

Réalisation d'une climatologie mondiale de la température de surface de la mer à échelle fine

Yannice Faugère, Pierre Le Borgne et Hervé Roquet

Météo-France

Direction de la production

Centre de météorologie spatiale

BP 147

22302 Lannion Cedex

Courrier électronique : pierre.leborgne@meteo.fr

Résumé

Une nouvelle climatologie décennale de la température de surface de la mer à échelle fine a été réalisée pour améliorer la détection des nuages sur la mer dans l'imagerie satellitaire. Elle a été construite à partir des données AVHRR de nuit provenant des satellites NOAA sur la période 1985-1995. Cette climatologie comporte des champs de température moyenne, de température minimale et de température maximale à environ 9 kilomètres de résolution. Des champs du nombre de cas utilisés pour les calculs statistiques, de présence de glace et d'écart type ont également été calculés pour déterminer la qualité obtenue en chaque point de grille. Une méthode d'interpolation optimale a été mise en œuvre pour pallier le manque de données dans les zones de nébulosité persistante. La haute résolution permet de mettre en évidence des structures fines ou des phénomènes locaux, tels les upwellings côtiers. Le réalisme de cette nouvelle climatologie a été évalué par comparaison aux climatologies existantes et à des observations in situ.

Abstract

A global fine-scale sea-surface temperature climatology

A new 10-day period fine-scale sea-surface temperature climatology has been built to improve the detection of clouds over the sea in satellite imagery. We used night time AVHRR data from NOAA satellites over the period 1985-1995. This climatology is composed of fields of mean, minimum and maximum temperatures, at a resolution of about 9 km. Fields of number of cases used in the statistics, standard deviation and sea-ice presence were derived to characterise the quality obtained on each grid point. An optimal interpolation technique has been used to compensate for the lack of data in permanently cloudy areas. The small scale adopted resolves fine structures like coastal upwellings. The performance of this new climatology has been evaluated by comparison with existing climatologies and in situ observations.

Le Centre de météorologie spatiale (CMS) de Météo-France est engagé depuis 1997 dans le projet « Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility » (appelé ici SAF Océan), soutenu par l'organisation européenne Eumetsat. L'objectif du SAF Océan est de fournir aux utilisateurs, parmi lesquels les services météorologiques des pays membres d'Eumetsat, les champs à la surface de la mer du vent, des flux radiatifs et de la température de l'eau, calculés à partir des données des

Pixel, pixel clair, masque nuageux

Une image satellitaire est constituée d'éléments appelés **pixels**. La taille de ces pixels varie en fonction des caractéristiques du satellite, du radiomètre et de l'angle de visée. Les satellites météorologiques opérationnels produisent des images, dans les canaux visible ou infrarouge, avec un pixel dont le côté mesure de un à plusieurs kilomètres pour une visée à la verticale du satellite. Dans le cas d'un canal infrarouge, chaque pixel est caractérisé par sa température de brillance, telle qu'elle est mesurée par le radiomètre du satellite. Cette température est représentative de la température du sommet des nuages ou bien de la surface terrestre s'il n'y a pas de nuages (**pixel clair**). Dans le cas d'un pixel clair sur mer, on peut en déduire la température de surface de la mer.

Une étape déterminante du traitement est donc l'identification des pixels parfaitement clairs. Compte tenu de la taille du pixel, les cas de couverture nuageuse partielle dans un pixel sont fréquents et souvent difficiles à détecter. L'ensemble des pixels totalement ou partiellement nuageux, donc inutilisables pour le calcul de la température de surface, est appelé **masque nuageux**.

satellites météorologiques. Dans le cadre de la première phase du projet, la restitution de ces champs est envisagée sur une base préopérationnelle, c'est-à-dire avec une cadence fixe sur une zone prédéterminée. En ce qui concerne la production, au CMS, des champs de **température de surface de la mer (TSM)** qui nous intéressent ici, il est prévu dès 2001 de couvrir l'Atlantique aux basses et moyennes latitudes (entre 60° N et 60° S) toutes les trois heures et à 10 km de résolution, à partir des données des satellites géostationnaires américain *Goes Est* et européen *Météosat*. Le CMS pourra aussi être amené à assurer le calcul de la TSM sur l'ensemble du champ de vision du satellite *MSG*, qui couvre également la partie occidentale de l'océan Indien.



Page d'accueil du site Internet du SAF Océan [www.meteorologie.eu.org/safo/index.html].

Le calcul de la TSM est effectué à partir du rayonnement thermique mesuré par les canaux radiométriques infrarouges des satellites pour les **pixels clairs**. Une étape préliminaire à ce calcul est donc la détermination d'un **masque nuageux** fiable. Des méthodes de détection automatique des nuages sont développées depuis longtemps au CMS (Derrien et al., 1993). Sur mer, l'un des moyens les plus efficaces consiste à comparer la température de surface de la mer TSM_{sat} calculée sur un pixel à la **température climatologique minimale** TSM_{min} de ce pixel. Si la température calculée est significativement plus froide, le pixel est considéré comme contaminé par les nuages :

$$TSM_{sat} < TSM_{min} - \text{marge} \Rightarrow \text{présence de nuages}$$

où TSM_{min} est en principe la plus petite valeur de la TSM admissible à la position du pixel et compatible avec ses dimensions, et où « marge » est un paramètre d'ajustement permettant d'admettre des températures calculées légèrement inférieures au minimum.

Dans le cas du satellite *Goes Est*, représentatif des satellites géostationnaires, le masque nuageux est calculé toutes les heures à partir de l'image infrarouge à pleine résolution. Cette résolution est la plus haute (4 km) au sous-point du satellite et se dégrade avec l'angle zénithal satellitaire jusqu'à 10 km environ par 50° N et 37,5° W (limites de l'utilisation opérationnelle de *Goes Est* dans le cadre du SAF Océan). Les températures de surface de la mer calculées sont ensuite moyennées sur une grille régulière de maille 0,1 degré (environ 10 km).

Il faudrait donc, dans l'idéal, une estimation quotidienne de la valeur minimale admissible de la TSM à 4 km de résolution. À cette échelle, les structures froides de l'océan sont, par exemple :

- liées aux faibles profondeurs (refroidissements saisonniers précoces) ;
- créées par des apports de fleuves côtiers (panaches du Mississippi, etc.) ;
- induites par des upwellings (isthme de Tehuantepec) ;
- liées aux fluctuations des zones frontales (Gulf Stream au sud de Terre-Neuve).

Chaque phénomène de ce type produit une signature sur une climatologie de températures minimales si celle-ci est établie à partir de données résolvant ces phénomènes ; dans ce cas, ces signatures sont exploitables pour la confection ou le contrôle d'un masque nuageux.



