée dans l'espace (les décalages sont ici affichés dans la figure 3 en nombre de pixels, en x et en y, 1 pixel = 4.5 Km).

Les températures moyennes sont calculées par quinzaine à partir des toutes les données disponibles *in situ*, satellite, et analysées. Un minimum de cinq observations est nécessaire pour fournir une valeur estimée sur une quinzaine. Les années prises en compte sont celles où les observations *in situ* sont continues.

La figure 3 montre que les cycles moyens, calculés à partir de la donnée satellite et l'analyse, sont très proches de ceux observés *in situ*. Lorsque la mesure satellite est décalée de quelques kilomètres, le cycle estimé à partir des données satellite tend à sous estimer les valeurs estivales et surestimer les valeurs hivernales. Ces gradients de températures sont classiquement observés *in situ* entre la côte et le large (Saulquin & Gohin, 2009).

L'analyse, en fournissant des champs complets, permet une estimation pour chaque quinzaine, contrairement aux données *in situ* et aux mesures satellite de base. Nous noterons une surestimation des températures estivales dans le sud de la France et les régions soumises au Mistral (Marseille, Sète). Lors de ces épisodes de Mistral, la température de surface chute brusquement, suite à des mouvements de type upwelling ou un très fort brassage de la couche de surface, et les TSM au large de ces zones sont alors détectées comme étant des erreurs lors du calcul de la température de surface (Kilpatrick 2001), et ne sont donc pas dans le produit AVHRR/Pathfinder V5, et par conséquent dans l'analyse, d'où la surestimation (biais positif) à partir des données satellite.

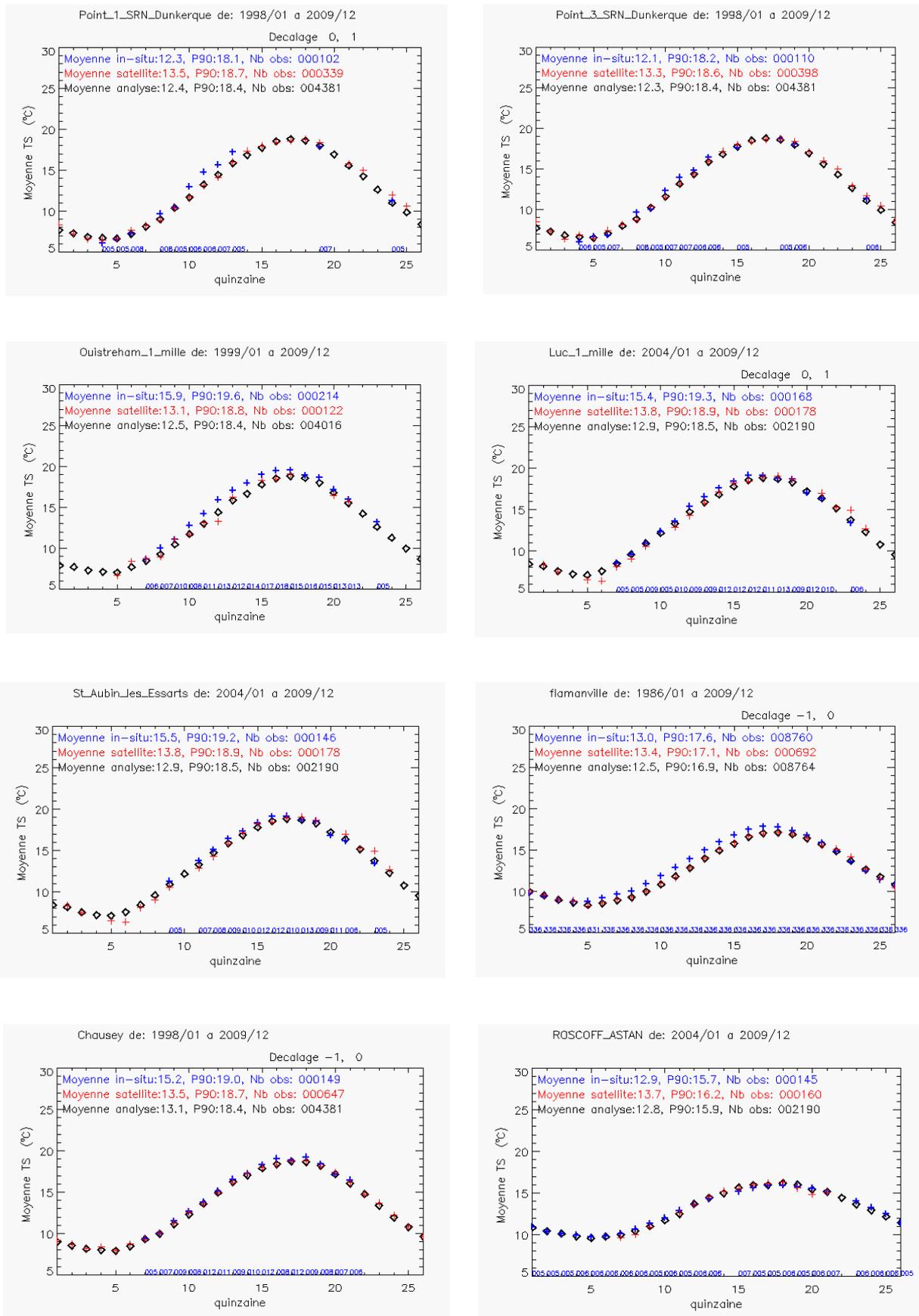


Fig. 3. Les cycles annuels de la TSM (in situ, satellite et analysées) à certaines des stations sélectionnées de la Mer du Nord au nord de la Bretagne. Les chiffres en bleu sur l'axe des abscisses indiquent le nombre de valeurs in situ par quinzaine. P90 correspond au percentile 90 de la TSM. Les valeurs de décalage, en pixels de 4.5 km, sont indiquées lorsqu'il y a lieu.

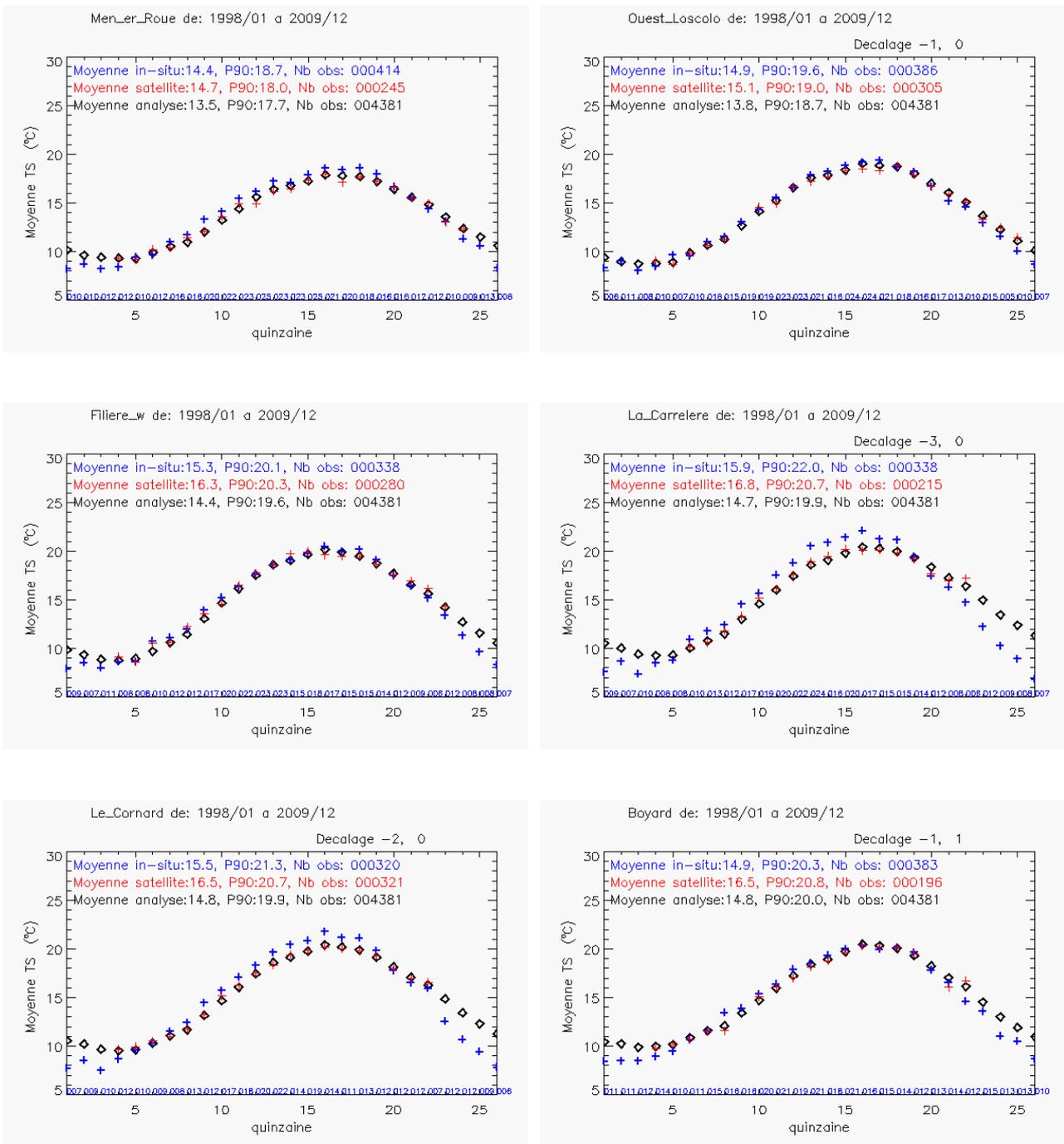


Fig. 4. Les cycles annuels de la TSM (in situ, satellite et analysées) aux stations sélectionnées de la côte atlantique. Des décalages importants, comme aux stations La Carrelère et Le Cornard, peuvent être la source d'écarts conséquents entre les mesures in situ et satellite.

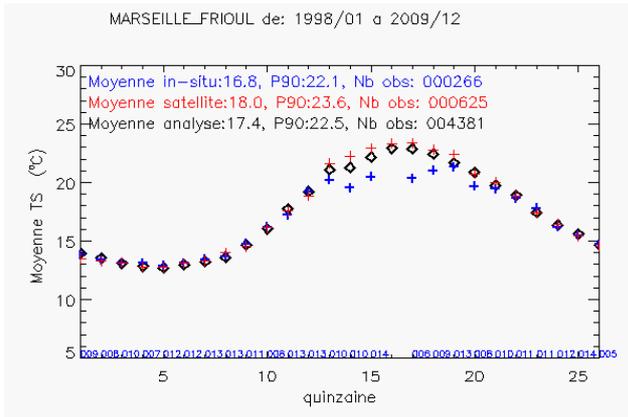
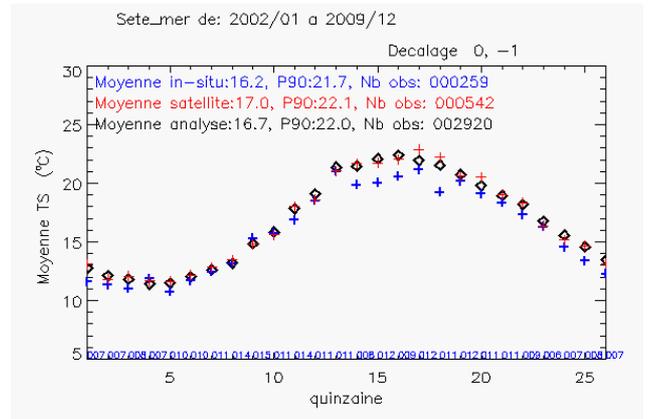
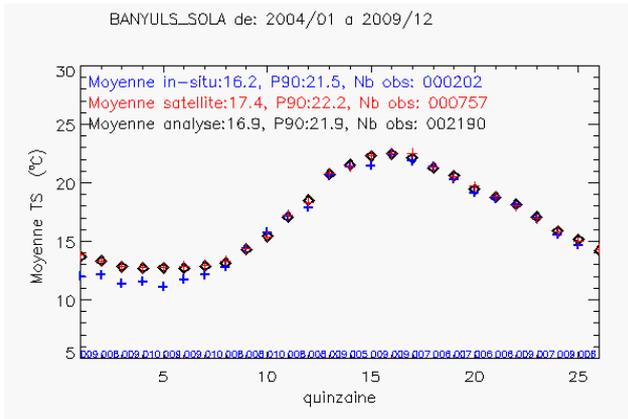


Fig. 5. Les cycles annuels de la TSM (in situ, satellite et analysées) aux stations sélectionnées de la côte méditerranéenne. Les effets du vent sur la TSM estivale in situ sont bien visibles à Sete_mer et MARSEILLE_FRIOUL.

II.3 LES DONNEES DES CAPTEURS SPATIAUX DE LA COULEUR DE L'EAU ET LEUR VALIDATION

II.3.1 Les capteurs de la Couleur de l'Eau

Les deux capteurs utilisés dans cet atlas seront SeaWiFS et MODIS. Les réflectances de télédétection de SeaWiFS couvrent la période 1998-2009. Cette longue période n'est cependant pas accessible à la résolution nominale du capteur SeaWiFS qui est de l'ordre de 1.1km sous la trace de l'orbite. En effet, après le 31 décembre 2004, les données SeaWiFS au format LAC sont devenues payantes et les stations de réception localisées en Europe (comme Dundee, Ecosse, ou Maspalomas, Canaries) n'ont plus eu accès à la clé de décodage de la donnée LAC (Local Area Coverage). Un accord portant sur l'accès aux données SeaWiFS LAC a récemment été conclu avec l'ASE mais les données non acquises de la période 2005-2009 sont définitivement perdues. Les données SeaWiFS utilisables sont donc au format GAC (Global Area Coverage) avec une taille de pixel de l'ordre de 5 km (comme pour la TSM et l'AVHRR). Bien que couvrant une période plus courte, 2003-2009, les données MODIS sont à 1.2 km environ après correction géométrique. Elles permettent une relativement bonne observation des eaux côtières. Nous avons donc donné priorité à ces données pour la constitution de ces atlas. Les cartes moyennes SeaWiFS sont fournies en annexe.

Les réflectances marines (produit niveau L2) ont été téléchargées à partir du serveur WEB du centre OceanColor/GSFC (Goddard Space Flight Centre) dans leur version retraitée, mise à jour en mai 2010.

II.3.2 Algorithmes de traitement

a) *Méthode pour obtenir la chlorophylle à partir des réflectances*

L'estimation de la chlorophylle (Chl) est obtenue à partir d'une méthode empirique (Gohin et al., 2002) basée sur l'application d'une Table de Correspondance aux réflectances de télédétection. La méthode est une variante de l'algorithme OC4/SeaWiFS de la NASA (O'Reilly et al., 1998), ou OC3M-547 pour MODIS, mais donne des résultats bien plus réalistes dans les eaux côtières où la diffusion par les matières en suspension minérales et l'absorption par les substances organiques dissoutes colorées (CDOM) est à l'origine de fortes erreurs dans l'application des algorithmes standards. Le principe d'OC4 est de relier la concentration en chlorophylle au rapport Bleu sur Vert pour tenir compte du fait que le pigment chlorophyllien absorbe dans le bleu (pic d'absorption à 443 nm). La relation est donc inverse entre les réflectances Bleu/Vert et la concentration en chlorophylle. Alors qu'OC4 (Ocean Colour 4 Channels) n'utilise que 4 canaux allant de 442 (Bleu) à 559 nm (Vert) et détermine la Chl à partir du maximum des trois rapports $Rrs(\text{Bleu})/Rrs(\text{Vert})$ calculés à partir de trois canaux dans le bleu, de 442 à 510, notre algorithme tient compte aussi des niveaux de réflectance dans la plus petite longueur d'onde disponible (412nm) et le Vert. La concentration en chlorophylle est donc définie, pixel par pixel, à partir du triplet ($R(412)$, $R(\text{Vert})$, Maximum OC4 ($R(\text{Bleu})/R(\text{Vert})$)). $R(412)$ est sensible à l'absorption par le CDOM et à l'erreur de la correction atmosphérique de la donnée de départ (sommet de l'atmosphère), particulièrement marquée aux courtes longueurs d'onde où le signal marin est faible. $R(\text{Vert})$ est pris en compte pour évaluer l'effet de diffusion par les particules minérales en suspension si nombreuses sur le plateau continental après les tempêtes ou par fort coefficient de marée.

b) *Méthode pour obtenir les Matières Minérales en Suspension à partir des réflectances*

La concentration en Matières en Suspension (MES) est un intermédiaire indispensable dans l'algorithme de calcul de la turbidité. En effet celle ci est considérée comme une résultante des effets combinés de la diffusion par les cellules du phytoplancton (dont la biomasse est reliée à la chlorophylle) et des MES minérales. La procédure est basée sur la méthode décrite dans Gohin et al. (2005). Dans cette méthode nous considérons que l'absorption par les substances jaunes peut être négligée aux longueurs d'onde supérieure à 550 nm et proposons une équation simple exprimant la réflectance à partir de l'absorption et de la rétrodiffusion par l'eau de mer pure, le phytoplancton et les particules non algales (NaP).

Premièrement nous considérons l'Equation (2) pour calculer les coefficients d'absorption et de rétrodiffusion à partir des concentrations en chlorophylle et NaP.:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_w + \mathbf{a}_\phi + \mathbf{a}_{\text{NaP}} = \mathbf{a}_w + \mathbf{a}_\phi * \text{Chl} + \mathbf{a} * \text{NaP} \text{ and}$$

$$\mathbf{b}_b = \mathbf{b}_{bw} + \mathbf{b}_{b\phi} + \mathbf{b}_{b\text{NaP}} = \mathbf{b}_{bw} + \mathbf{b}_{b\phi} * \text{Chl} + \mathbf{b}_b * \text{NaP} \quad (2)$$

Ensuite, dans l'équation (3), nous définissons une relation linéaire entre $R^*(555)$, une variable reliée à la réflectance, et la réflectance de télédétection. Les coefficients α et β sont obtenus par minimisation sur un jeu de données *in situ* de Chl et NaP.

$$R^*(555) = \mathbf{b}_b / (\mathbf{a} + \mathbf{b}_b) = \alpha + \beta \quad (3)$$

En (3), $R^*(555)$ est obtenue à partir de Chl et NaP par l'intermédiaire de \mathbf{a} et \mathbf{b}_b (Equation 2)

Finalement, considérant que la chlorophylle est connue après application de la LUT aux réflectances, nous inversons $R^*(555)$ pour obtenir la dernière inconnue qui est la concentration en NaP.

Initialement définie à 550 nm sur les eaux moyennement turbides du Golfe de Gascogne, la méthode donnait des résultats peu réalistes dans le cœur des panaches (sous-estimation). Un tel résultat pouvait s'expliquer par une erreur accrue dans les corrections atmosphériques sur les eaux très turbides mais aussi par l'effet de saturation. La saturation apparaît lorsque l'absorption et la diffusion par les particules NaP deviennent importantes par rapport à l'absorption par l'eau pure. Le signal de R^* (équations 3 et 2) devient alors difficile à inverser car NaP est un terme dominant à la fois au numérateur et au dénominateur. Pour éviter cet effet il convient de choisir une longueur d'onde plus grande au fur et à mesure que la turbidité du milieu augmente afin d'augmenter la part de l'eau pure (l'absorption de l'eau pure croît fortement avec la longueur d'onde) dans le terme \mathbf{a} d'absorption de l'Equation 3. C'est pour cette raison que le canal à 670 nm est préconisé pour l'estimation en milieu turbide. En pratique on applique un « switch » suivant les niveaux de MES (terme utilisé désormais à la place de NaP) de MES(555) à MES(670) selon les niveaux. Si MES(550) et MES(670) sont tous deux inférieurs à 4. mg/L alors MES(550) est conservé autrement MES(670) est choisi. En pratique, la concentration en MES est obtenue à partir du canal à 550 nm dans les eaux relativement claires et à partir du canal à 670 nm dans les eaux les plus turbides.

c) *Méthode pour obtenir la Turbidité*

Comme mentionné par Nechad et al. (2009) les études portant sur la turbidité à partir de données spatiales sont moins nombreuses que celles sur la MES. Ceci peut paraître relativement paradoxal car la turbidité est une propriété optique (fonction de diffusion de volume à 90°) étroitement reliée au coefficient de rétrodiffusion \mathbf{b}_b et donc à la réflectance de télédétection (Equations 2 et 3). Nous n'avons cependant pas cherché à estimer la turbidité directement à partir de la réflectance, mais pour assurer la cohérence de nos jeux de données nous proposons une formule exprimant la turbidité à partir de la chlorophylle (reliée à la biomasse du phytoplancton) et à la MES (reliée aux particules non algales).

La formule donnant la turbidité à partir de la chlorophylle et des MES minérales, après ajustement sur les données *in situ*, est la suivante :

$$\text{Turbidité} = \alpha(\text{SPM} + 0.234\text{Chl}^{0.57}) \quad (4)$$

Les données *in situ* exprimées en FNU sont converties en NTU par la formule suivante :

$$\text{Turbidité en FNU} = 1.267 \text{ Turbidité en NTU} \quad (5)$$

II.3.3 Validation de la chlorophylle et de la turbidité sur mesures in-situ

a) Validation en chlorophylle

Les données in situ proviennent des réseaux REPHY de l'Ifremer, incluant des réseaux régionaux associés, et SOMLIT de l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers). Vingt huit stations le long du littoral ont été sélectionnées pour les validations. Ces stations ont été choisies pour leur position géographique permettant des comparaisons satellite/*in situ* ainsi que par leur fréquence d'observation sur la période 2003-2009. Les données du SRN (Suivi Régional des Nutriments) et RHLN (Réseau Hydrologique du Littoral Normand) financés par les Agences de l'Eau Artois-Picardie et Seine-Normandie contribuent aussi largement, au sein du REPHY, à la constitution de ce jeu de référence.

Les figures 6 à 8 présentent les graphes annuels de validation, du nord au sud. On constate l'importante variabilité de formes et de niveaux des cycles de la chlorophylle. Les stations du nord (Dunkerque et Boulogne, Figure 6) se caractérisent par un fort pic de printemps suivi d'une décroissance régulière malgré une petite résistance parfois observée en automne. Ces stations sont très sensibles à la lumière qu'elles exploitent très bien (faible profondeur). Dès le mois de janvier la production repart. Le pic printanier est relativement précoce (de mars à début mai). Une fois les éléments nutritifs épuisés la production décroît.

La courbe de Cabourg est très différente (Figure 6). L'allure est cette fois celle d'une courbe en cloche, avec une production soutenue de phytoplancton de mai à septembre. Cette allure est typique de des stations proches de l'embouchure d'un grand fleuve apportant un flux soutenu de nutriments tout l'été. Parmi nos stations sélectionnées, Ouest-Loscolo (Figure 7), en Baie de Vilaine, montre une allure et des niveaux semblables à ceux de Cabourg. La proximité du fleuve est donc un atout à la production l'été (avec parfois même des risques d'eutrophisation) mais entraîne un retard dans le démarrage l'hiver et au début du printemps du fait d'une limitation par la lumière (turbidité).

Les cycles annuels des stations de Chausey ou de Roscoff Astan montrent des niveaux beaucoup plus réguliers au cours de l'année avec une faible pic estival. Cela ne signifie pas que la production primaire y soit très faible mais le milieu, soumis à une forte turbulence due à la marée et aux tempêtes, est beaucoup plus homogène dans toutes ses dimensions spatiales (y compris en profondeur) et temporelle. La production de phytoplancton de cette partie typique du domaine homogène et brassé de la Manche est fortement contrainte par la lumière disponible.

En opposition aux stations de l'Atlantique, de la Manche et de la Mer du Nord, les stations de la côte méditerranéenne montrent des niveaux très bas de chlorophylle de surface.

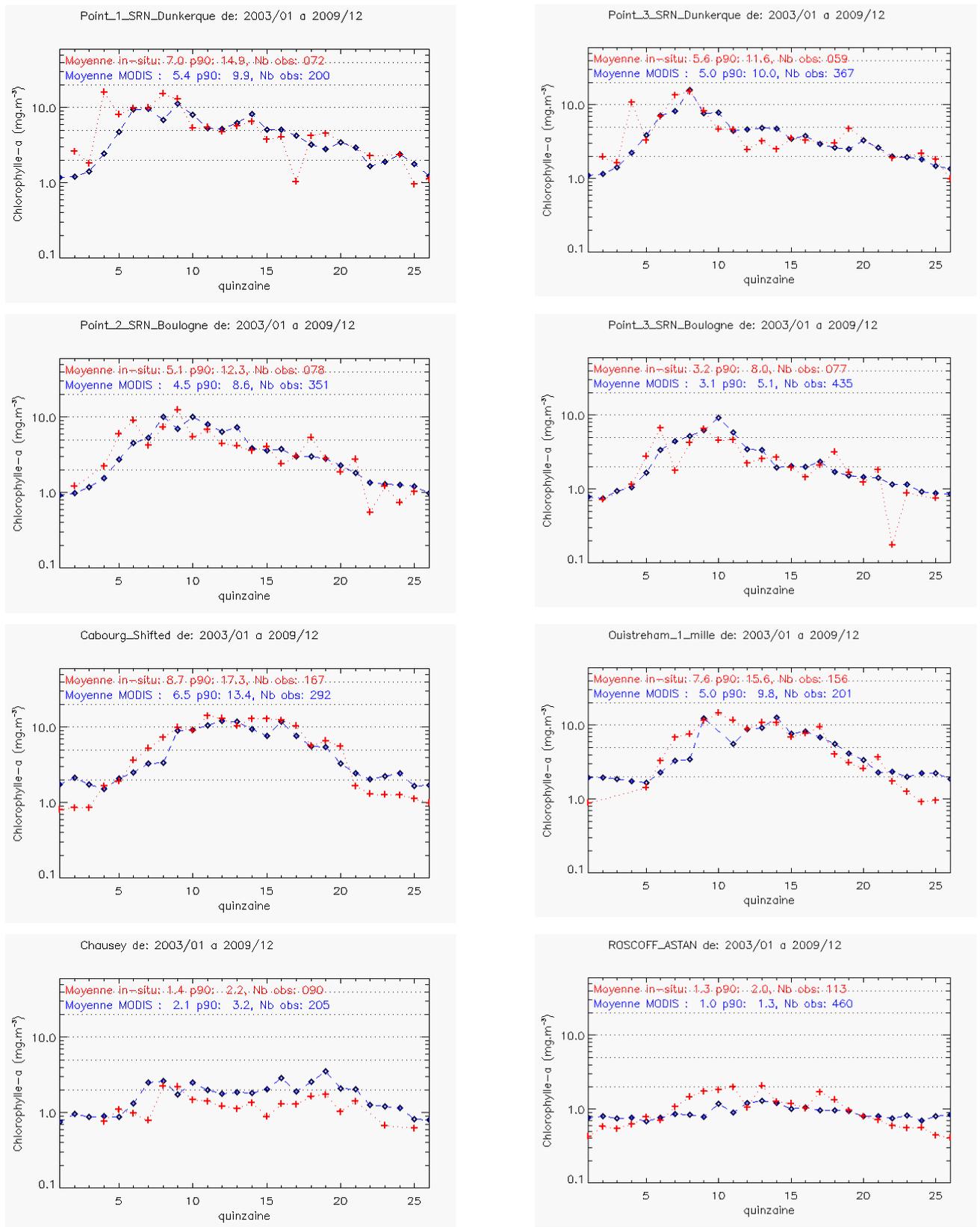


Fig. 6. Les cycles annuels de la chlorophylle à certaines des stations sélectionnées de la Mer du Nord au nord de la Bretagne. Les statistiques indiquées sur les graphes (Moyennes, p90, Nombre d'échantillons) concernent la période productive (de mars à octobre). Le décalage de Cabourg_Shifted est de 3 pixels vers le nord (pixel de 1.2km).

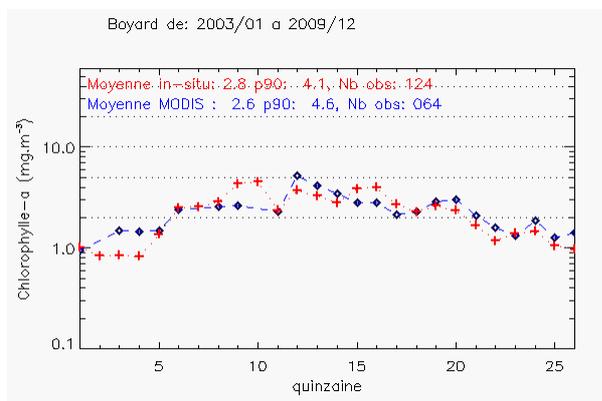
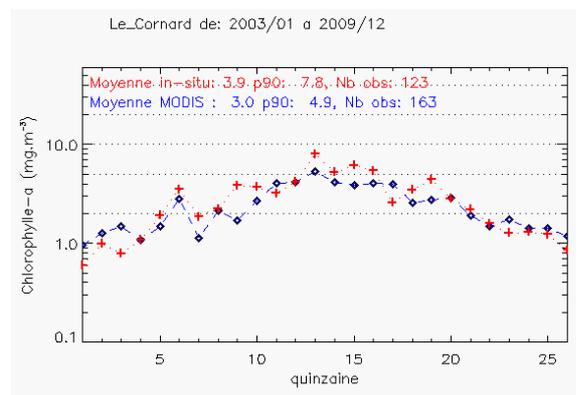
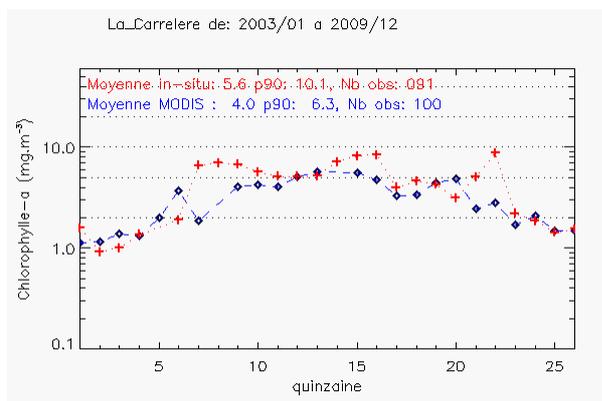
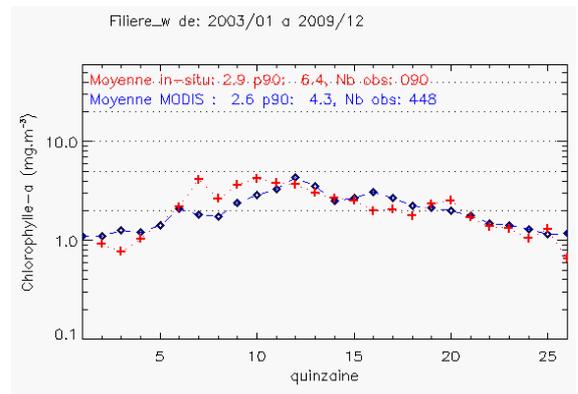
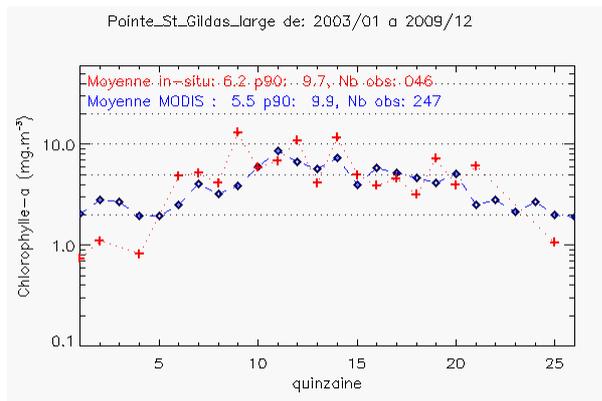
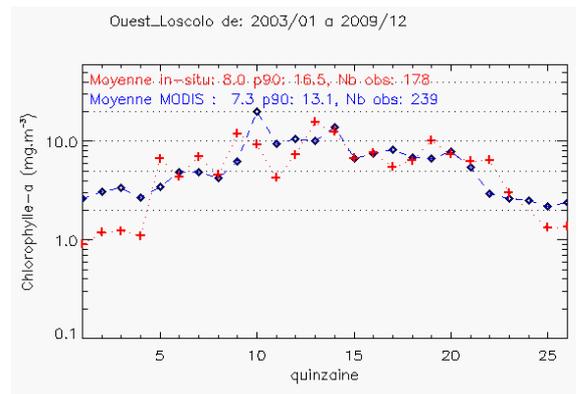
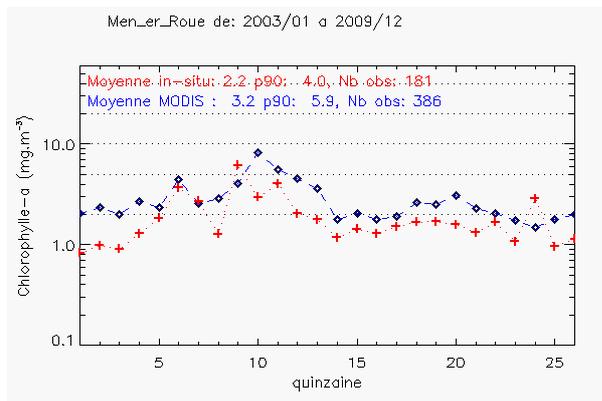


Fig. 7. Les cycles annuels de la chlorophylle aux stations sélectionnées de la côte atlantique

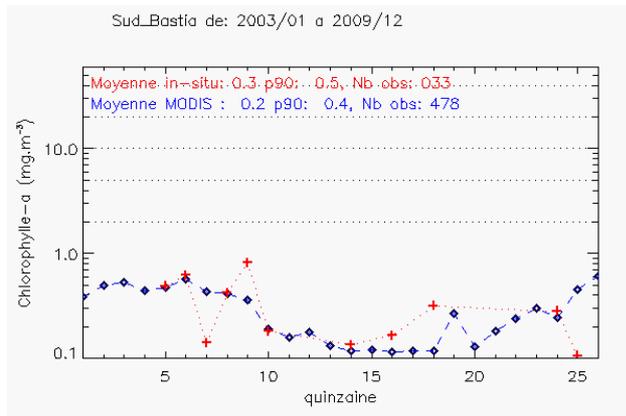
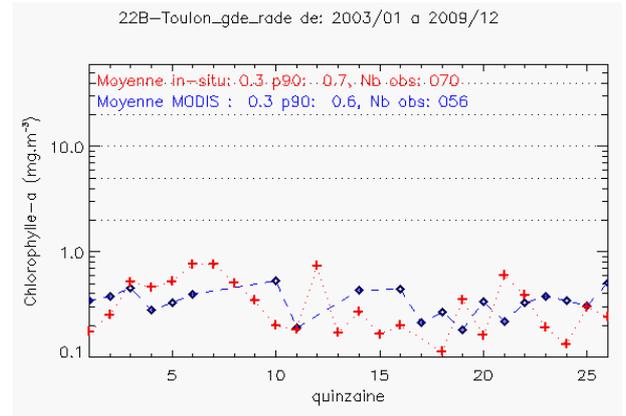
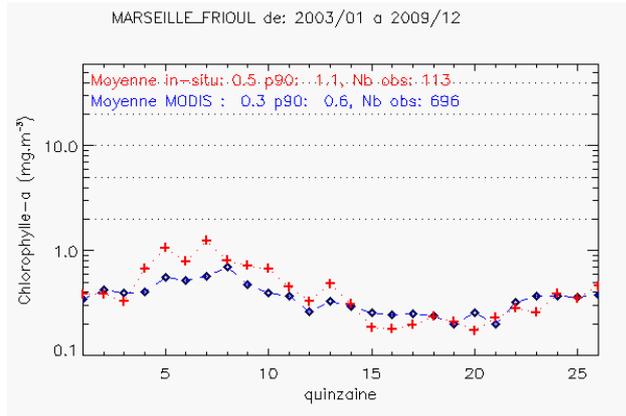
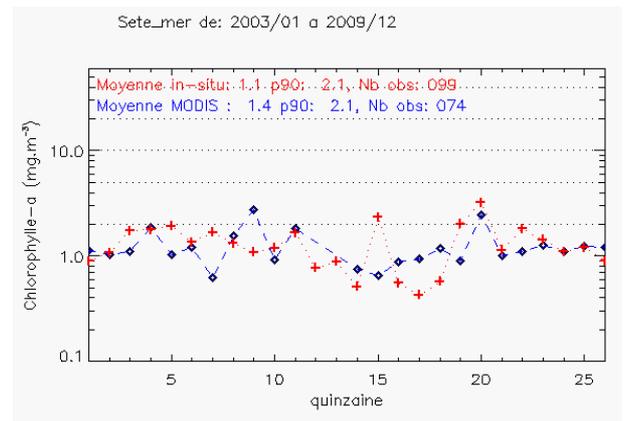
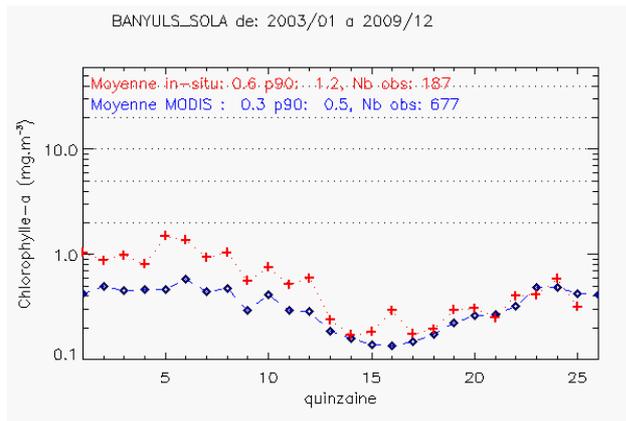


Fig. 8. Les cycles annuels de la chlorophylle aux stations sélectionnées de la côte méditerranéenne

La figure 9 montre les moyennes et percentile 90 des différentes stations observées par satellite ou *in situ*. Le percentile 90 de la période productive est considéré dans la Directive Cadre-Eau en tant qu'indicateur du risque d'eutrophisation. A noter la bonne relation existant entre les moyennes et le percentile 90, avec un facteur de l'ordre de 2.

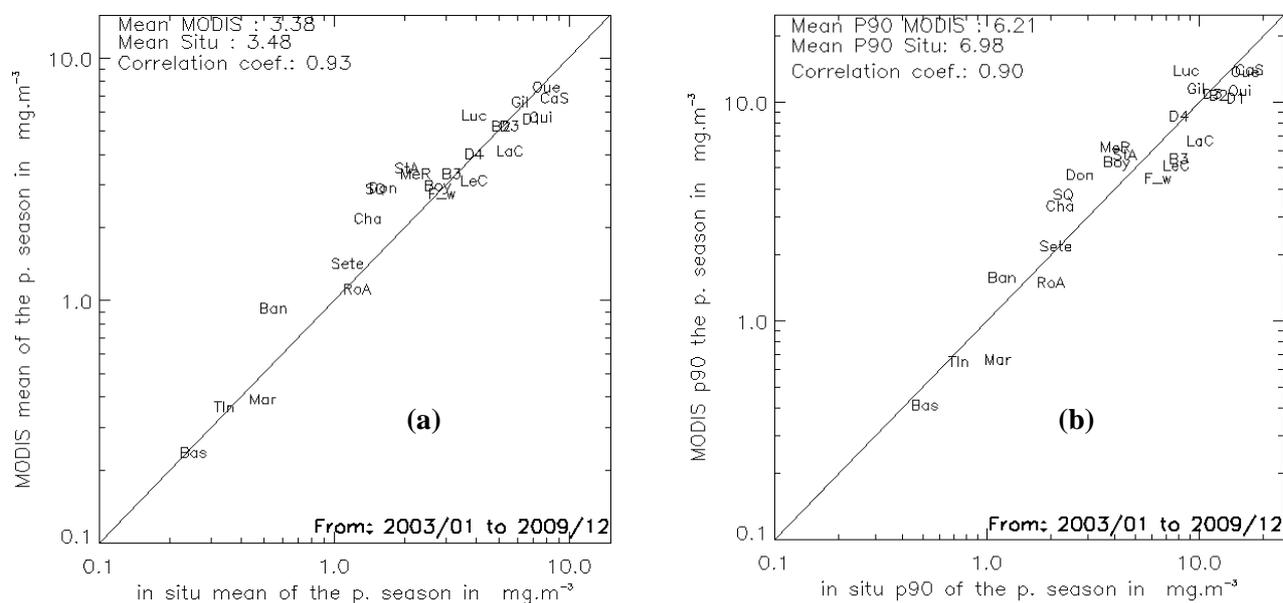


Fig. 9. Moyenne annuelle (a) et P90 (b) de la chlorophylle MODIS et *in situ* durant la période productive.

Les stations sont représentées par trois ou quatre caractères principaux suivant la dénomination donnée Figure 2.

Les niveaux les plus bas en moyenne et percentile 90 sont obtenus pour Bas ('Sud_Bastia'), Tln ('22B_Toulon_gde_rade'), Mar ('MARSEILLE_FRIOUL').

Les plus hauts niveaux (en moyenne et percentile90) sont atteints à Oue ('Ouest_Loscolo'), CaS ('Cabourg_Shifted'), 'Gil' ('Pointe_St_Gildas_large') dans les panaches de la Vilaine, de la Seine et de la Loire.

b) Validation en turbidité

Les figures 10 à 12 montrent les cycles annuels de la turbidité sur un certain nombre de stations sélectionnées. Ces stations proviennent du REPHY car les mesures de turbidité ne sont pas disponibles aux stations SOMLIT. Le gradient de turbidité décroissant de la côte au large est bien visible sur les radiales de Dunkerque et de Boulogne. Le gradient de turbidité correspond aussi au gradient en chlorophylle, les niveaux étant, là encore, plus élevés à la côte.