Antennes de réception satellitaire
du Centre de météorologie spatiale de Lannion.
(© REA, Patrick Allard)



Seules les données satellitaires permettent de réaliser des climatologies à cette résolution spatiale. Mais, compte tenu du caractère récent de ces techniques, de telles climatologies portent sur un nombre limité d'années et leur représentativité n'est pas idéale.

Nous avons besoin d'une climatologie de TSM sur l'Atlantique et l'océan Indien ; nous avons cependant décidé de réaliser un atlas climatique à l'échelle planétaire, ce qui ne représente pas de surcoût notable et permet une extension éventuelle à l'océan Pacifique. Cet atlas doit être à échelle fine pour décrire les petites structures océaniques, à une résolution qui soit au moins compatible avec celle des champs de TSM produits par le SAF Océan (10 km). Enfin, son pas de temps doit être inférieur au mois pour prendre en compte les variations temporelles rapides de l'océan (par exemple, celles du mois de juin pour les latitudes tempérées de l'hémisphère nord). La détermination des températures climatologiques minimales, pour la confection du masque nuageux, est l'objectif principal du travail décrit ici. Des **températures climatologiques moyennes** ont cependant été également déterminées, dans une perspective d'utilisation plus large en météorologie, en océanographie ou pour l'étude du climat. La connaissance de la TSM à cette échelle devient, en particulier, un objectif prioritaire pour l'océanographie opérationnelle (par exemple dans le cadre du projet Mercator), à la fois à des fins d'assimilation dans les modèles numériques océaniques, d'estimation améliorée des flux de chaleur sensible à l'interface océan-atmosphère et de validation des TSM simulées numériquement. Dans ce cadre, les climatologies de températures moyennes constituent naturellement une ébauche de qualité pour réaliser une analyse opérationnelle de la TSM à cette échelle.

Le but de cet article est de présenter brièvement les données et la méthode utilisées pour confectionner l'atlas climatique, ainsi que les quelques éléments de comparaison qui nous ont permis de contrôler la validité des résultats. Nous avons privilégié, dans les exemples présentés, les zones de l'Atlantique ouest qui nous servent de banc d'essais dans le cadre de l'utilisation du satellite *Goes 8*.

Climatologies existantes

La climatologie de température de surface de la mer ayant la résolution la plus haute, lors du début du travail décrit ici (fin 1998), était la **climatologie de Reynolds** (Reynolds et Smith, 1995). Cette climatologie, à résolution spatiale de un degré, s'appuie sur trente ans de données in situ du Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set (COADS, couvrant la période 1950-1979) et sur onze ans de données satellitaires AVHRR (1982-1993). Elle ne répond pas aux besoins de notre projet pour deux raisons majeures : sa résolution spatiale est trop faible et elle ne comporte pas de valeurs minimales.

Nous avons eu récemment connaissance de l'aboutissement d'un projet parallèle au nôtre : la **climatologie Pathfinder-Erosion** (Casey et Cornillon, 1999), créée



à partir des données Pathfinder (voir plus loin) de jour et de nuit de 1985 à 1997. Les auteurs ont complété le masque nuageux initial de ces données par l'élimination des pixels voisins du masque, considérés comme potentiellement contaminés (d'où la dénomination « Erosion » de leur climatologie). Un lissage a été appliqué par la suite aux données. Cette climatologie a été réalisée sur une base mensuelle et pentadaire. Elle n'était pas disponible lorsque nous avons débuté ces travaux ; par ailleurs, elle ne correspond pas à notre besoin d'une climatologie de valeurs minimales.

La différence entre température moyenne et température minimale est très variable et peut atteindre plusieurs degrés, par exemple dans les régions d'upwelling. Il serait donc peu précis de déduire un champ de température minimale d'un champ de température moyenne, voire d'utiliser directement un champ de température moyenne pour déterminer le masque nuageux.

Il n'existe donc pas de climatologie de température minimale à l'échelle planétaire, même à résolution grossière. D'où l'intérêt de ce travail.

Données disponibles et objectifs

Seules les données satellitaires issues du radiomètre imageur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) ont les caractéristiques permettant d'atteindre notre objectif : couverture planétaire biquotidienne à 4 km de résolution avec une profondeur de temps suffisante puisque le radiomètre AVHRR des satellites défilants NOAA est opérationnel sous sa forme actuelle depuis juin 1981 (satellite NOAA 7). Dans le cadre du projet Pathfinder, les données de TSM déduites des mesures de l'AVHRR sont disponibles sur toute la planète, sur une base quotidienne, à une résolution voisine de 10 km et sur une durée supérieure à dix ans. Le projet Pathfinder est un projet de la NOAA, en association avec la Nasa, qui retrace les données satellitaires actuellement disponibles pour produire des séries temporelles fiables de produits géophysiques, dont la TSM (Vasquez et al., 1998). Les données disponibles au début du projet couvrent les années de 1985 à 1995, période récemment prolongée jusqu'à 1997. Les TSM Pathfinder ont été calculées à partir de coefficients ajustés mensuellement pour pallier, notamment, la dérive du radiomètre AVHRR (Evans et Podesta, 1998). Cet ajustement permet également de corriger en moyenne certains artefacts, comme l'effet des cendres volcaniques.

Température minimale, température moyenne

Dans cet article, la **température climatologique minimale** de la surface de la mer désigne la valeur minimale de TSM observée en un point donné sur les onze années servant de base à la climatologie et sur les dix jours de la décade considérée. Il s'agit donc d'une minimale temporelle. Une définition similaire s'applique pour la **température climatologique moyenne** et pour la **température climatologique maximale**.

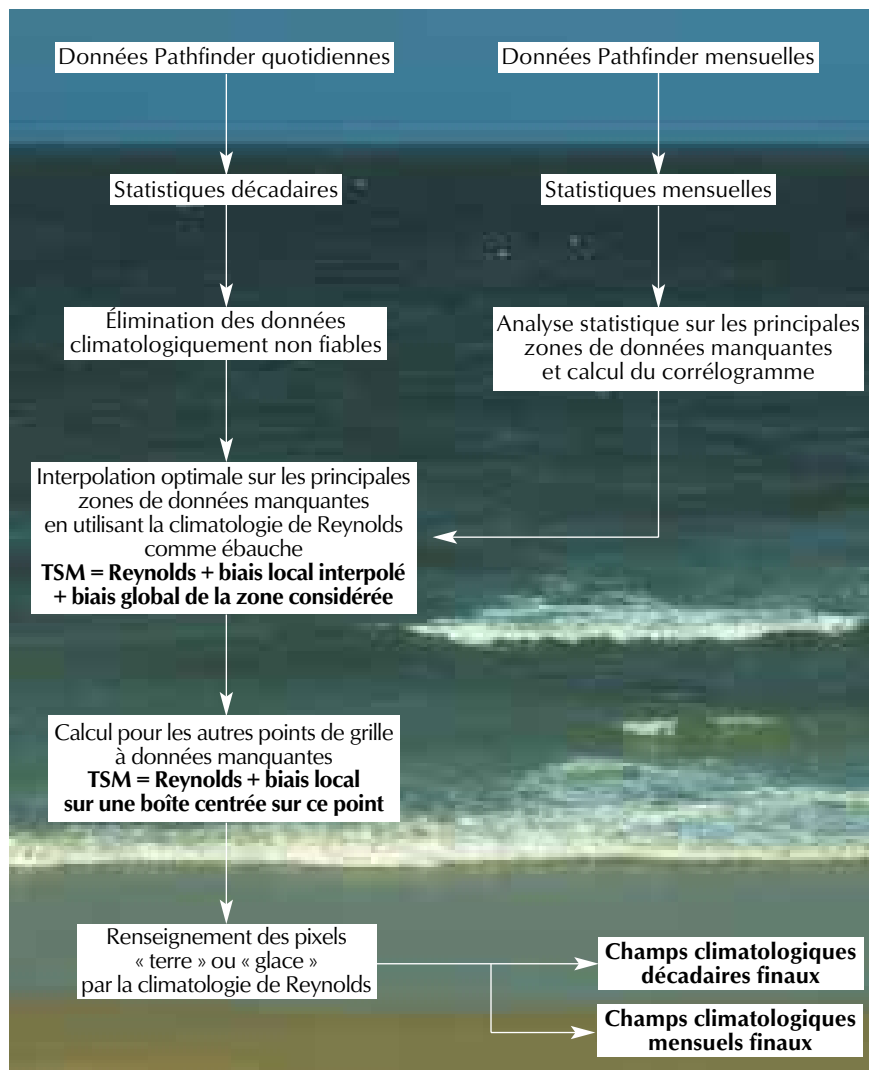
Les objectifs de notre travail sont de produire des champs mondiaux décennaux de température de surface de la mer (température moyenne, minimale et maximale, nombre de cas et écart type) à partir des données Pathfinder de 1985 à 1995. Cette nouvelle climatologie sera appelée par la suite **climatologie SAF Océan**. Les décades sont définies mois par mois de la façon suivante : du 1^{er} au 10, du 11 au 20, du 21 à la fin du mois. Cette définition donne 36 décades par an. Les caractéristiques géographiques de cette climatologie sont celles des données Pathfinder d'origine : projection cylindrique isolatitudes et isolongitudes à 0,088 degré de résolution spatiale, soit 9,77 km à l'équateur. La résolution en température est de 0,15 °C. Nous avons décidé de ne traiter que les données Pathfinder de nuit, parce que notre objectif principal est la recherche de valeurs minimales et parce que, même pour les valeurs moyennes destinées à mettre en évidence des anomalies, il est intéressant de disposer de champs de référence qui ne sont pas affectés par le réchauffement diurne.

Les traitements

Un premier traitement a permis de constituer des champs décennaux « bruts ». Pour une décade donnée, ce traitement résulte d'un simple calcul des cinq paramètres cités ci-dessus sur les onze ans de données quotidiennes de TSM Pathfinder : 110 données devraient donc être disponibles pour un point de grille. Ces données peuvent être cependant absentes, soit parce que le point de grille est continental, soit parce qu'il est couvert de glace ou affecté par la nébulosité. Les champs décennaux bruts présentent donc des zones de données manquantes correspondant aux continents, aux glaces permanentes et aux zones de nébulosité persistante. Les zones continentales et les zones couvertes en permanence de glaces ont été préalablement identifiées, puis une stratégie de remplissage des zones de données manquantes induites par la nébulosité persistante a été mise en place, afin d'obtenir la climatologie la plus complète et la plus précise possible sur les zones de mer libre. La figure 1 présente le schéma d'ensemble du traitement.



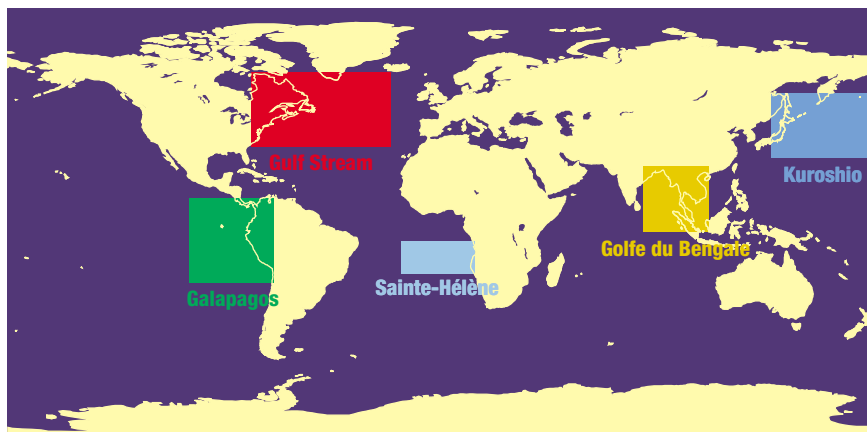
Figure 1 - Les principales étapes de l'élaboration de la climatologie SAF Océan de la température de surface de la mer.



Sur l'ensemble de l'année, 4,6 % des points de grille situés en mer entre 60° N et 60° S correspondent à des données manquantes ; cette valeur atteint 6,4 % pour la décennie centrale d'août. Ces valeurs ne sont pas négligeables ; aussi, une méthode de remplissage minimisant le temps de calcul est-elle nécessaire.

La figure 2 montre la localisation des cinq zones particulièrement affectées par le manque de données. Les deux situées le plus au nord sont des zones de forte nébulosité hivernale, mais aussi des zones de forts gradients thermiques de surface, qui peuvent avoir été identifiées à tort comme nuageuses. Les trois autres sont des zones tropicales où la couverture nuageuse est importante (mousson...).

Figure 2 - Localisation des cinq principales zones affectées par le manque de données dû à la nébulosité persistante.



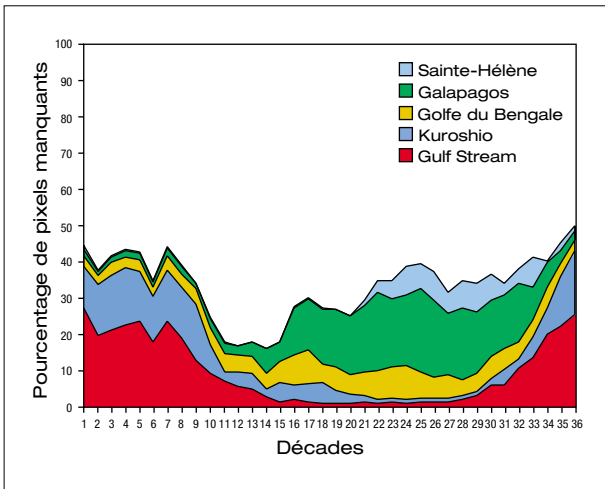


Figure 3 - Pourcentage de points de grille correspondant à des données manquantes et situés dans les cinq zones de la figure 2 par rapport au nombre total de données manquantes entre 60° N et 60° S.