Les courbes annuelles satellite et *in situ* sont très proches, sauf aux stations méditerranéennes, en particulier aux stations de Toulon et Bastia (figure 12) où la donnée *in situ* est nettement supérieure à l'observation satellite. Ceci peut être attribué à un gradient côte-large important en turbidité, le pixel satellite englobant une vaste surface marine.

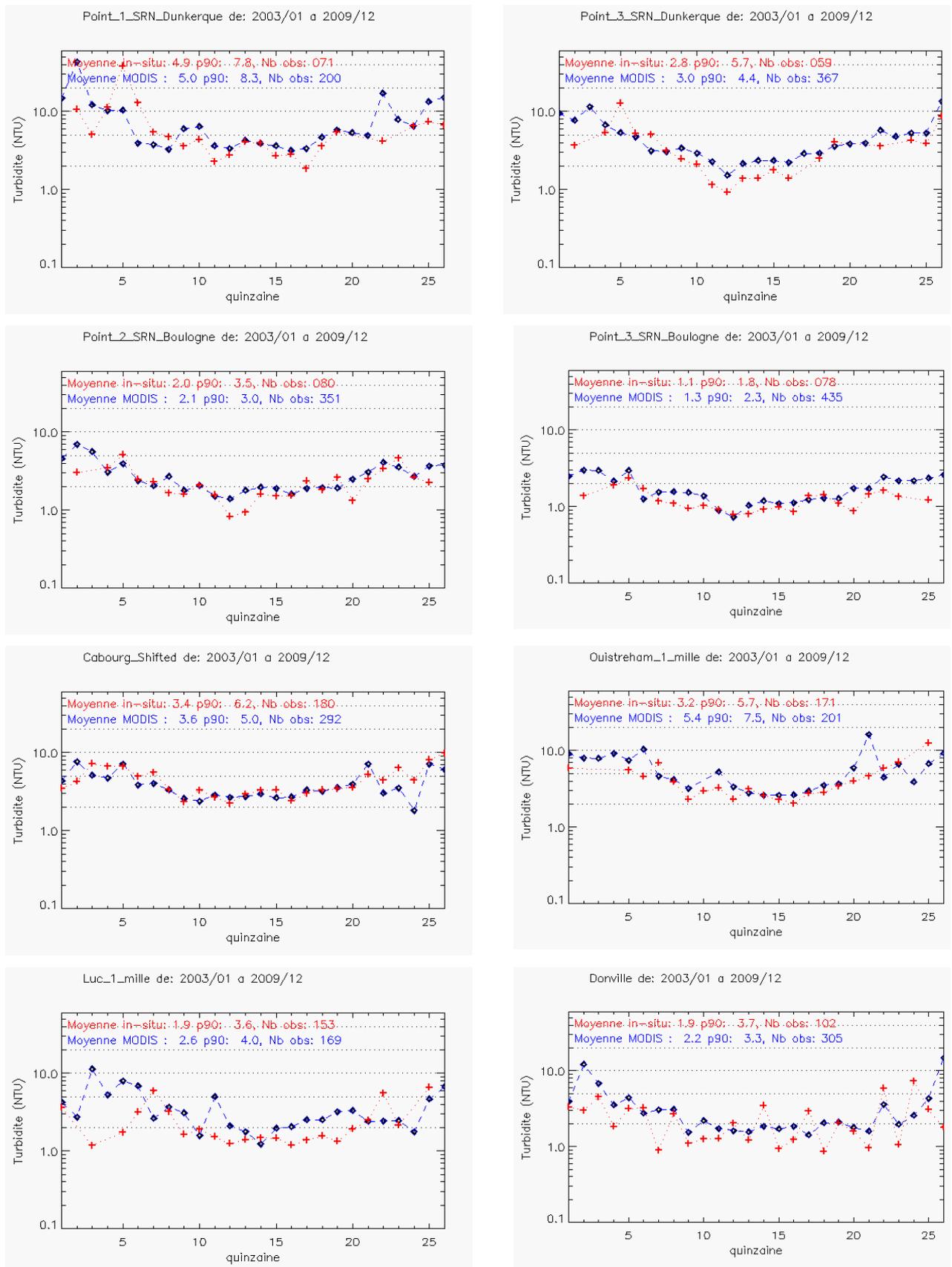


Fig. 10. Les cycles annuels de la turbidité à certaines des stations sélectionnées de la Mer du Nord au nord de la Bretagne.

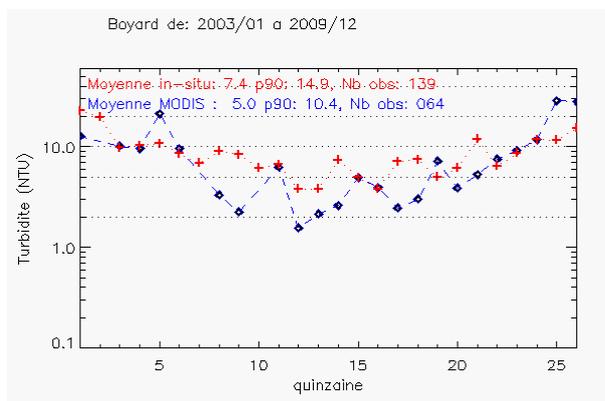
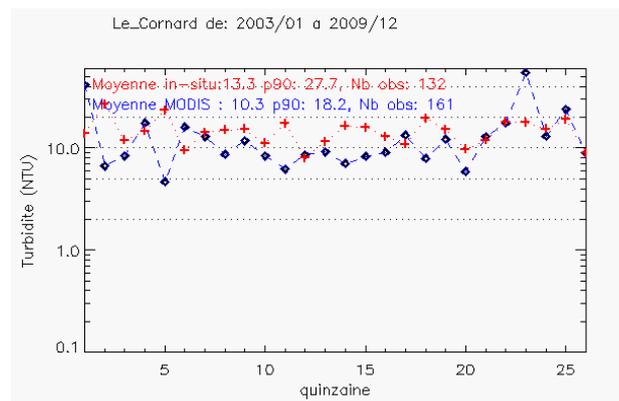
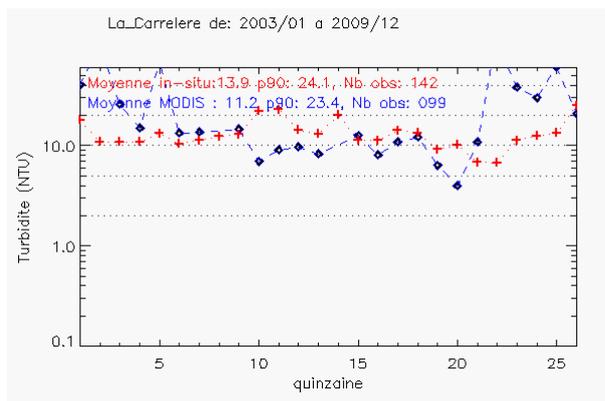
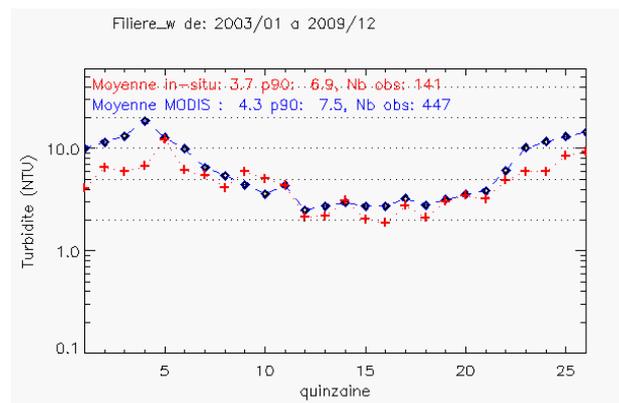
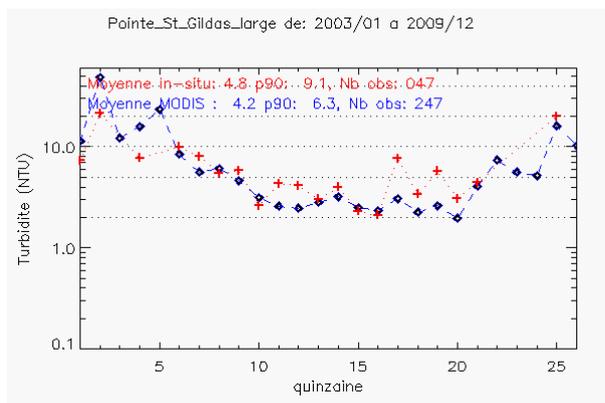
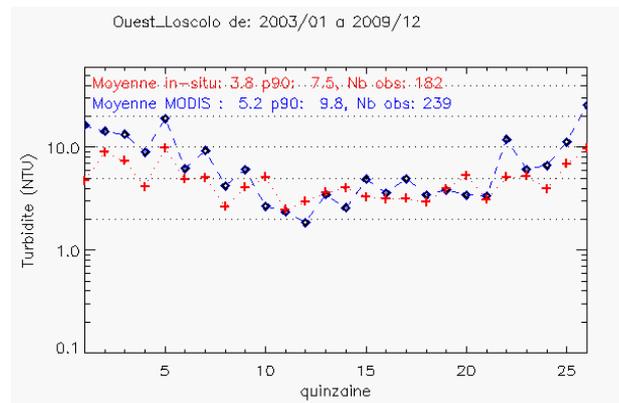
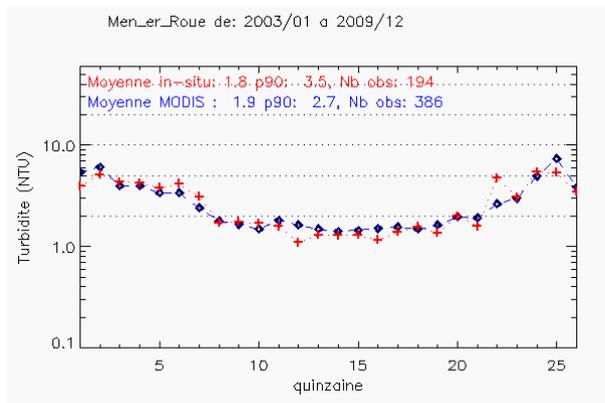


Fig. 11. Les cycles annuels de la turbidité aux stations sélectionnées de la côte atlantique

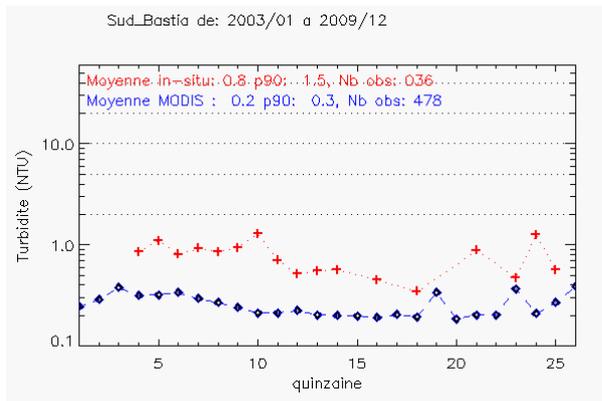
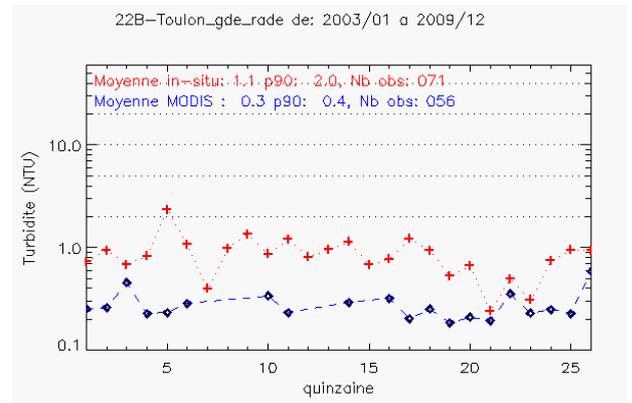
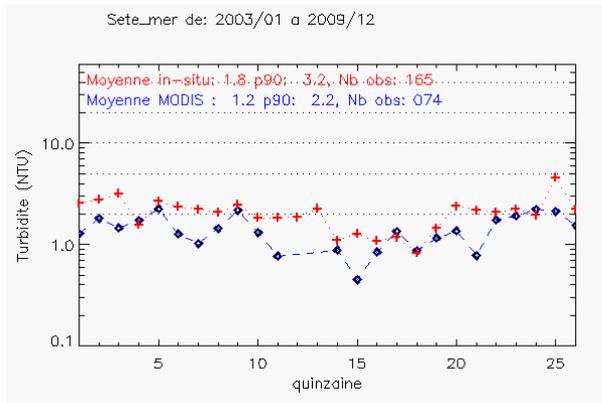


Fig. 12. Les cycles annuels de la turbidité aux stations sélectionnées de la côte méditerranéenne

Les moyennes et percentiles 90 annuels, par analogie avec la chlorophylle, sont représentés sur la figure 13. Les points La Carrelère, point très côtier situé dans le Pertuis breton, et Le Cornard, dans le Bassin de Marennes-Oléron, montrent de loin les plus hauts niveaux de turbidité.

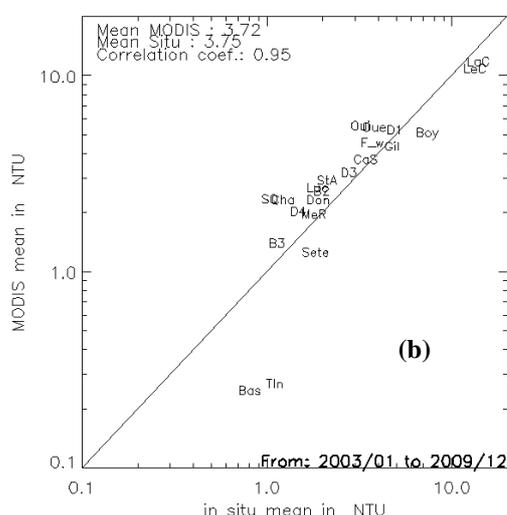
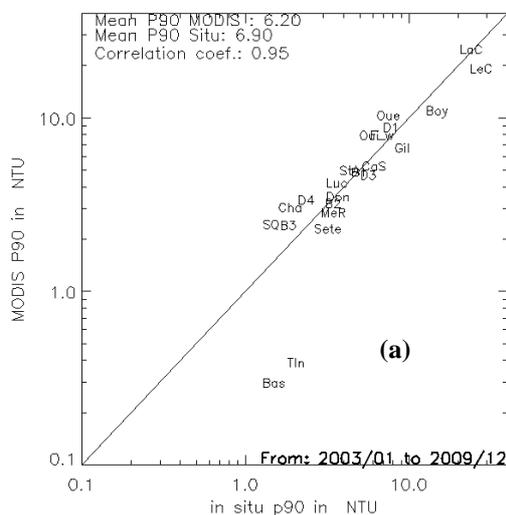


Fig. 13. Moyenne annuelle (a) et P90 (b) de la turbidité MODIS et *in situ* durant la période productive.

La figure 14 présente, à titre d'illustration, une vision spatiale du percentile 90 de la chlorophylle et des moyennes estivales et hivernales de la turbidité autour de la Normandie. Des cartes semblables, établies tout au long du littoral, sont proposées dans le rapport de la convention Ifremer/Onema (Gohin et al., 2010).

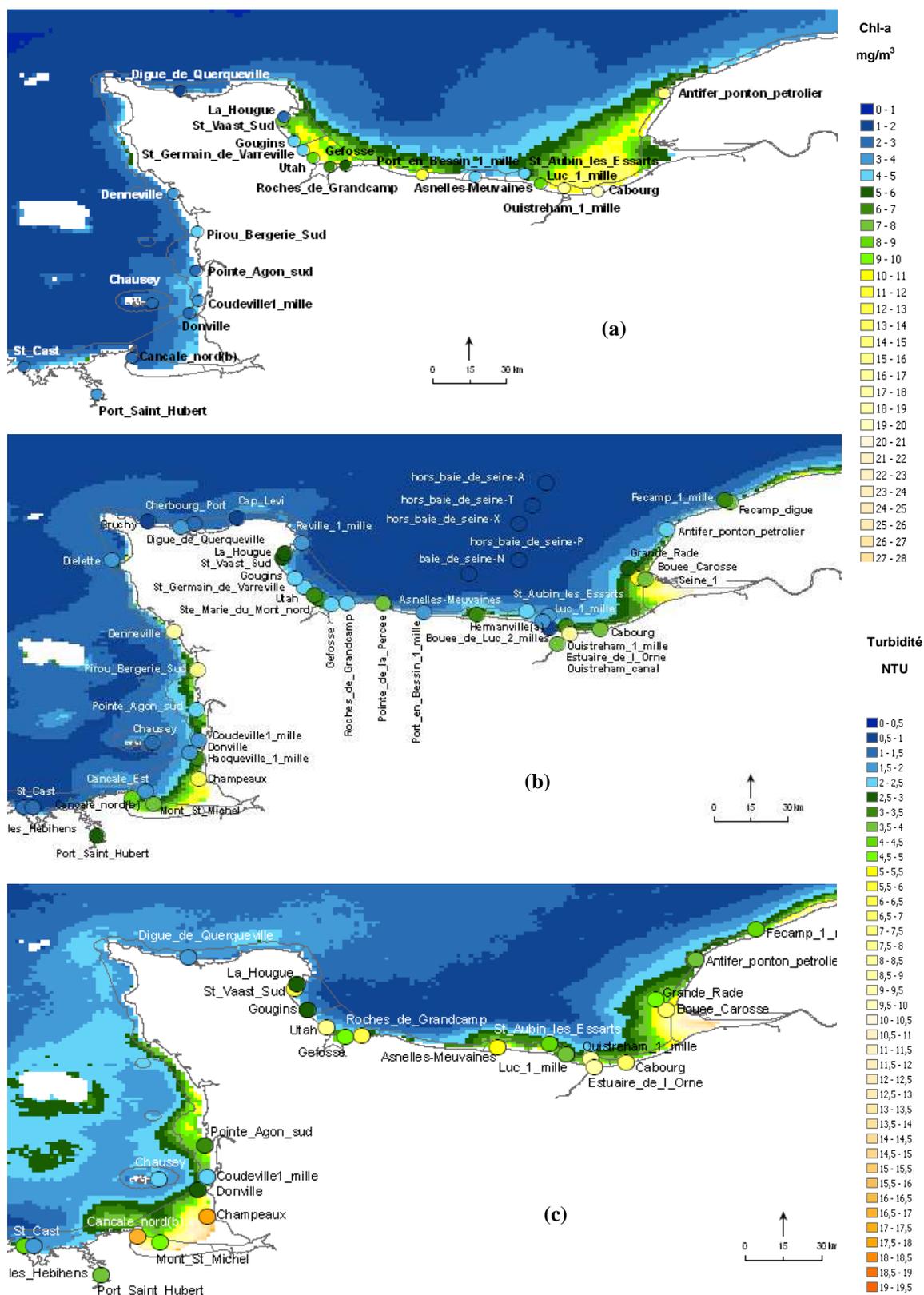


Fig. 14. Percentile 90 de la chlorophylle de surface (a) et moyenne de la turbidité durant la période productive (b) et en hiver (c) autour de la Normandie

Toutes les stations côtières disponibles sont représentées quelque soit le nombre de mesures effectuées.