La figure 3 présente le pourcentage de données manquantes situées dans ces zones par rapport au nombre total de données manquantes entre 60° N et 60° S. Par exemple, dans la première décennie de janvier, 27 % des données manquantes sont situées dans la zone du Gulf Stream qui représente seulement 3 % du nombre total des points de grille en mer. Plus généralement, pour tous les mois, excepté avril et mai, environ 40 % des données manquantes sont situées dans ces régions. Les données manquantes résiduelles correspondent à des points isolés, notamment en bordure des côtes.

Deux techniques ont été mises en œuvre pour compléter les données manquantes dans les zones de nébulosité permanente. Pour les zones et les mois où le manque de données est important (tableau 1), une technique d'interpolation optimale (coûteuse en temps de calcul) a été utilisée ; pour le reste, nous avons adopté un simple calcul de biais moyen.

L'interpolation optimale permet de constituer une grille régulière de température de surface de la mer à partir d'observations réparties de façon irrégulière et d'une première estimation du champ appelée ébauche. L'ébauche fournit la structure globale du champ. Dans notre cas, la climatologie de Reynolds, réalisée à partir d'un grand

Zone géographique	Mois concerné											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Gulf Stream	■	■	■									■
Kuroshio	■	■	■									■
Golfe du Bengale						■	■	■	■			
Galapagos						■	■	■	■	■	■	
Sainte-Hélène								■	■	■	■	

Tableau 1 - Zones et périodes de données manquantes pour lesquelles la méthode d'interpolation optimale a été utilisée.

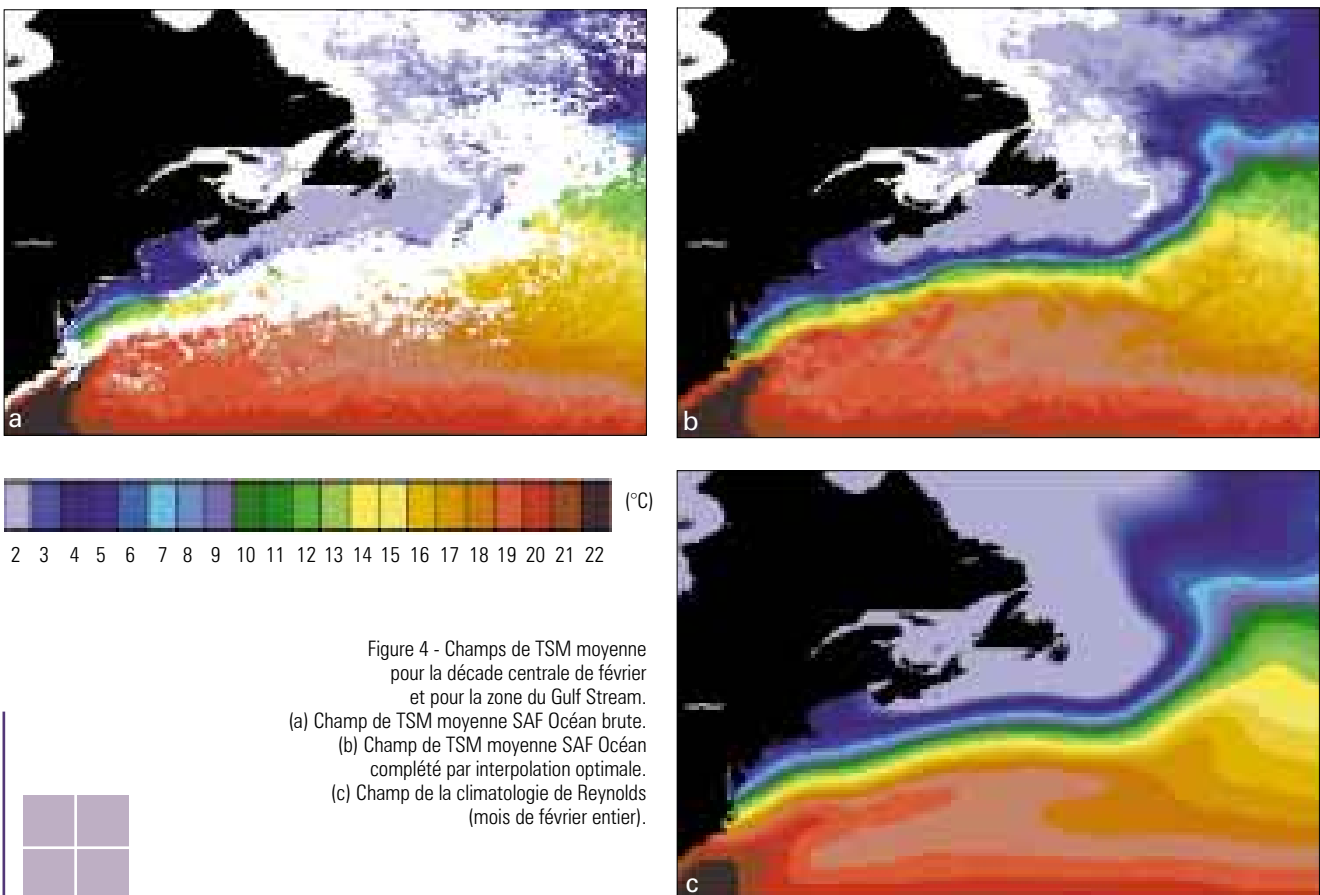


Figure 4 - Champs de TSM moyenne pour la décennie centrale de février et pour la zone du Gulf Stream.
 (a) Champ de TSM moyenne SAF Océan brute.
 (b) Champ de TSM moyenne SAF Océan complété par interpolation optimale.
 (c) Champ de la climatologie de Reynolds (mois de février entier).