III- LES ATLAS

III.1 CLIMATOLOGIE MENSUELLE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE LA MER 1986-2009

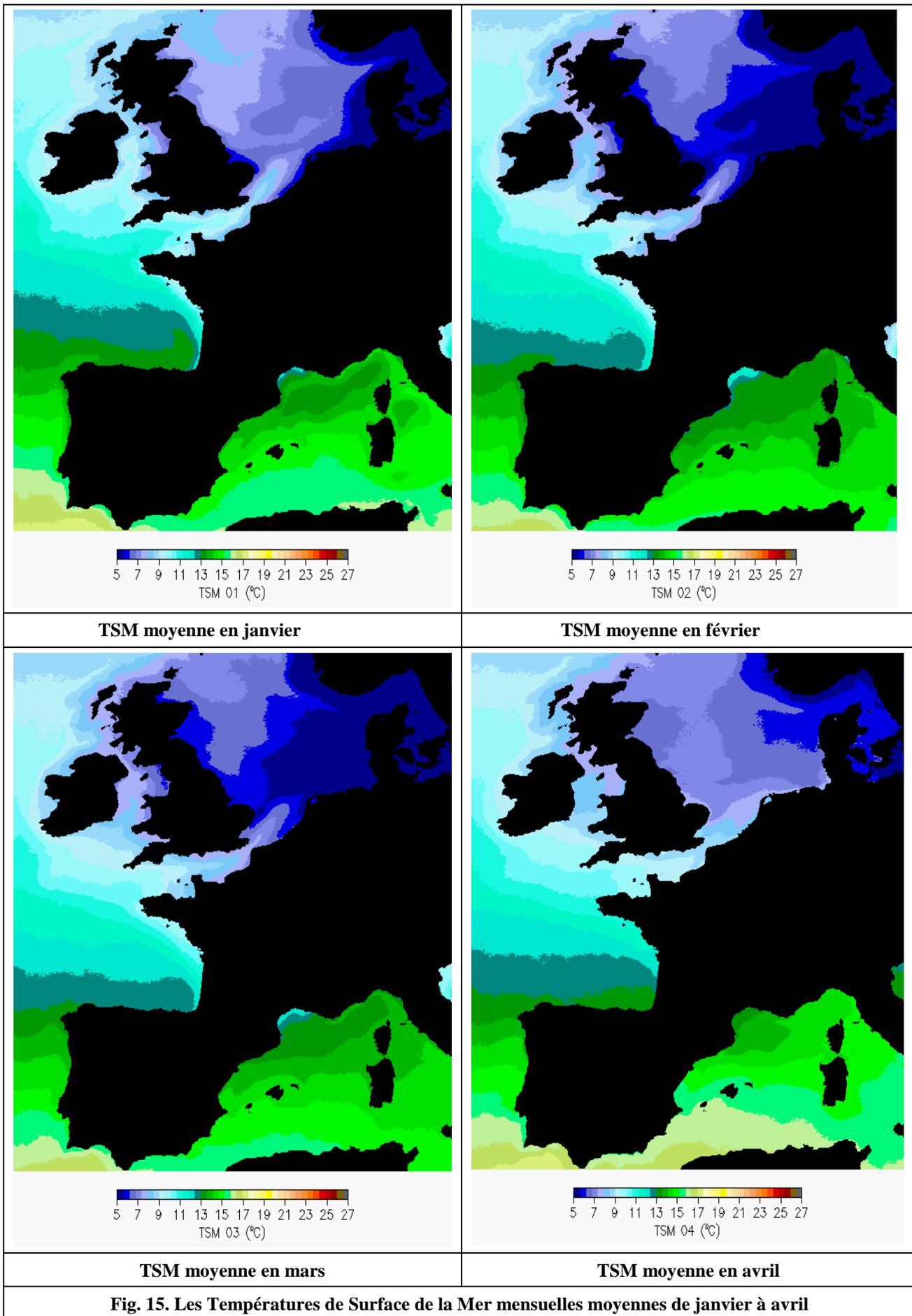


Fig. 15. Les Températures de Surface de la Mer mensuelles moyennes de janvier à avril

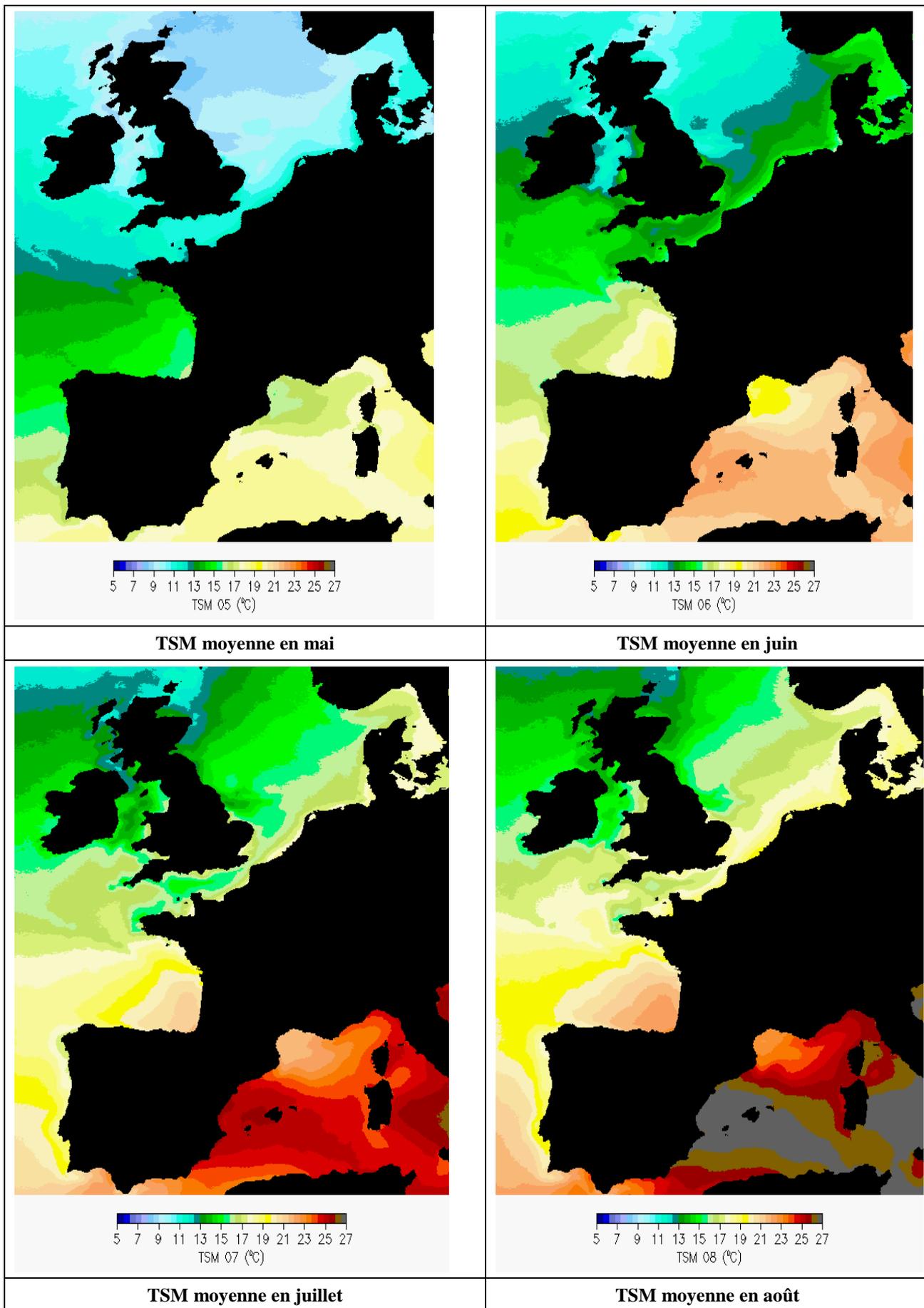


Fig. 16. Les Températures de Surface de la Mer mensuelles moyennes de mai à août

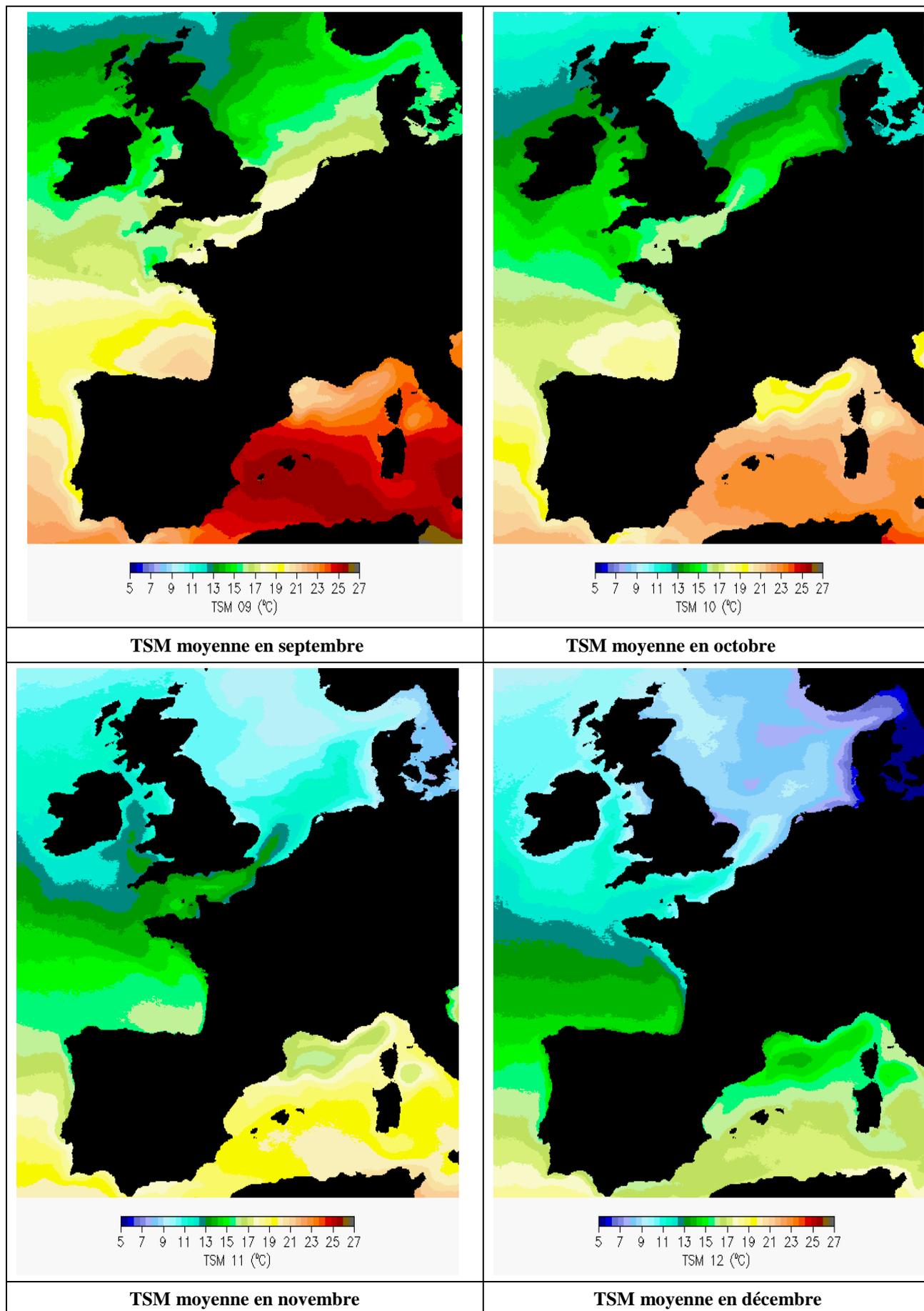


Fig. 17. Les Températures de Surface de la Mer mensuelles moyennes de septembre à décembre

III.2 RECHAUFFEMENT ET VARIABILITE DE LA TSM SUR LA PERIODE 1986-2009

III.2.1 Présentation

Le cycle moyen de la TSM a été estimé en chaque pixel à partir du modèle suivant ajusté sur les données satellite (Saulquin & Gohin, 2009) :

$$TSM(t)=P0 + P1*t + P2*\cos((182.5/2*\pi)*(t-P3))+ P4*\cos((182.5/2*\pi)*(t-P5)) \quad (6)$$

$P0 + P1/2$ représente la température moyenne en début de période (1986). $P1$ est la pente du réchauffement, supposé ici linéaire. $P2$ à $P5$ sont les paramètres des deux harmoniques utilisées pour décrire les amplitudes saisonnières. Ce modèle, malgré sa simplicité, décrit avec précision la TSM sur l'Europe, le pourcentage de variance expliqué étant supérieur à 90 % en moyenne sur la zone (figure 19B).

La figure 18 montre la pente du réchauffement observé en °C par année. Le réchauffement observé est plus important en moyenne en Baltique et Mer du Nord. On note que le réchauffement est également plus faible dans le Golfe de Gascogne et au large du Portugal. Ces zones sont caractérisées par des échanges importants entre la couche de surface et les eaux profondes et par une stratification moins importante de la colonne d'eau. Le réchauffement de la surface de la mer est causé essentiellement par le réchauffement atmosphérique. Cette répartition du réchauffement est équivalente à celle observée par Catiaux et al (2010) et Cannaby et al (2009). Les incertitudes associées aux pentes estimées sont de l'ordre de 6 à 8% de la pente en moyenne (Figure 19-A).

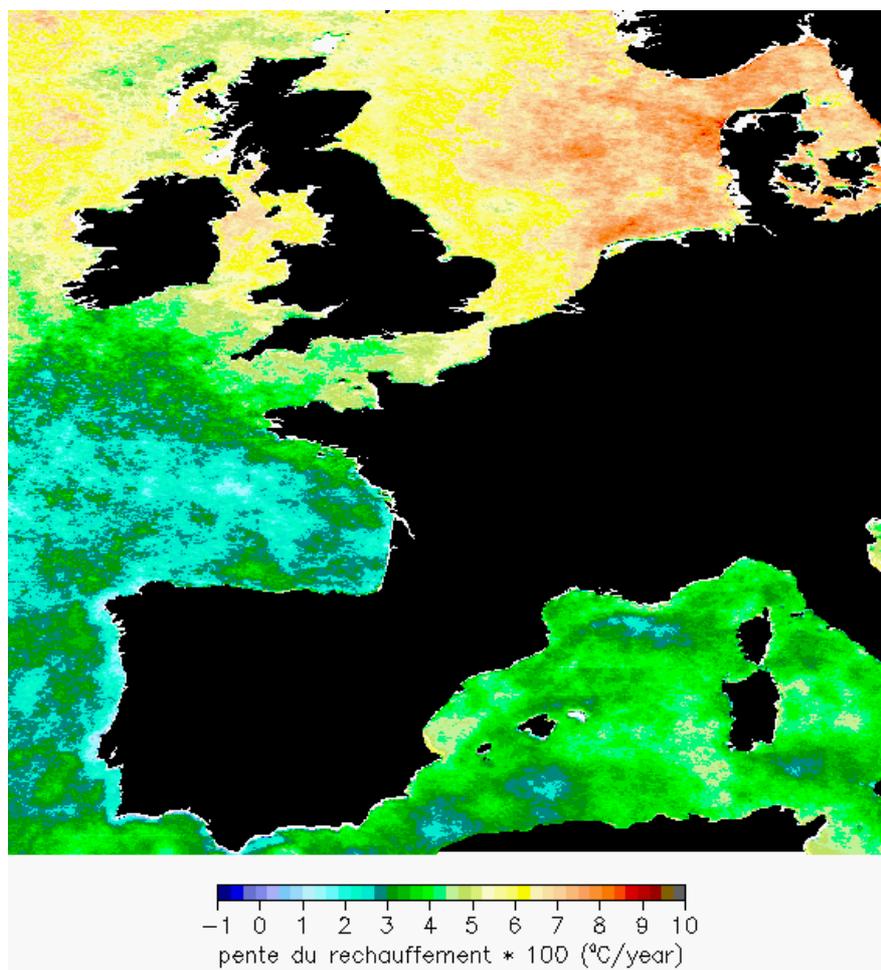


Fig. 18. Le réchauffement moyen observé (par année)

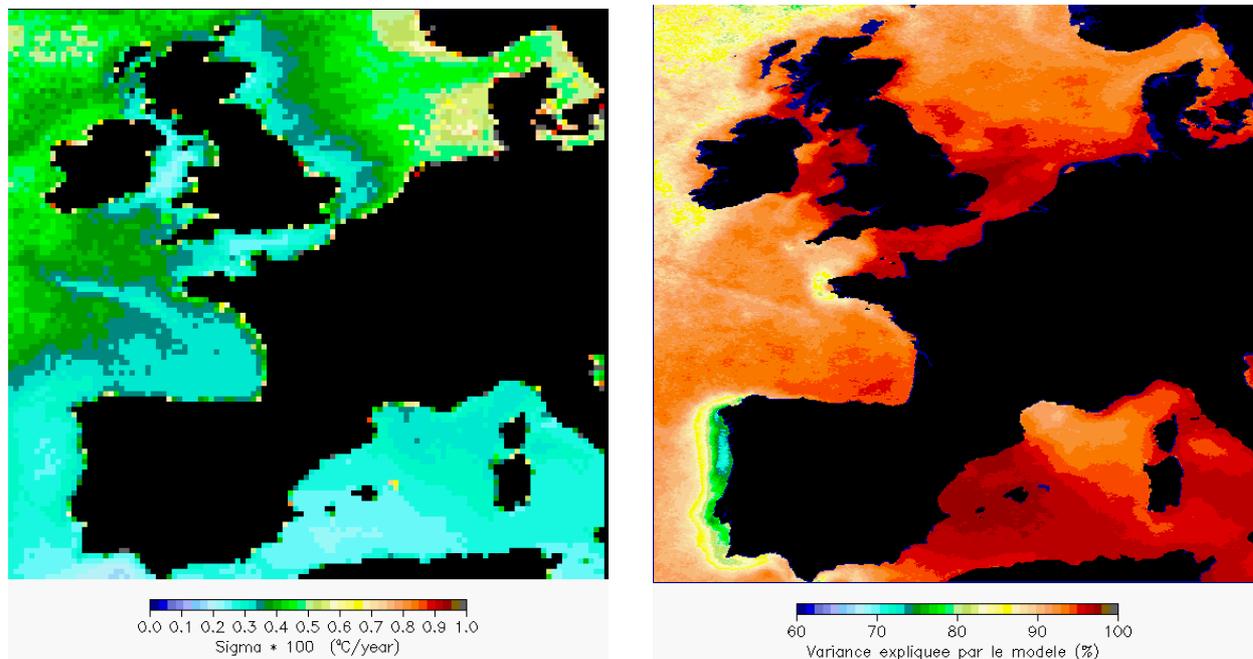


Fig. 19. A Incertitude associée à la pente. **B** - Variance expliquée par le modèle.

On constate à partir de la Figure 19B que le pourcentage de variance de la TSM expliqué par le modèle peut être très élevé sur certaines régions (Manche Est et sud de la Mer du Nord). Cela signifie que le modèle choisi, exprimé par l'équation 6 et basé sur une tendance moyenne linéaire et deux harmoniques périodiques prenant en compte un effet local des variations du cycle solaire, est adapté. En fait, le modèle n'est pris en défaut que dans les régions où la TSM ne colle pas de près au cycle solaire. Ces régions, bien visibles sur la figure 19B, sont celles où la turbulence créée par la marée (Mer d'Iroise, Ouest de la Cornouailles britannique) ou le vent (région des upwellings de l'ouest de la péninsule ibérique) peut briser temporairement la stratification thermique de surface et mélanger les eaux en profondeur, entraînant des modifications de la TSM sans lien avec le cycle solaire.

Il est aussi important de noter que la température $P0 + P1/2$ de notre modèle, correspondant à la température moyenne de 1986 du début de notre série d'observation, est tout à fait semblable à la TSM moyenne du début des années 1900 présentée sur l'atlas du CIEM de la Manche et du sud de la mer du Nord publié en 1933 (CIEM, 1933 ; Saulquin et Gohin, 2009). Cela montre que le réchauffement n'a pas été aussi continu et soutenu sur cette région que lors de la période étudiée qui a débuté à la fin d'une période relativement froide (années 1970).

Le réchauffement moyen saisonnier

Le réchauffement dépend de la saison considérée (Catiaux et al., 2010), et ceci sans doute en raison de la nature atmosphérique du réchauffement et de la saisonnalité de la stratification de la couche de surface. La figure 20 montre les pentes de réchauffement estimées par saison. Il est intéressant de noter que le réchauffement est plus important au printemps et en été. Le réchauffement est non significatif dans le Golfe de Gascogne et en Méditerranée en Hiver.