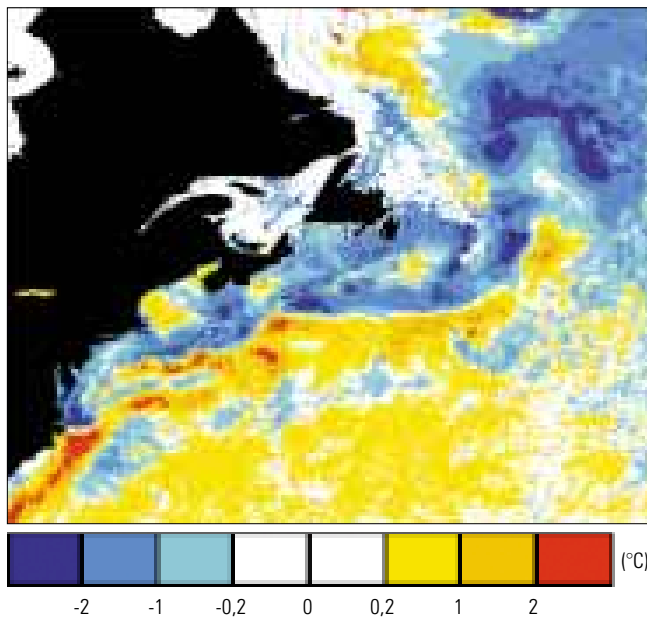


Figure 5 - Carte de la différence entre le champ de TSM moyenne SAF Océan pour la décennie centrale de février et la climatologie de Reynolds pour le mois de février entier.

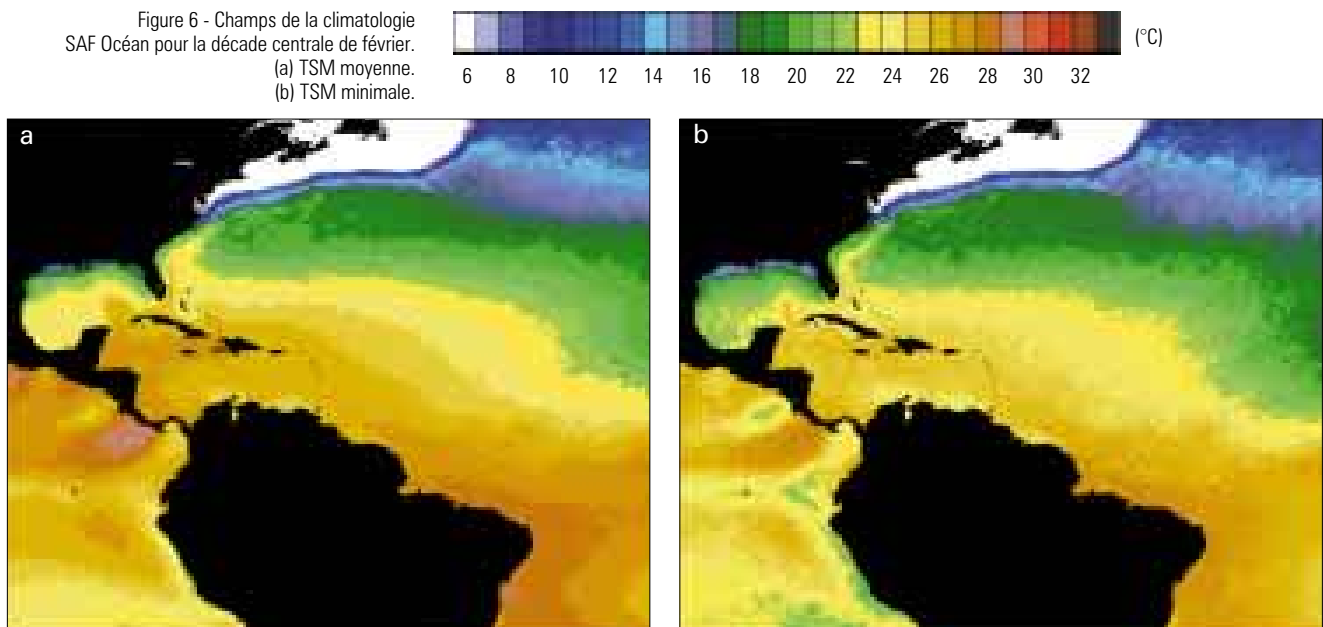
Les isothermes du champ résultant de l'interpolation optimale sont plus irrégulières que celles du champ de Reynolds (figure 4c), mais la structure globale est conservée. Le gradient nord-sud obtenu est plus fort que celui du champ de Reynolds, ce qui se traduit sur la figure 5, qui montre la différence entre le champ interpolé et la climatologie de Reynolds, par des valeurs négatives dans les eaux froides et positives dans les eaux chaudes de la région du Gulf Stream.

Appliquer une technique d'interpolation optimale en chaque point du globe correspondant à une donnée manquante serait trop lourd, étant donné la résolution de l'atlas, et cela pour un gain en précision minime. Pour les points de grille manquants extérieurs aux cinq zones traitées précédemment ou pour les mois non concernés par le tableau 1, nous avons adopté une technique plus simple et plus rapide, qui consiste à utiliser directement la valeur de la climatologie de Reynolds corrigée du biais local moyen observé dans la zone voisine du point de grille.

Description du produit final

Le produit final comporte cinq champs décennaires (température moyenne, minimale et maximale, nombre de cas, écart type) et un champ mensuel (extension maximale des glaces de mer). Afin de confronter nos résultats à d'autres climatologies, les champs mensuels de température moyenne et minimale ont été également construits.

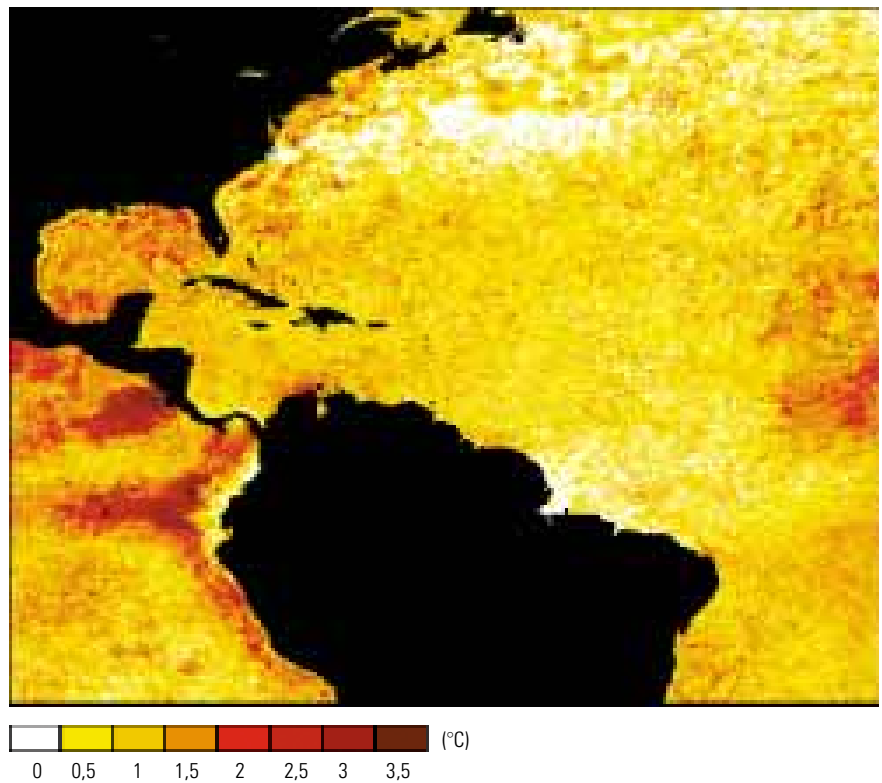
Figure 6 - Champs de la climatologie SAF Océan pour la décennie centrale de février.
(a) TSM moyenne.
(b) TSM minimale.