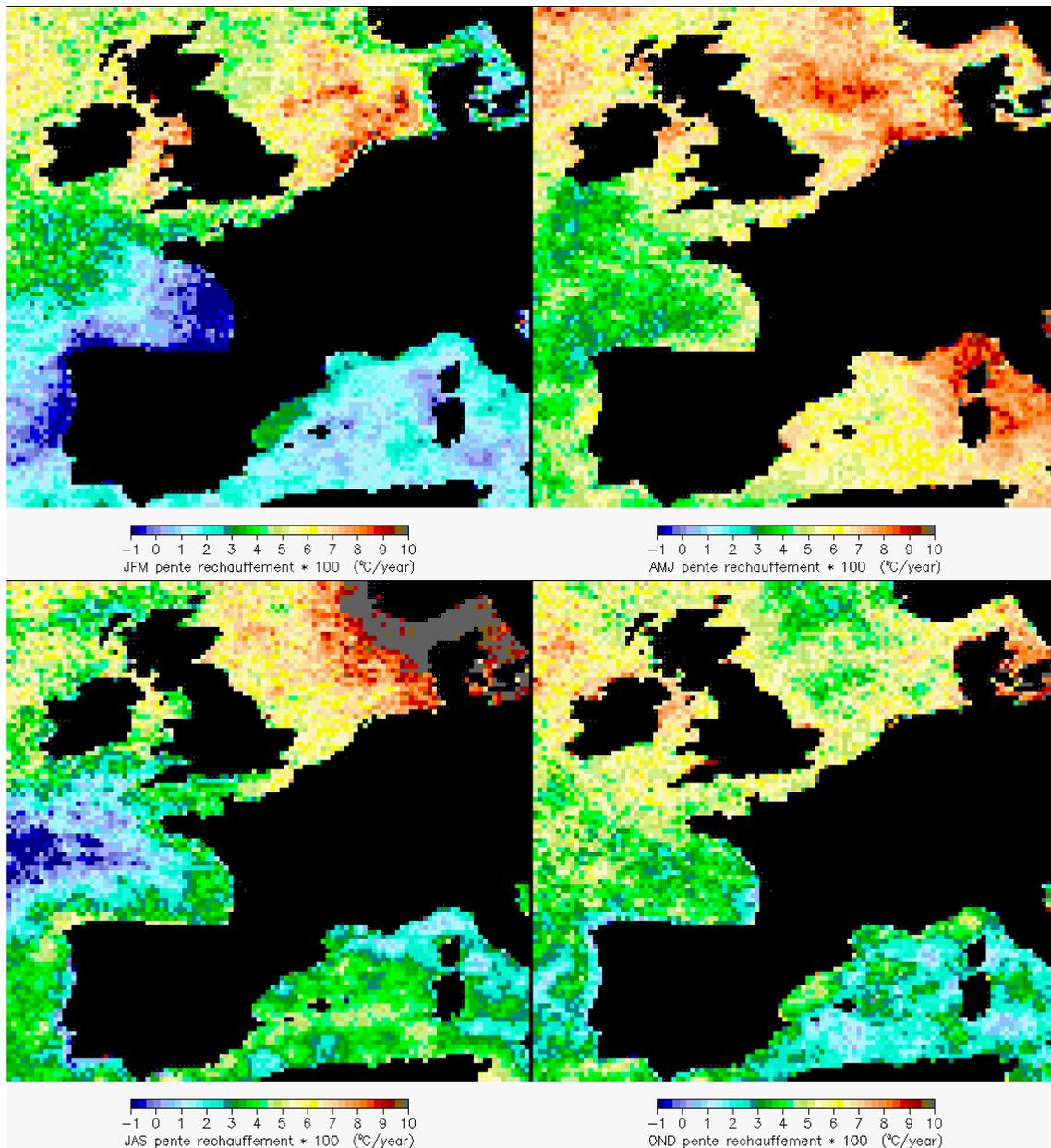


Fig. 20. Pente du réchauffement par saison. JFM (Janvier – Février – Mars), AMJ (Avril- Mai – Juin), JAS (Juillet – Août – Septembre) et OND (Octobre- Novembre – Décembre)

III.2.2 Variabilité spatio-temporelle de la TSM analysée en composantes principales

La variabilité interannuelle de l'anomalie de TSM peut être également décrite par une analyse en composantes principales à travers les fonctions orthogonales empiriques (EOF en anglais). Le cycle saisonnier ayant été supprimé avant l'analyse (moyenne + deux harmoniques, cf (6)), seule la variabilité intra ou interannuelle est décomposée en composantes principales. La Figure 21 montre les 3 premières EOF ainsi que leur composante principale. Les 3 premières EOF expliquent respectivement 56, 13, et 10 % de la variance totale et peuvent être interprétées de la façon suivante:

La première EOF, globalement positive, donne une indication sur l'allure spatiale du réchauffement. Les événements plus chauds (quand PC1 de la figure 21 est positive) ou plus froids que la moyenne (quand PC1 est négative) contribuent en sens positif ou négatif à cette composante. Les années 1986 et 1987 qui ont été plus froides que la moyenne contribuent négativement à cette première composante principale (figure 21). On retrouve entre autre les étés chauds 95, 97 et 2003 en contribution positive. Les étés 93 et 96 semblent avoir été froids, ce qui apparaît clairement sur la courbe des percentiles 95 de la figure 22. L'hiver 2006 a été bien plus chaud que la moyenne.

La seconde EOF, donne des indications sur les contrastes Nord/Sud des variations de la température sur la période 1986-2009. Le printemps 92 et l'été 2002 ont, par exemple, été proportionnellement plus chauds dans le nord que dans le sud. Le printemps 1996 et l'été 2003 ont été plus chauds dans le sud que dans le nord.

La troisième EOF, donne des indications sur les contrastes Est/Ouest des variations de la température sur la période 1986-2009. L'année 94 par exemple a été marquée par un été chaud en Méditerranée et en Mer du Nord comparé à la Mer Celtique et au Golfe de Gascogne. Il est plus difficile de trouver des gradients Est-Ouest significatifs par rapport au cycle normal sur la période 1986-2009.

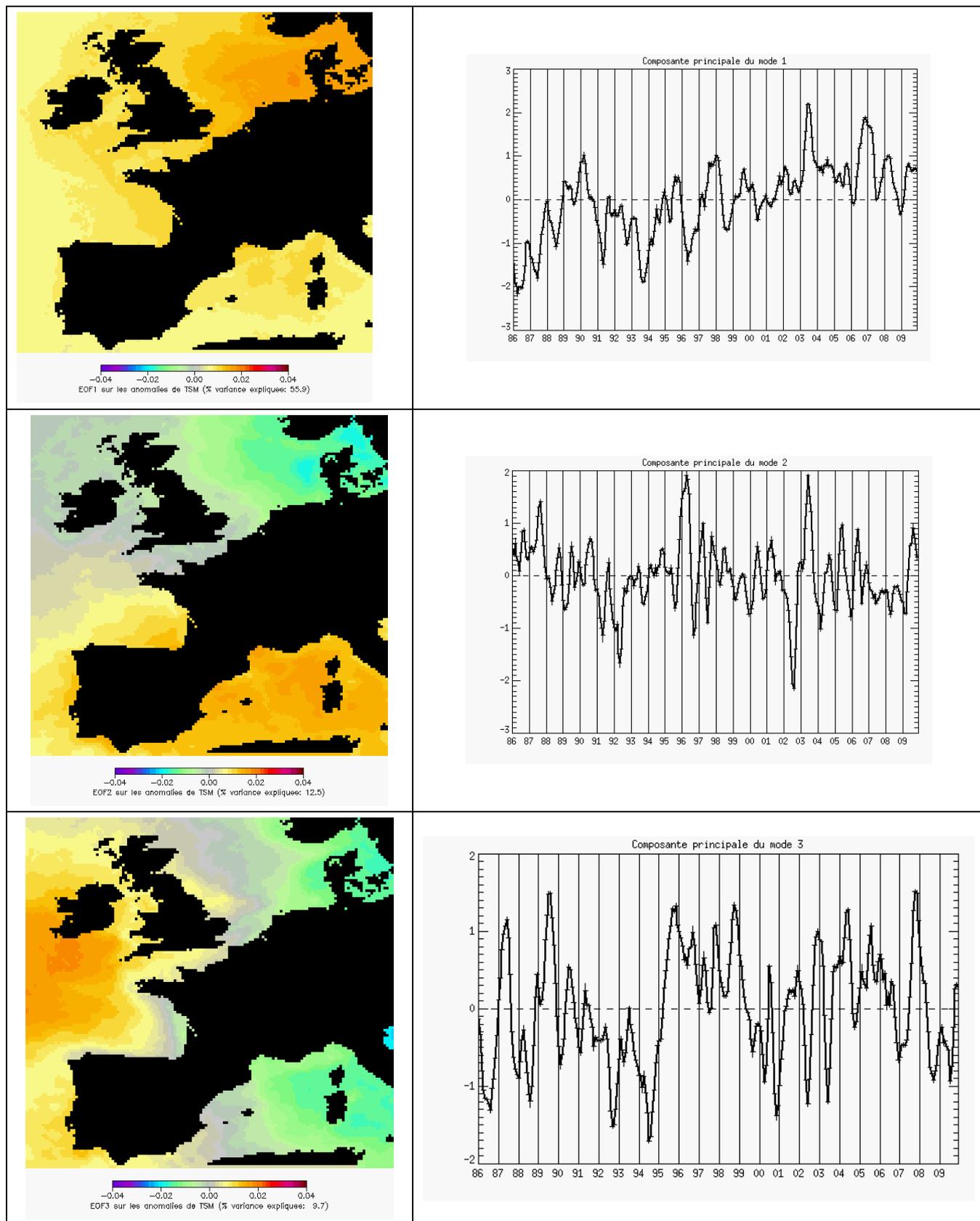


Fig. 21. Analyse par EOF de la série des anomalies mensuelles de SST de 1986 à 2009

III.2.3 Variation interannuelle de la TSM à travers des indicateurs statistiques simples : valeurs moyenne, percentile 05 et percentiles 95

Les valeurs moyennes, les percentiles 05 et percentiles 95 de TSM ont été estimés par année et à partir de l'analyse pour les sous régions de la Stratégie du Milieu Marin recoupant la ZEE française : Bassin Ouest Méditerranéen, Golfe de Gascogne, Mers Celtique, Manche et Mer du Nord (Figure 22). L'été 2003 apparaît sur les courbes de percentile 95 comme étant un été chaud pour l'ensemble des 5 zones, 1995 étant un été anormalement chaud pour la partie nord de la zone.

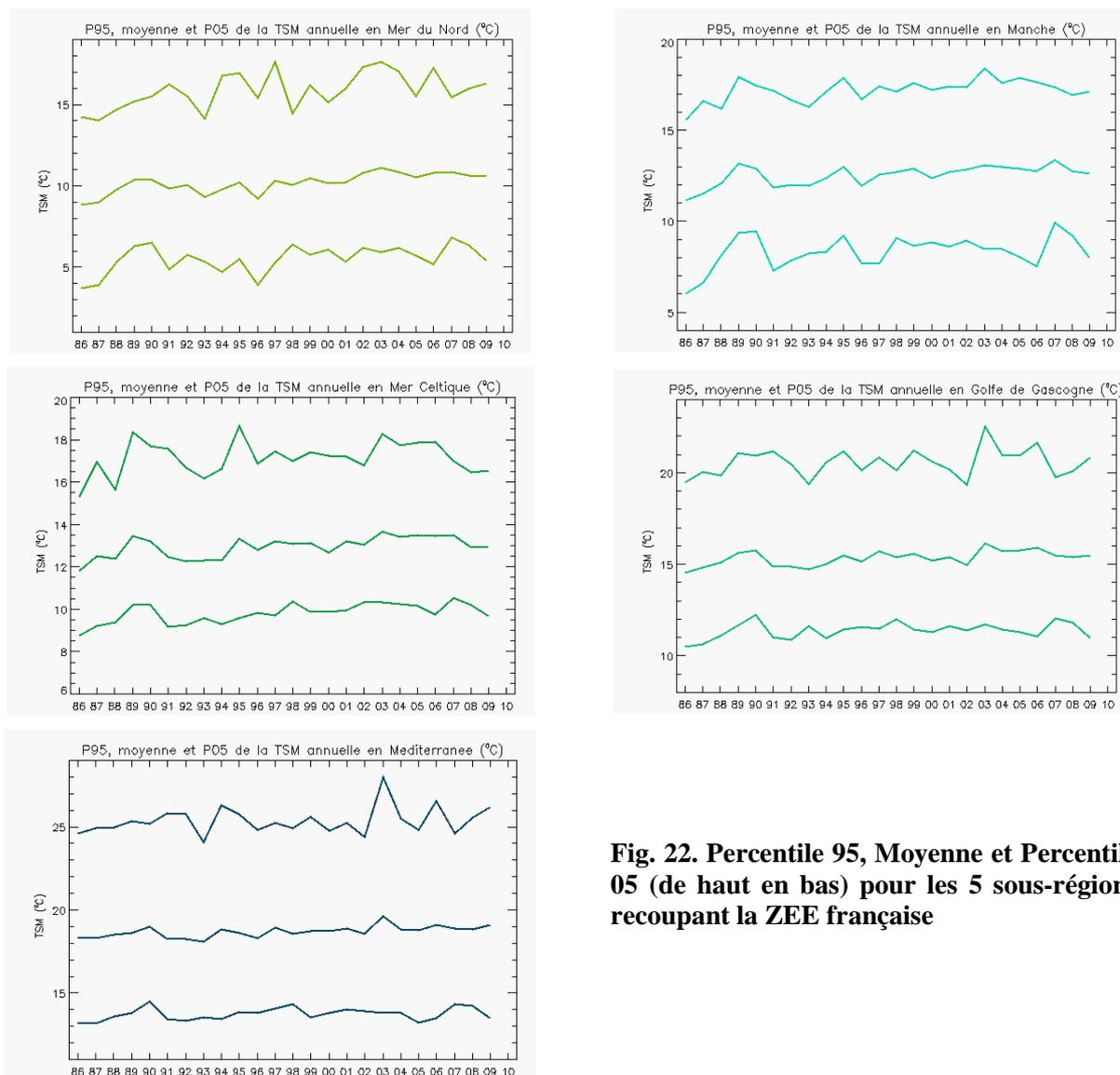


Fig. 22. Percentile 95, Moyenne et Percentile 05 (de haut en bas) pour les 5 sous-régions recoupant la ZEE française

III.3 CLIMATOLOGIE MENSUELLE DE LA CHLOROPHYLLE-A DE SURFACE 2003-2009

Les cartes moyennes mensuelles de chlorophylle et turbidité ont été obtenues à partir des moyennes mensuelles calculées entre 2003 et 2009. Les données de réflectance de MODIS n'ont été prises en compte pour le calcul des atlas que pour des angles solaires zénithaux inférieurs à 78°, écartant de ce fait des données douteuses dans le nord de la mer du Nord en décembre et janvier lorsque l'éclairement solaire est trop faible.

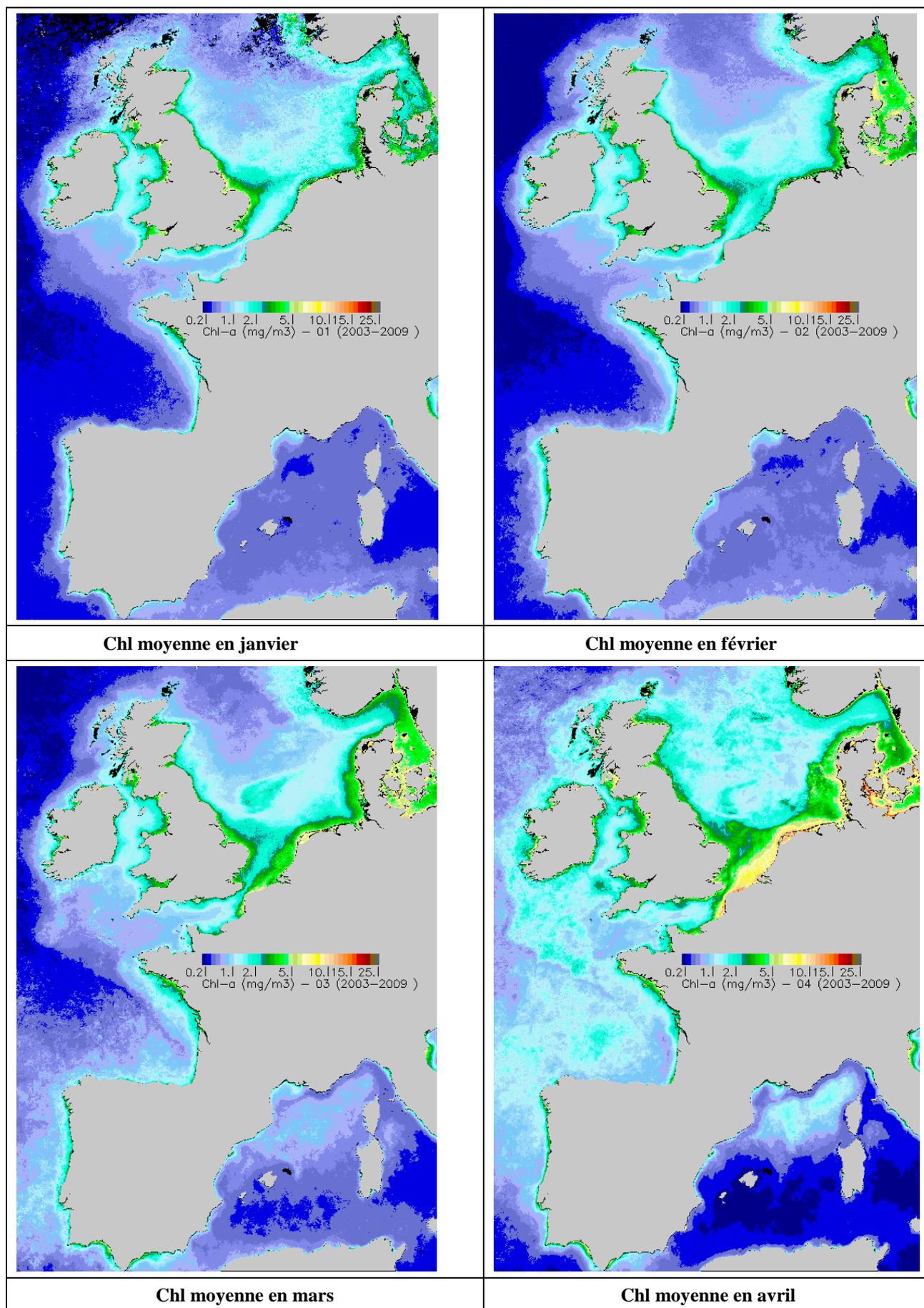


Fig. 23. Les concentrations mensuelles moyennes de Chl-a de janvier à avril

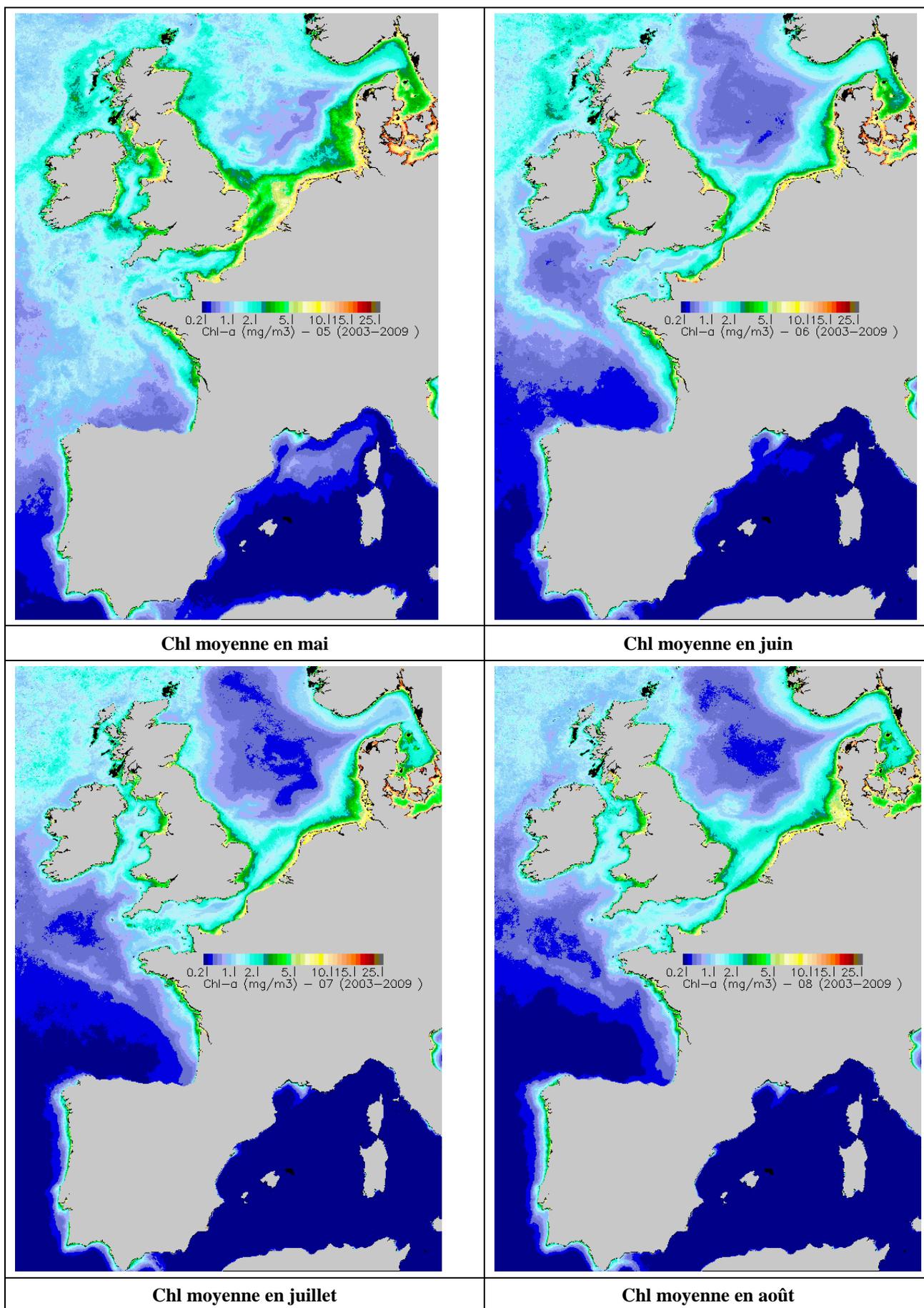


Fig. 24. Les concentrations mensuelles moyennes de Chl-a de mai à août

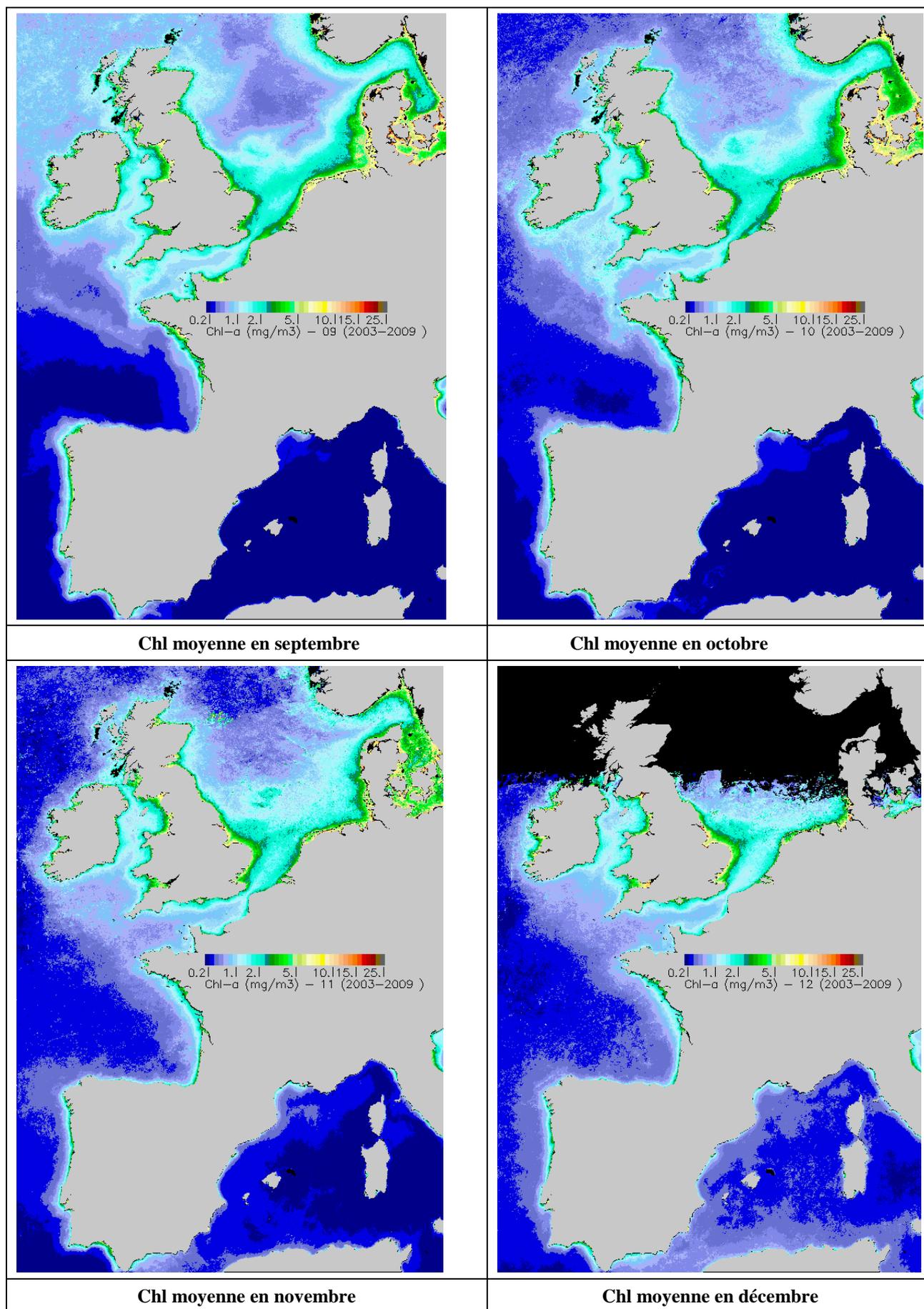


Fig. 25. Les concentrations mensuelles moyennes de chl-a de septembre à décembre

III.4 PERCENTILE 90 DE LA CHLOROPHYLLE-A LORS DE LA PERIODE PRODUCTIVE

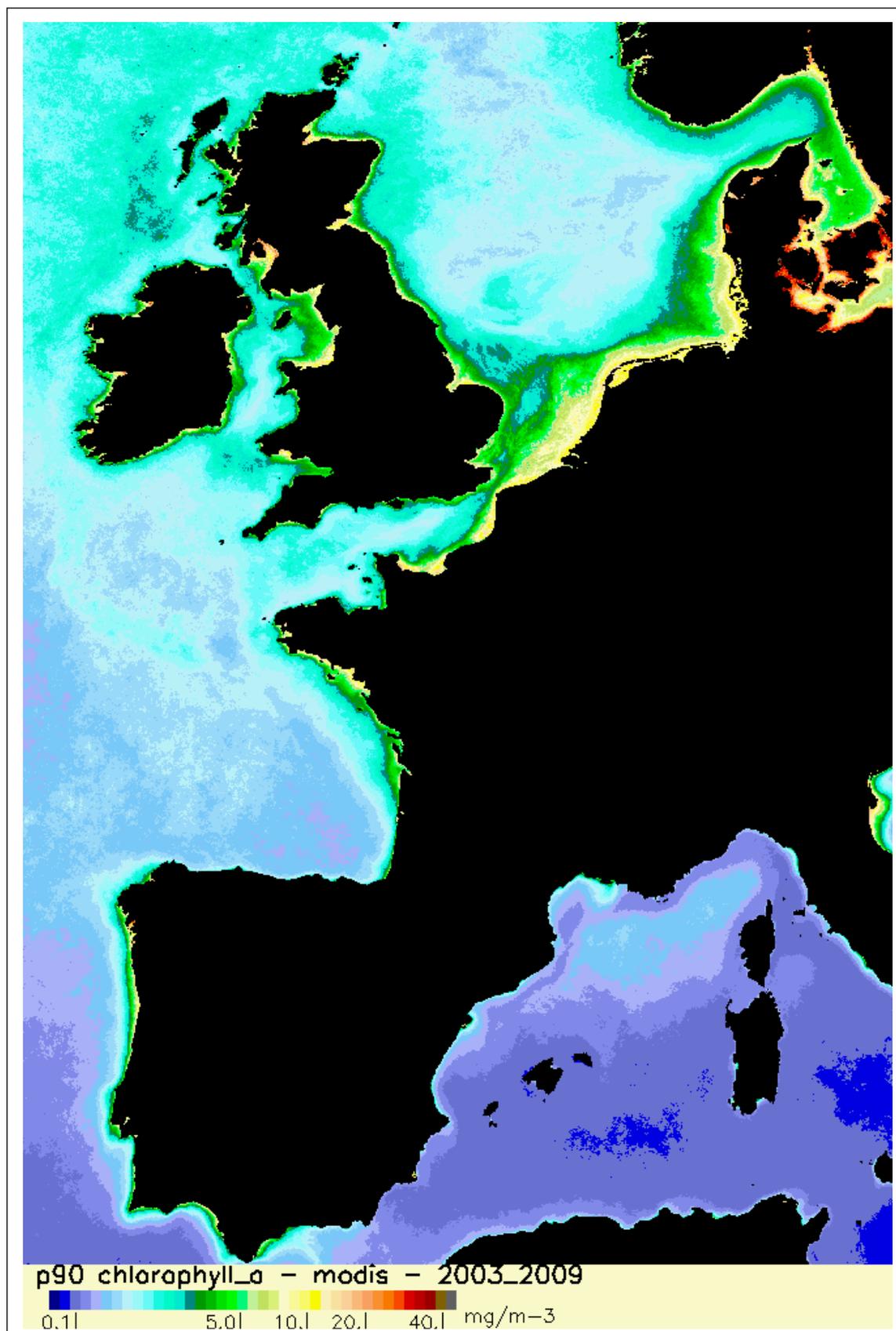


Fig. 26. Le percentile 90 de la Chlorophylle-a durant la période productive de 2003 à 2009

III.5 CLIMATOLOGIE MENSUELLE DE LA TURBIDITE DE SURFACE 2003-2009

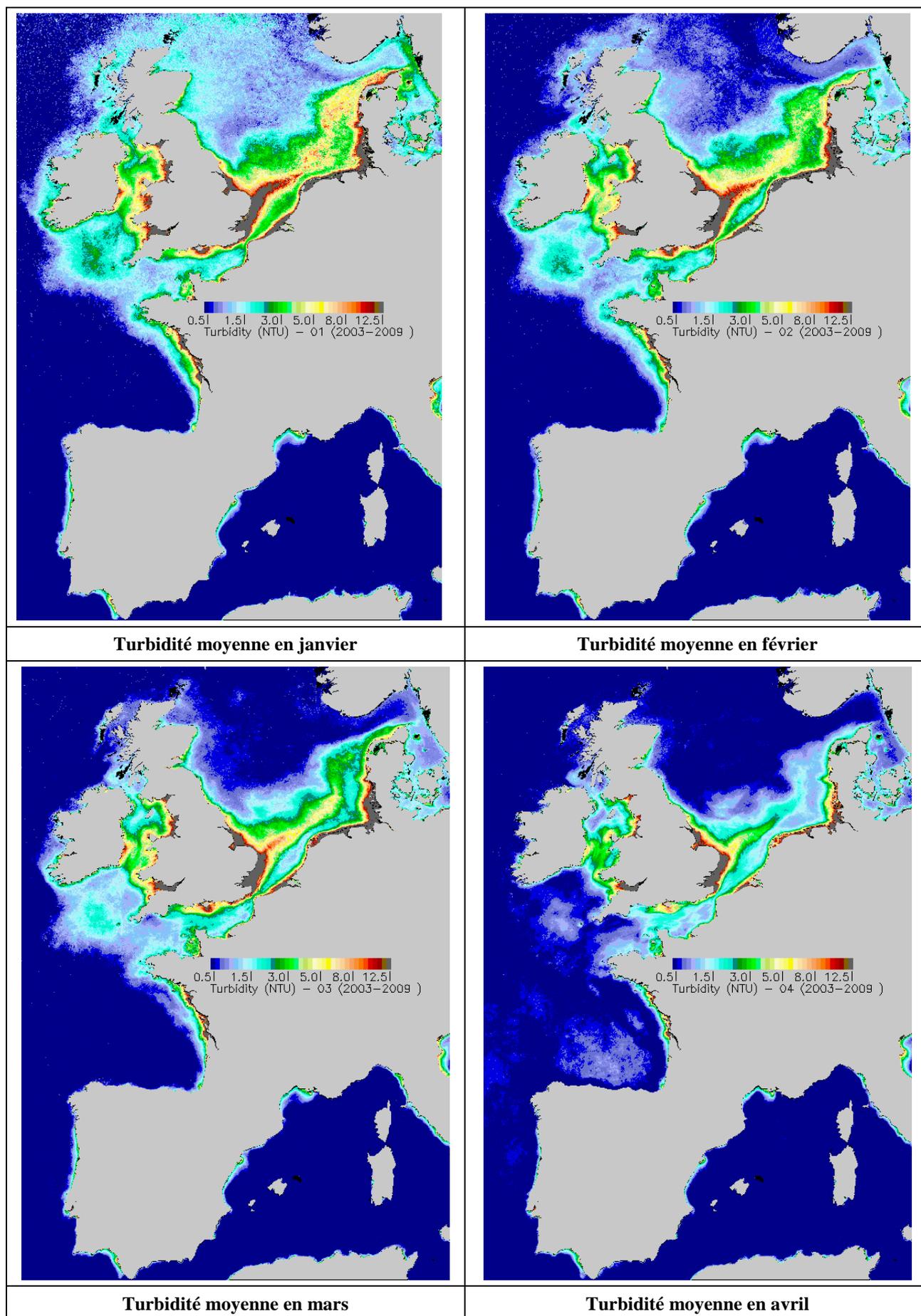


Fig. 27. La turbidité mensuelle moyenne de janvier à avril

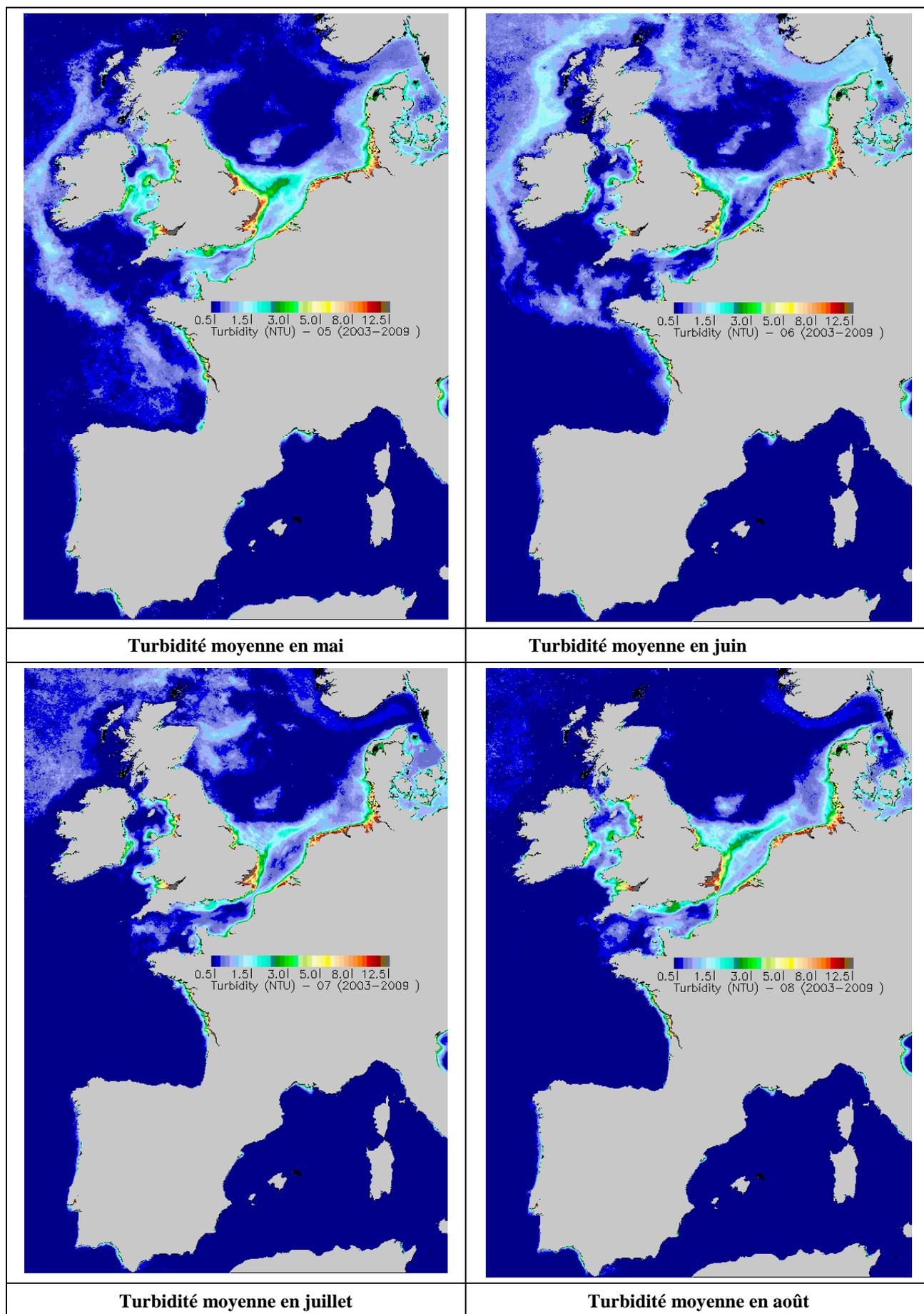


Fig. 28. La turbidité mensuelle moyenne de mai à août

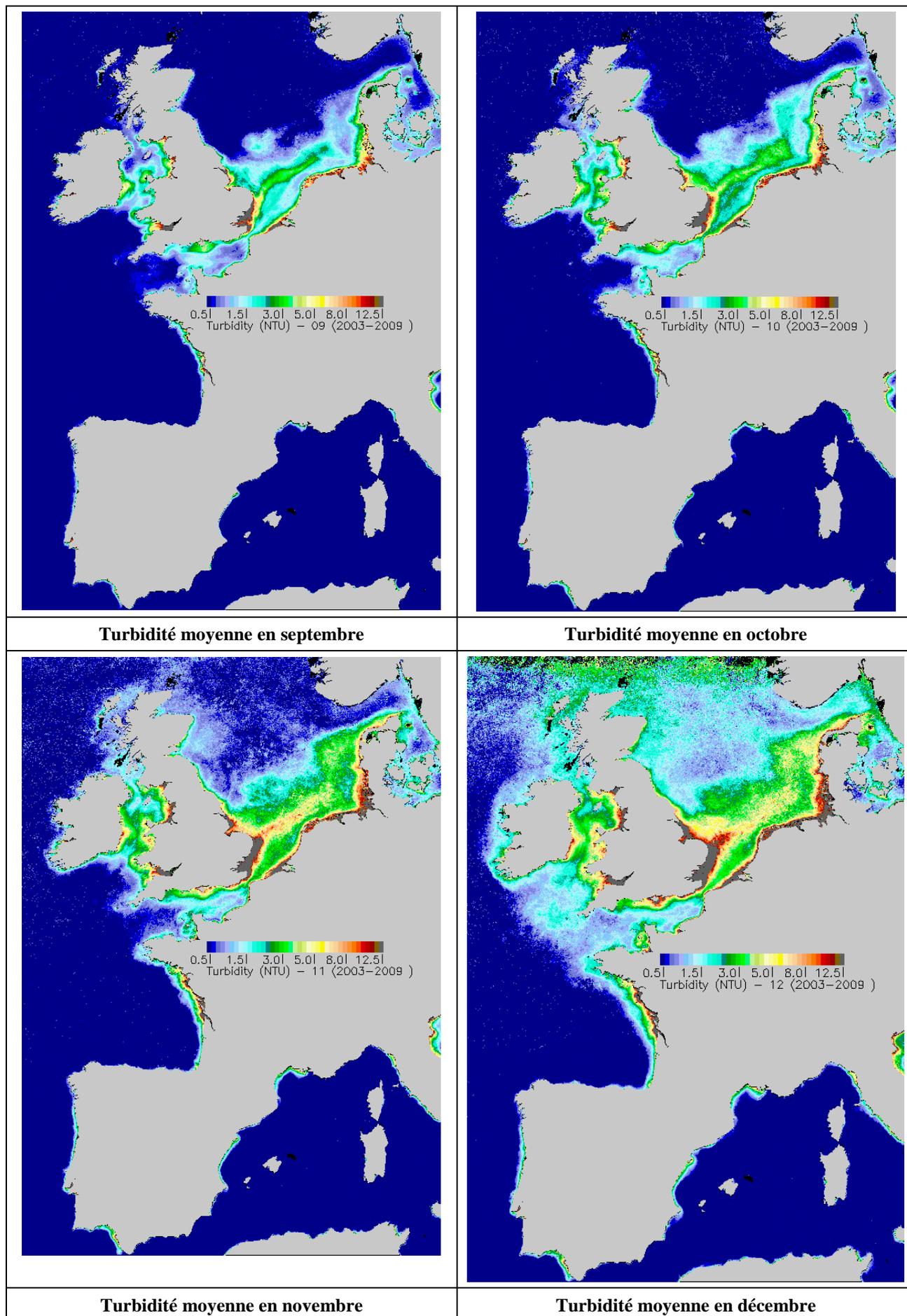


Fig. 29. La turbidité mensuelle moyenne de septembre à décembre

III.6 DISCUSSION SUR LES ATLAS ET ACCES AUX DONNEES

L'atlas des températures de surface a été calculé sur la période 1986-2009 à partir d'un jeu de données de qualité reconnue. Nous avons vu toutefois que la résolution pourra être améliorée à l'avenir car la résolution nominale du capteur AVHRR est de 1.2 km à bord des satellites polaires de la série NOAA ou de METOP/EUMETSAT. La principale faiblesse de cet atlas est localisée en Méditerranée occidentale où les forts vents de nord, comme le mistral, sont responsables d'écarts importants en température confondus avec des traces de nuages lors des tests de qualité automatiques. Nous avons vu, grâce aux contrôles sur les mesures des stations côtières, que cela avait pour effet de supprimer les observations de température basse l'été et donc de créer un biais positif dans les estimations des moyennes à partir des données AVHRR.