nombre d'années de mesure, a servi d'ébauche. Cette technique implique une étude préalable de la corrélation spatiale du biais $TSM_{SAF\ Océan} - TSM_{Reynolds}$ pour chaque zone et chaque mois concerné. Aucune anisotropie statistiquement significative des fonctions d'autocorrélation n'a été mise en évidence, à l'exception des zones Gulf Stream et Kuroshio pour lesquelles les régions frontales privilégient les gradients thermiques dans la direction nord-sud. Une fois les fonctions de corrélation estimées, puis modélisées, on calcule par interpolation optimale le biais pour chaque point de grille présentant une donnée manquante. La valeur ainsi obtenue est influencée par les données les plus proches. On en déduit ensuite la valeur recherchée $TSM_{SAF\ Océan}$. L'algorithme d'interpolation optimale utilisé dans cette étude est celui décrit par De Mey et Ménard (1989).

La figure 4 présente le cas du Gulf Stream pour la décennie centrale de février. Le champ de $TSM_{SAF\ Océan}$ obtenu par interpolation (figure 4b) est cohérent avec les TSM brutes (figure 4a). Les zones blanches de la figure 4b correspondent au masque « glace », à l'intérieur duquel aucune interpolation n'a été effectuée ; les quelques données dues à des années de faible extension de la glace de mer ont cependant été conservées.

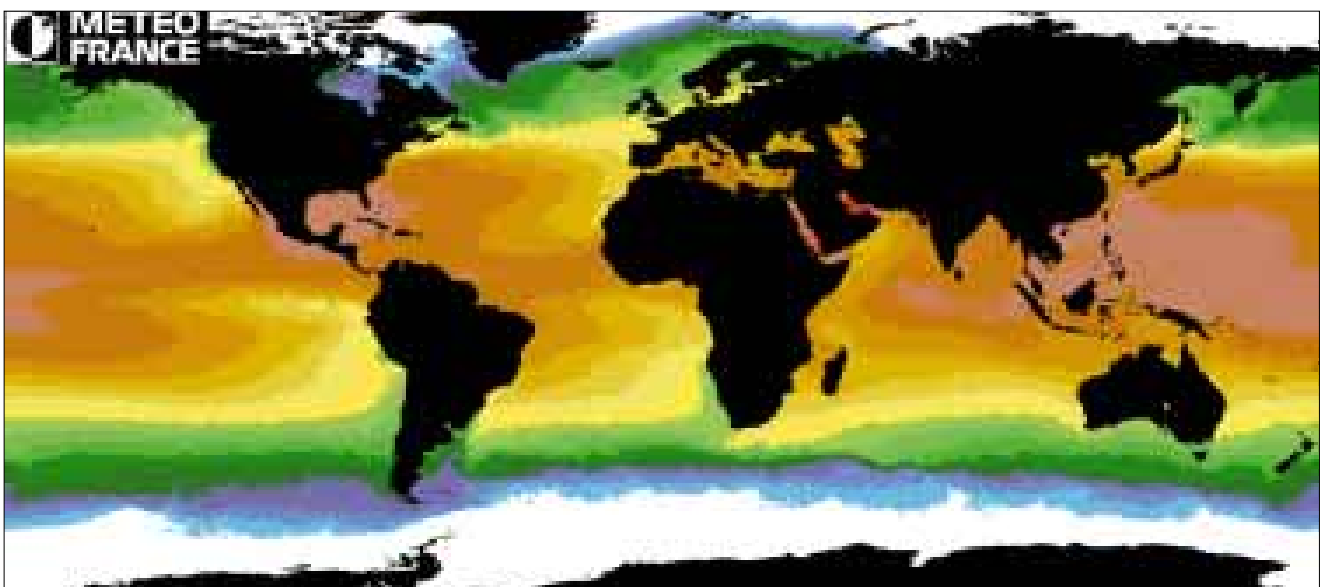
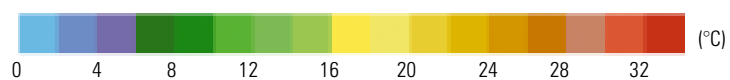
Figure 7 - Carte de la différence entre le champ de TSM moyenne SAF Océan et le champ de TSM minimale SAF Océan pour la décade centrale de février.



Des exemples de résultats sont donnés figure 6. Sur ces cartes, on peut observer des structures fines comme les upwellings de la côte Pacifique de l'Amérique centrale ou l'extension du panache d'eaux froides du Mississippi dans le golfe du Mexique. La différence entre les champs de température moyenne et de température minimale (figure 7) est très variable dans l'espace, ce qui confirme la nécessité de déterminer explicitement la température minimale. Sur la zone présentée figure 7, les minimales sont en effet globalement plus froides de 1 °C environ, mais la différence peut dépasser 3 °C sur la côte Pacifique de l'Amérique centrale.

Un exemple de champ planétaire de température moyenne est montré figure 8. On observe sur cette figure l'extension minimale du masque « terre » défini par les altitudes positives.

Figure 8 - Champ planétaire de TSM moyenne SAF Océan pour la décade centrale d'août.



Validations de la climatologie

Phénomènes particuliers entre 1985 et 1995

La climatologie SAF Océan ainsi obtenue a été validée en la comparant, d'une part aux climatologies existantes, d'autre part aux observations in situ.

Les particularités des onze années sur lesquelles a été calculée la climatologie SAF Océan ont été brièvement recensées : le phénomène El Niño, les glaces, les aérosols et l'Oscillation Nord-Atlantique.

El Niño

Le phénomène El Niño a été prépondérant dans les années 1986-1987 et 1990-1994⁽¹⁾. Cependant, le phénomène inverse La Niña, entraînant des anomalies négatives de TSM, est apparu en 1989, ce qui permet d'avoir un champ de température minimale représentatif.

Les glaces

La couverture de glace de l'hémisphère nord a été particulièrement faible (déficit de 1,7 million de km²) durant l'été 1995. On trouve donc dans les champs de TSM calculés des points isolés pourvus d'un petit nombre de cas aux latitudes élevées de l'hémisphère nord pour les mois de juin à septembre. On retrouve la même anomalie dans l'hémisphère sud au printemps austral 1995⁽²⁾ avec une couverture de glace déficitaire de 1,4 million de km².

Les aérosols

En 1991, les aérosols dus à l'éruption du volcan Pinatubo ont perturbé les mesures satellitaires dans l'infrarouge, conduisant à des TSM calculées inférieures aux TSM réelles. Ce phénomène a été pris en compte dans la version des algorithmes Pathfinder utilisée dans cette étude (Evans et Podesta, 1998) et ce biais a été globalement corrigé. Il semble avoir été cependant sous-estimé (de 0,1 à 0,2 °C) en zone tropicale et surestimé entre 20° N et 40° N. Il est donc possible que l'impact de ces aérosols soit tout de même perceptible dans le champ de température minimale de la climatologie SAF Océan.

L'Oscillation Nord-Atlantique

Enfin, l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) a été majoritairement positive⁽³⁾, ce qui impliquerait un refroidissement zonal de la TSM le long des parallèles 20° N et 50° N et un réchauffement entre ces bandes (Miller et al., 1997).

En conclusion, la période étudiée est bien représentative des phénomènes provoquant des anomalies froides de la température de surface de la mer. Cependant, l'épisode Pinatubo a pu diminuer les températures minimales calculées de 0,1 à 0,2 °C dans les régions tropicales.

Comparaison avec les climatologies existantes

Nous avons confronté la climatologie SAF Océan aux climatologies de Reynolds et Pathfinder-Erosion, présentées figure 9 pour le mois de février.

La comparaison sur le mois de février de la climatologie de Reynolds (figure 9a) et de la climatologie SAF Océan (figure 6) met en évidence l'information apportée par une résolution de 9 km : à un degré de résolution, les structures fines telles que les eaux froides des Bahamas sont invisibles.

Les trois climatologies ont des représentations différentes du Gulf Stream, ce qui provient de la différence de résolution spatiale (comparaison SAF Océan avec Reynolds) ou des techniques de remplissage différentes (comparaison SAF Océan avec Pathfinder-Erosion).

La figure 10 précise ces différences. Dans le golfe du Mexique, la climatologie SAF Océan met en évidence les eaux côtières froides liées aux apports fluviaux, phénomène très lissé par la climatologie de Reynolds. Ce lissage du gradient horizontal de TSM par la climatologie de Reynolds est responsable de l'alternance des biais négatif (sur le bord froid) et positif (sur le bord chaud) que l'on rencontre également plus à l'est le long du Gulf Stream. Dans la zone tropicale nord, la climatologie SAF Océan est plus froide que la climatologie de Reynolds, alors que dans la zone tempérée nord et la zone tropicale sud, le biais est positif ou nul. Cette distribution, également observée par Casey et Cornillon (1999), est attribuée par ces auteurs à un effet des aérosols particulièrement important entre 0 et 20 °N.

(1) Source NOAA [www.cdc.noaa.gov/ENSO/enso.mei_index.html].

(2) Source NSIDC

[http://sidads.colorado.edu/pub/DATASETS/SSMI/SEAICE/NASATEAM/AREA_EXTENT].

(3) Source NOAA [nic.fb4.noaa.gov/data/teledoc/nao.html].



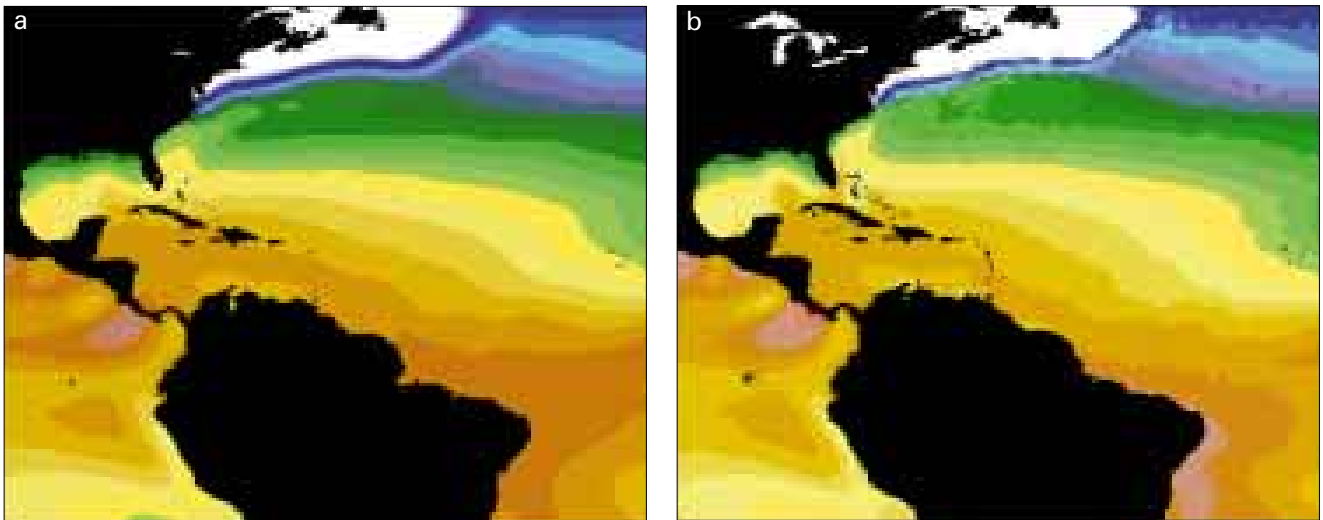


Figure 9 - Champs de TSM moyenne pour le mois de février. (a) Climatologie de Reynolds. (b) Climatologie Pathfinder-Erosion.