Cet atlas pourra être mis à jour au fur et à mesure que de nouvelles données du capteur AVHRR, ou de ses versions plus évoluées comme le futur VIIRS (Visible Infra-red Imager/Radiometer Suite), seront disponibles.

Les techniques et algorithmes visant à calculer la chlorophylle-a et la turbidité à partir des observations de la Couleur de l'eau, comme les réflectances de MODIS que nous avons utilisées, sont susceptibles d'être améliorés à l'avenir. Il n'y a pas en effet, au jour de la publication de ces atlas, d'algorithmes faisant l'unanimité des experts sur les eaux turbides côtières. Le cas est donc très différent de la TSM. Toutefois, les validations effectuées sur les données in situ, poussées au maximum permis par les jeux de données de référence, montrent la qualité des produits des satellites. Il est indéniable que des améliorations sont encore possibles, particulièrement pour les zones les plus côtières, où divers effets perturbent de façon flagrante la qualité des résultats, mais il est aussi vrai qu'il n'y a pas, pour dresser un état initial de l'environnement de surface du plateau continental, de jeux de mesures plus performants aujourd'hui que ceux des satellites.

Nous n'avons pas utilisé pour réaliser ces atlas le capteur MERIS de l'Agence Spatiale Européenne bien que ses données soient d'excellente qualité radiométrique et spectrale (davantage de canaux à 1.2 km). Nous pouvons avancer deux raisons pour cela, l'une tient au fait que l'archive Ifremer ne débute qu'en fin 2006 et l'autre, plus objective, tient à la plus faible couverture de la zone par MERIS (fauchée de 1150 km contre 2300 pour MODIS). Nous pouvons cependant être très positifs pour l'avenir car la série de données MERIS et de son successeur sur Sentinel-3 de l'Agence Spatiale Européenne sera poursuivie dans le cadre du projet européen GMES (Global Monitoring for Environment and Security) et fournira un jeu de données de qualité au moins équivalente à celle des données ayant été utilisées pour générer ces atlas.

Accès aux données sur site FTP:

TSM: <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/sst-l4hr-AVHRR-fnd/V2/climato/monthly/>

MODIS : <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/ocean-color/atlantic/modis/climato/>

Remerciements

Cet atlas est l'aboutissement de plusieurs projets qui, année après année, ont permis de développer des méthodes de traitements des mesures des satellites et de valider leurs produits par des mesures *in situ* de qualité. Nous tenons donc à remercier en premier les Agences Spatiales, en particulier la NOAA pour les données AVHRR et la NASA (via le DAAC GSFC) pour les données MODIS, et nos collègues des réseaux REPHY/Ifremer et SOMLIT/INSU. Nous remercions à la fois ceux qui ont fait les mesures dans les laboratoires côtiers et ceux qui ont permis la diffusion de ces données par leur mise à disposition sur des serveurs internet (comme Quadrige² pour les données REPHY). Enfin il est important de mentionner les projets européens ECOOP (European Coastal-shelf sea Operational Observing and forecasting system Project, Union Européenne), MarCoast2 (Agence Spatiale Européenne) et MyOcean/GMES (Union européenne) et Previmer qui ont apporté un support financier et un encouragement aux travaux destinés à la surveillance de l'environnement côtier.

IV- RÉFÉRENCES

TSM

Cannaby, H., and Husrevoglu, Y. S. : The influence of low-frequency variability and long-term trends in North Atlantic sea surface temperature on Irish waters. – *ICES Journal of Marine Science*, 66: 1480–1489, 2009

Cattiaux, J., Vautar, R. and Yiou, P.: North-Atlantic SST amplified recent wintertime European land temperature extremes and trends, *Clim Dynamique* DOI 10.1007/s00382-010-0869-0, 2010.

CONSEIL INTERNATIONAL POUR L'EXPLORATION DE LA MER (CIEM): Atlas de Température et Salinité de l'eau de surface de la Mer du Nord et de la Manche (Copenhague: Le Bureau du Conseil Service Hydrographique), 1933.

Kilpatrick, K.A., Podesta, G.P. and Evans, R.: Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated match-up database. *Journal of Geophysical Research*, 106, pp.9179–9197, 2001.

Saulquin B. and Gohin, F.: Evolution of the Sea Surface Temperature from satellite and in situ data in the English Channel for the period 1986-2006. *International Journal of Remote Sensing*, Volume. 31, No. 15, 4069–4093, 2010.

Walton, C.C., Pichel, W.G., Sapper, F.J. and May, D.A. : The development and operational application of non linear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with NOAA polar-orbiting environmental satellites. *Journal of Geophysical Research*, 103, pp. 27999–28012, 1998.

Chlorophylle-a et Turbidité

Gohin, F.: Joint use of satellite and in situ data for coastal monitoring. *Submitted to the ECOOP special issue of Ocean Science*

Gohin, F., Trabelsi, A. et Danielou, M.M.: Mise au point de méthodes pour la surveillance du phytoplancton : Cartographie des biomasses phytoplanctoniques par télédétection - Convention Ifremer/Onema 2009 - Action 11, <http://w3.ifremer.fr/blpintra/doc/00019/13006/9982.pdf>

Gohin, F., Saulquin B., Oger-Jeanerret, H., Lampert, L., Lefèbvre, A., Riou, P., and Bruchon, F.: Towards a better assessment of the ecological status of coastal waters using satellite-derived chlorophyll-a concentration., *Remote Sensing of Environment*, 112, 3329-3340, 2008

Gohin F., Loyer S., Lunven M., Labry C., Froidefond J.M., Delmas D., Huret M., Herbland A. : Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. , *Remote Sensing of Environment*, volume 95, Issue 1, pp 29-46, 2005.

Gohin F., Druon J.N., and Lampert, L. : A five channel chlorophyll algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23 , 8, pp 1639-1661, 2002.

Nechad, B., Ruddick, K.G., and Park, Y.: Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment*, 114, 854–866, 2010.

O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K. L., Garver, S. A., Kahru, S. A., and McClaim, C. : Ocean colour chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24 937–24 953, 1998.

V- ANNEXE

V.1 ATLAS DE LA CHLOROPHYLLE ET DE LA TURBIDITE A 5KM DE SEAWIFS

Les moyennes ont été calculées à partir des données journalières SeaWiFS GAC redressées géographiquement et auxquelles on a appliqué l'algorithme OC5 IFREMER pour l'estimation de la chlorophylle (Gohin et al, 2002) à partir de laquelle on estime les MES inorganiques et la turbidité.

Le calcul de la moyenne, comme pour les produits MODIS, s'effectue en 2 temps :

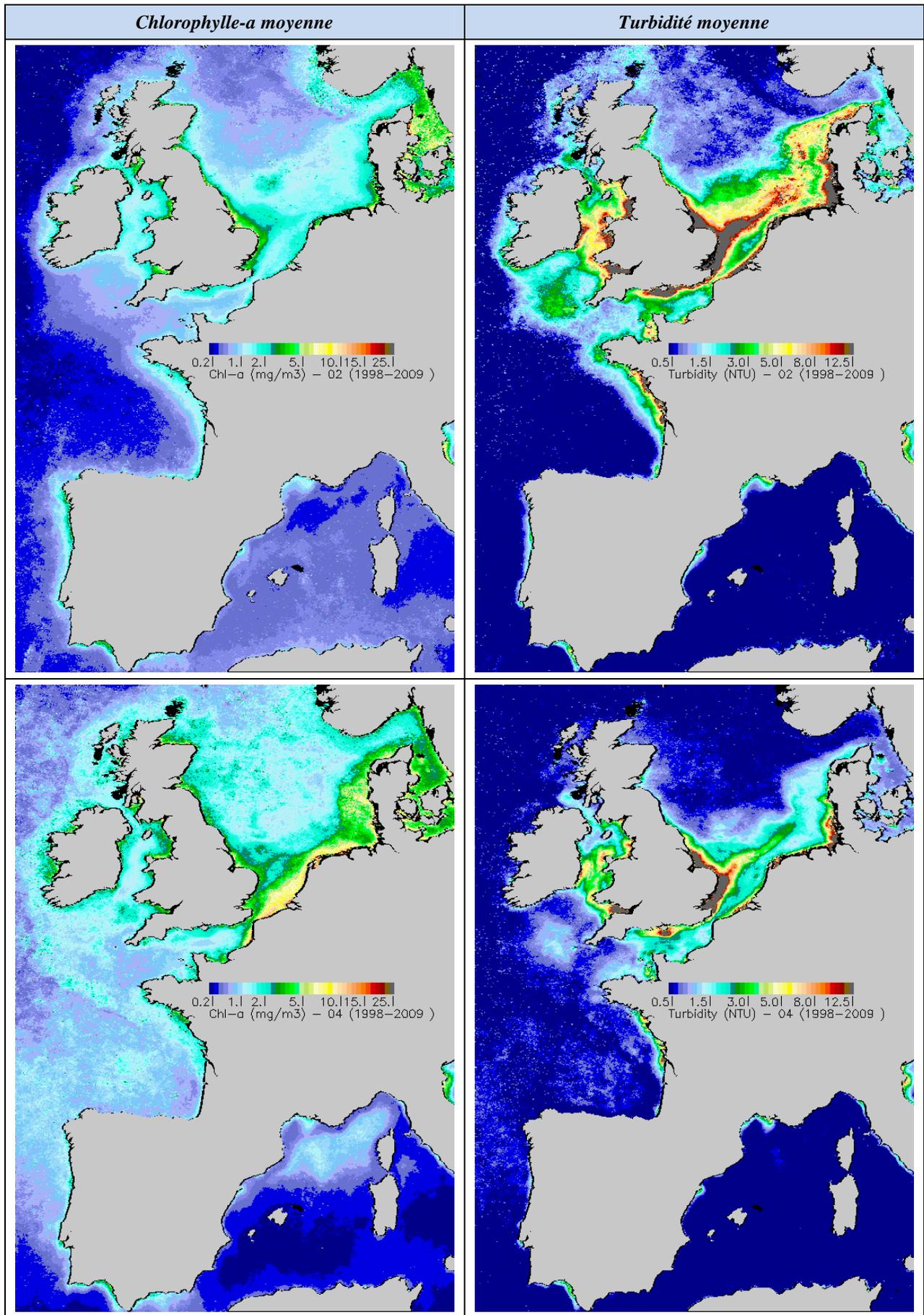
- Calcul de la moyenne mensuelle par année
- Puis calcul de la moyenne mensuelle globale (de 1998 à 2009) à partir de moyennes mensuelles annuelles.

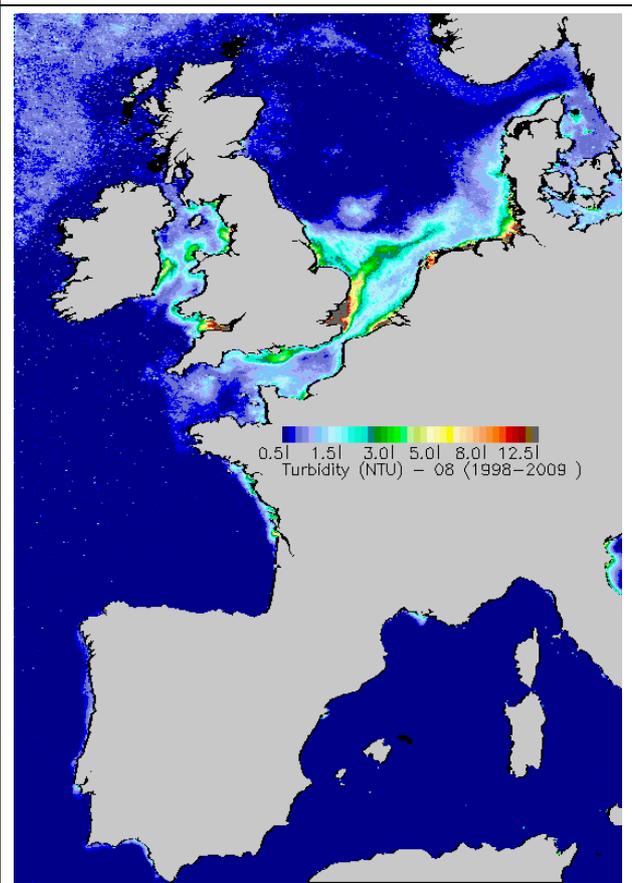
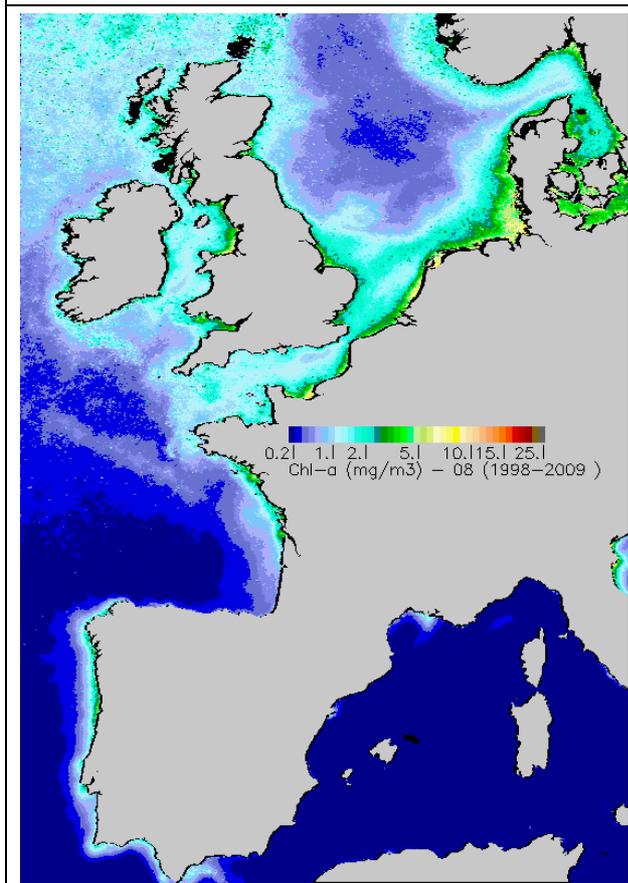
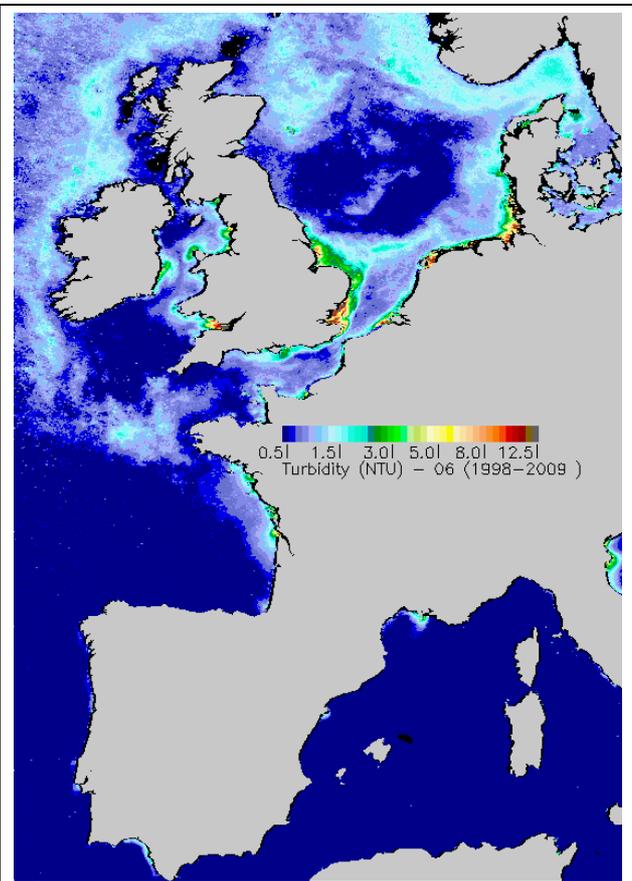
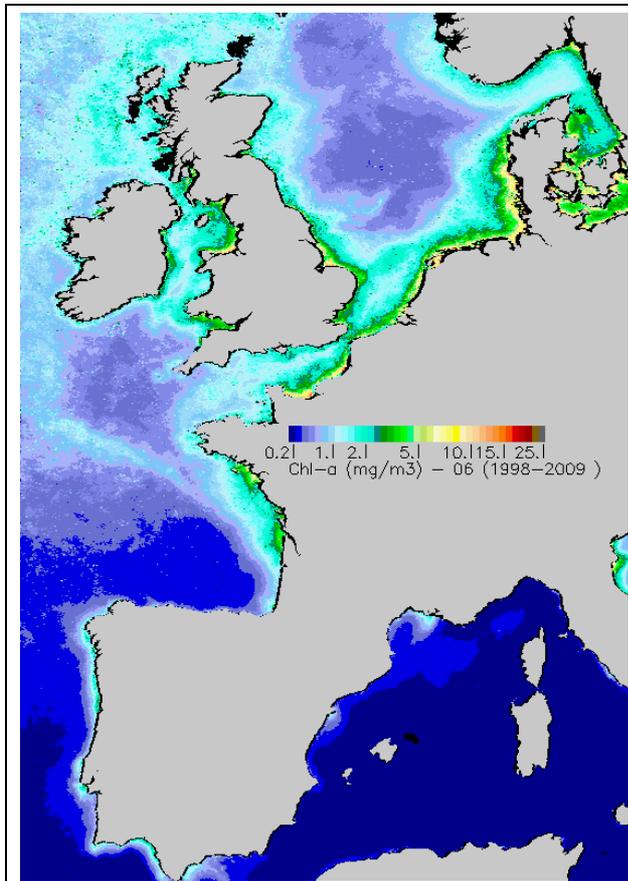
A noter que la série de données SeaWiFS GAC de la NASA comporte des manques à partir de 2008. Les deux années 2008 et 2009 sont donc incomplètes.

Les concentrations en chlorophylle et les turbidités moyennes des mois pairs sont présentées sur la figure A1. On constate une grande similitude avec les cartes MODIS établies sur la période 2003-2009.

Afin d'évaluer un effet capteur sur les valeurs estimées, les concentrations en chlorophylle et la turbidité ont été calculées à partir de SeaWiFS et MODIS sur une période commune, 2003-2007. La figure A2 présente des comparaisons des moyennes SeaWiFS (gauche) et MODIS (droite) en chlorophylle et turbidité sur 4 mois. On constate une bonne concordance en chlorophylle alors que les niveaux de turbidité pour les eaux claires de SeaWiFS sont plus faibles que ceux de MODIS. Il serait possible d'ajuster les paramètres de la régression reliant la rétrodiffusion de SeaWiFS dans le vert à la MES et à la turbidité mais la stabilité de la chlorophylle et de la turbidité au cours des années nous incite à faire le choix des climatologies MODIS pour définir la situation initiale de la DCSMM.

La durée plus courte de la série MODIS (2003-) est compensée par le gain en observation près de la côte apportée par la résolution de type LAC, à 1.2 km, par rapport au format GAC de l'archive SeaWiFS disponible sur l'Europe.





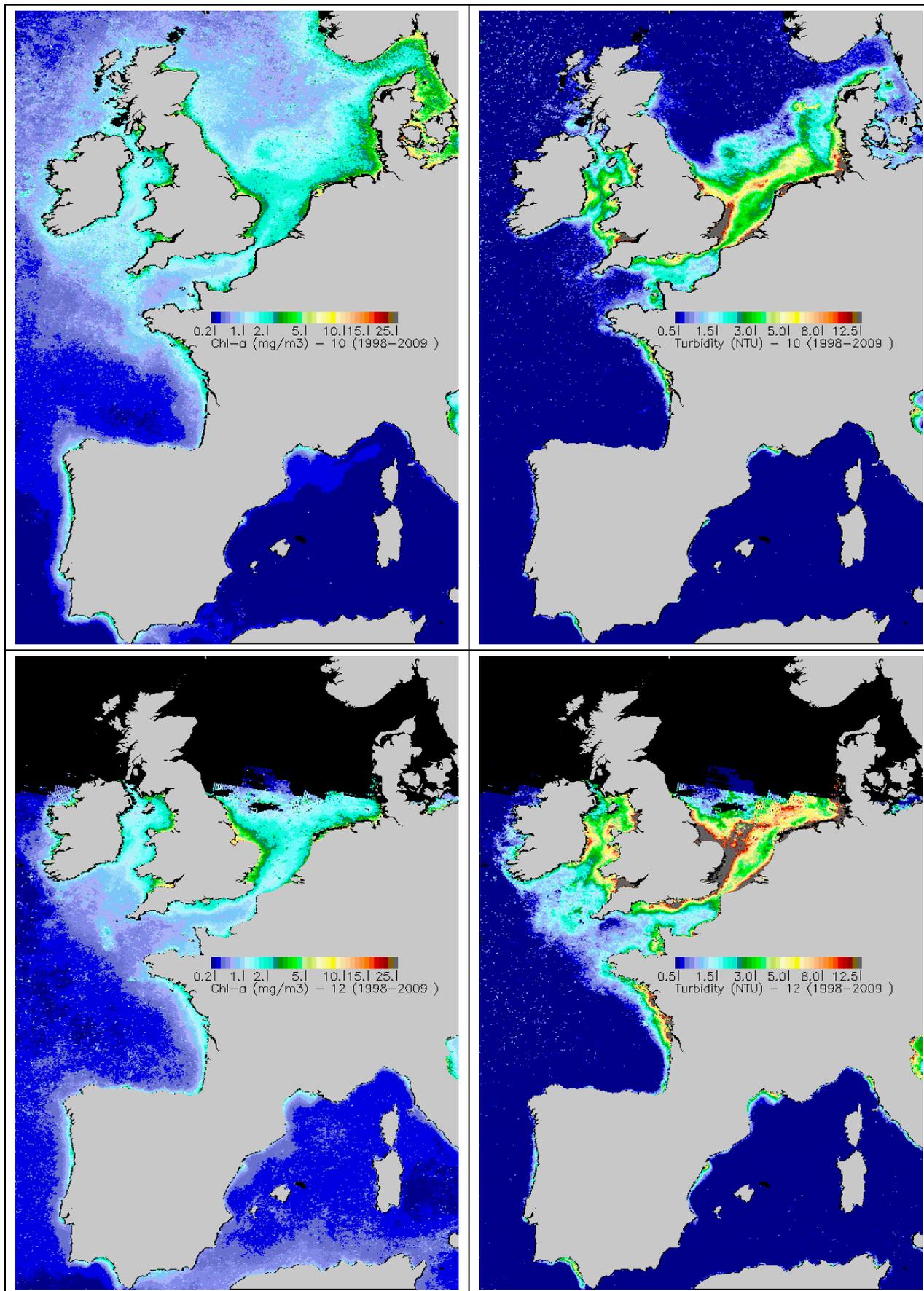
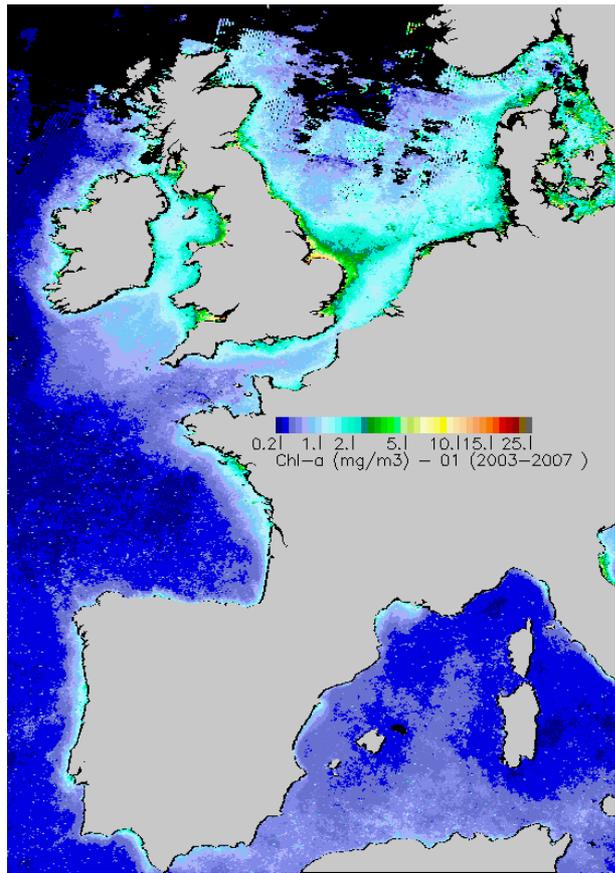
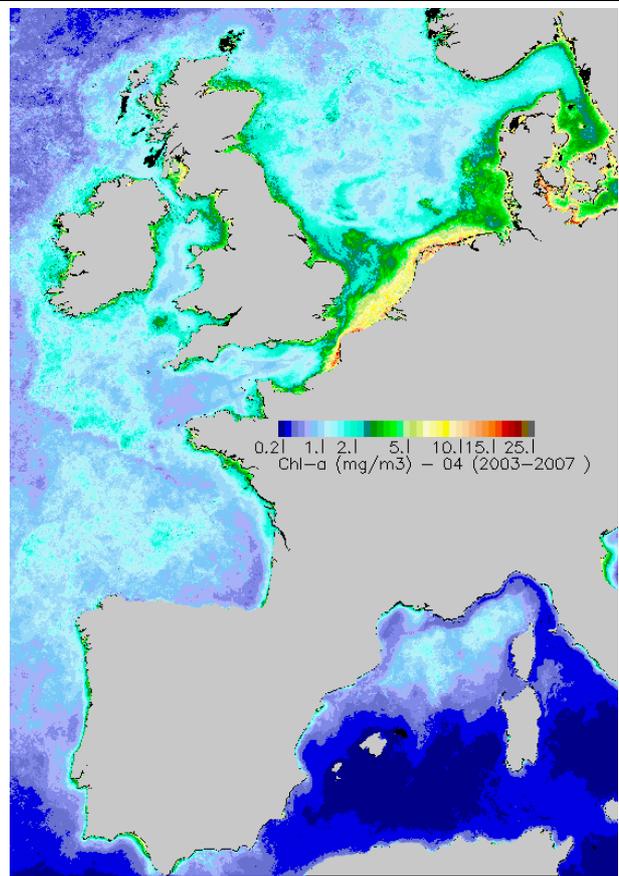
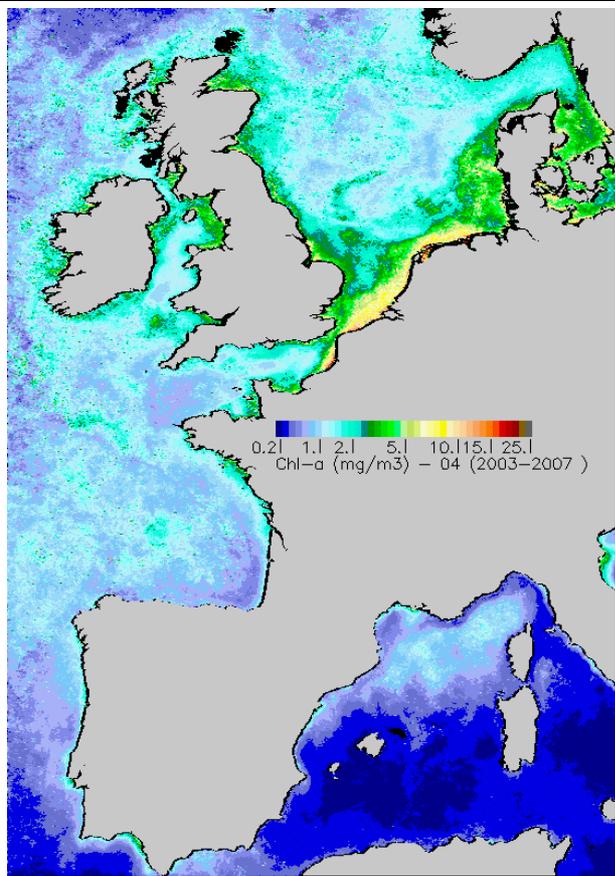
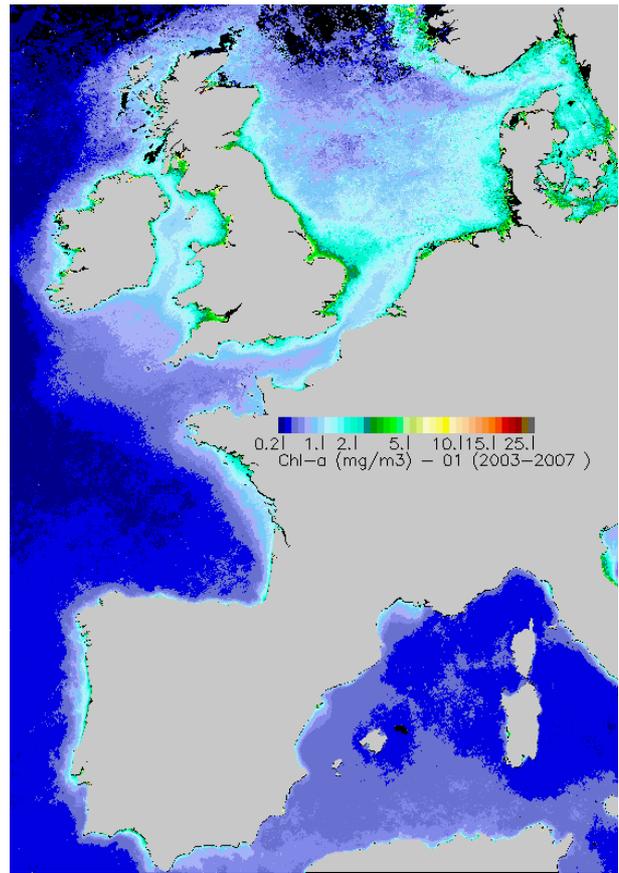


Fig. A1. Chlorophylle (à gauche) et turbidité (à droite) mensuelles SeaWiFs moyennes pour les mois de février, avril, juin, août, octobre et décembre

Chlorophylle-a SeaWiFs moyenne



Chlorophylle-a Modis moyenne



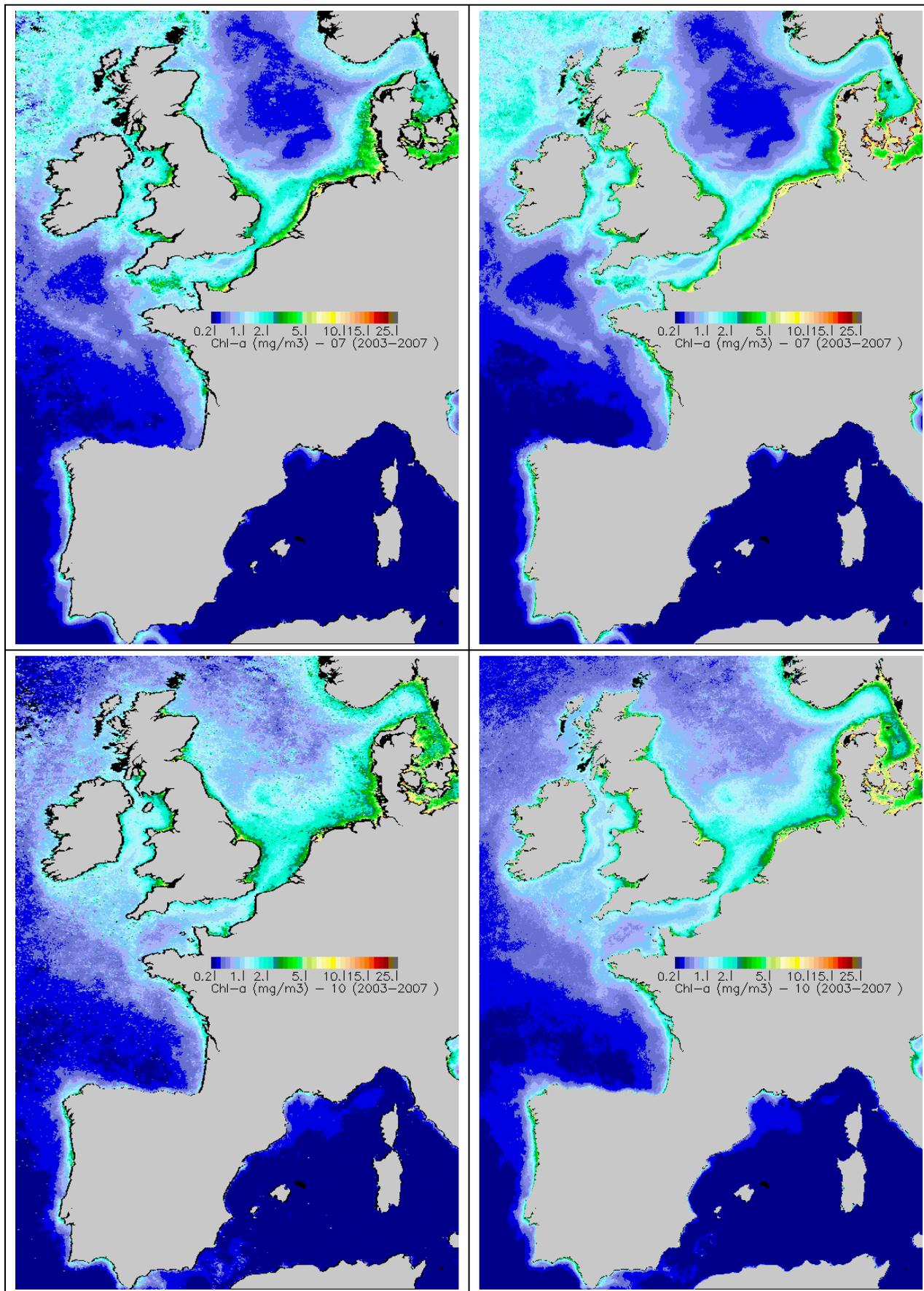
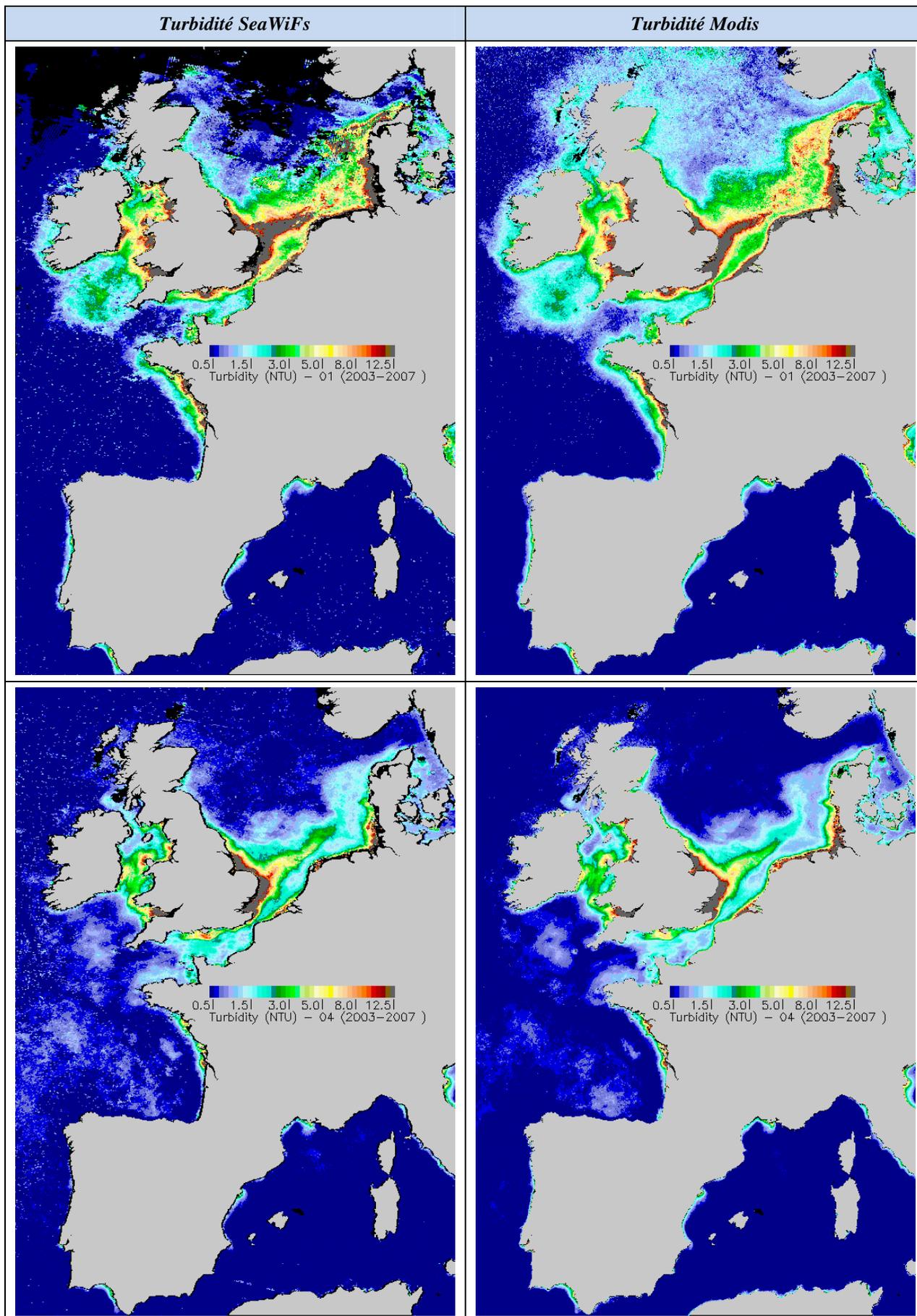


Fig. A2. Chlorophylle mensuelle moyenne SeaWiFs (à gauche) et Modis (à droite) pour les mois de janvier, avril, juillet, et octobre.



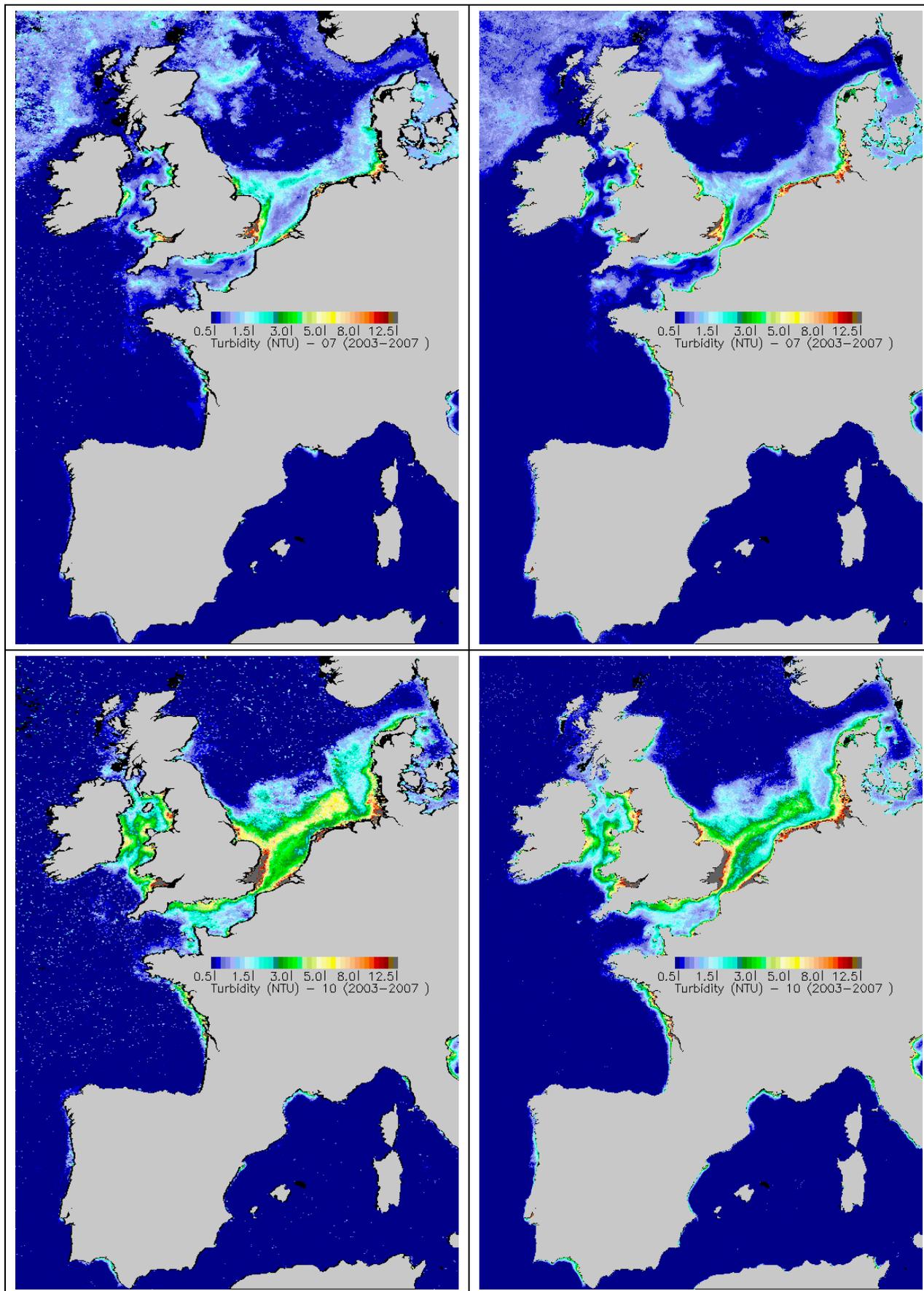


Fig. A3. Turbidité mensuelle moyenne SeaWiFs (à gauche) et Modis (à droite) pour les mois de janvier, avril, juillet, et octobre.