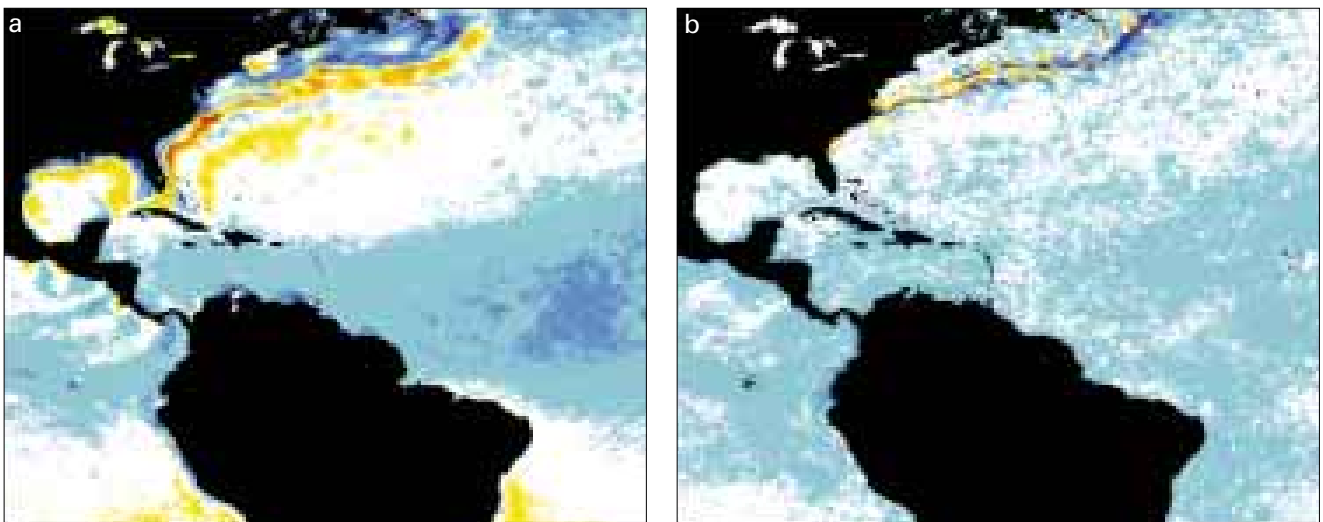
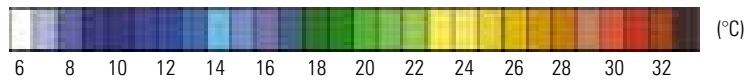
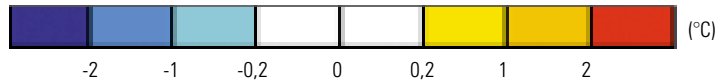


Figure 10 - Comparaison de la climatologie SAF Océan (TSM moyenne) avec les climatologies existantes pour le mois de février. (a) Carte de TSM SAF Océan – TSM Reynolds. (b) Carte de TSM SAF Océan – TSM Pathfinder-Erosion.



La climatologie SAF Océan est en général plus froide que la climatologie Pathfinder-Erosion d'une façon assez homogène, ce qui est cohérent avec le fait que cette dernière mélange des données de jour et de nuit. La zone du Gulf Stream se distingue sur la différence de la figure 10b par des valeurs élevées, mais localisées (de -2 °C à +2 °C), dues au fait que les méthodes de remplissage utilisées sont différentes.

La figure 11 permet de comparer plus globalement les valeurs moyennes des trois climatologies sur les deux hémisphères. La différence entre les climatologies SAF Océan et Pathfinder-Erosion devrait en principe refléter le fait que la première n'utilise que des données de nuit, alors que la seconde utilise des données de nuit comme de jour. En fait, le cycle observé dans l'hémisphère sud (figure 11d), présentant en valeur absolue une différence maximale en novembre et minimale en juillet, est effectivement représentatif du cycle saisonnier du réchauffement diurne. Dans l'hémisphère nord (figure 11c), la différence est plus constante, même si l'on peut distinguer un minimum de la différence en hiver (décembre et janvier). L'ordre de grandeur de cette différence (0,2 à 0,3 °C) est cohérent avec les valeurs moyennes de cycle diurne observées au Centre de météorologie spatiale sur les données de *Goes*.



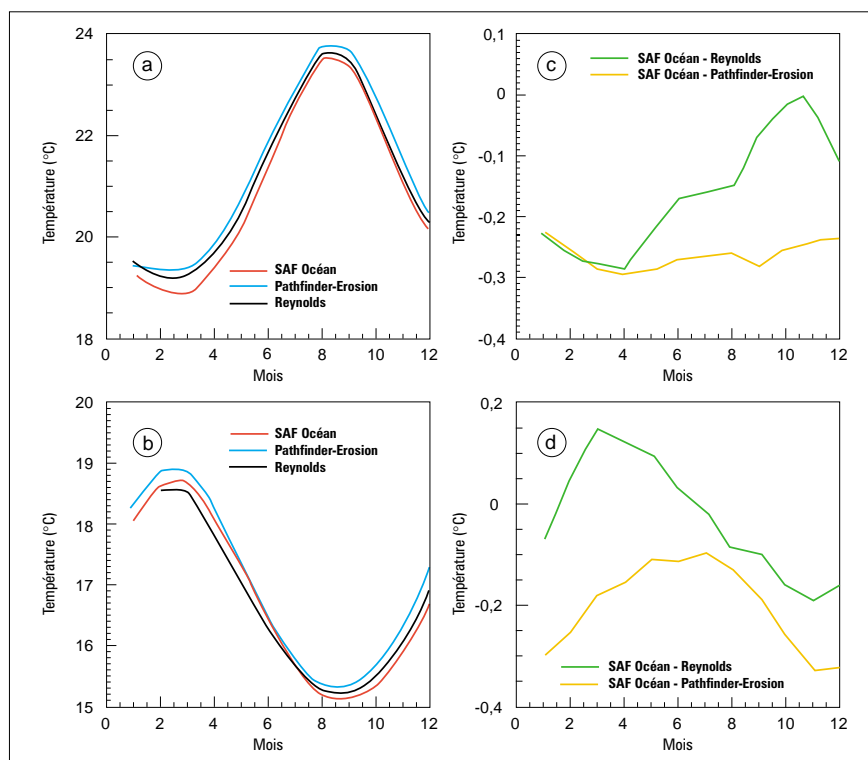
Figure 11 - Comparaison des valeurs moyennes sur les hémisphères nord et sud des champs climatologiques de TSM moyenne, en fonction du mois. Les calculs ont été effectués respectivement entre 0 et 60° N et entre 0 et 60° S.

(a) Comparaison des climatologies SAF Océan, Pathfinder-Erosion et Reynolds sur l'hémisphère nord.

(b) Comparaison des climatologies SAF Océan, Pathfinder-Erosion et Reynolds sur l'hémisphère sud.

(c) Écarts entre les climatologies SAF Océan et Pathfinder-Erosion et entre les climatologies SAF Océan et Reynolds sur l'hémisphère nord.

(d) Écarts entre les climatologies SAF Océan et Pathfinder-Erosion et entre les climatologies SAF Océan et Reynolds sur l'hémisphère sud.



Les cycles saisonniers de la différence entre les climatologies SAF Océan et Reynolds sont cohérents pour les deux hémisphères : les TSM SAF Océan sont relativement plus chaudes que les TSM Reynolds pour les mois chauds (octobre pour l'hémisphère nord, mars pour l'hémisphère sud) et plus froides pour les mois froids. La différence des périodes couvertes par les deux climatologies et la nature distincte des données utilisées complique néanmoins l'interprétation des différences. Le cycle observé est cependant compatible avec le fait que la climatologie de Reynolds, utilisant les températures *in situ* (bouées et bateaux) comme référence, est représentative de mesures effectuées plus profondément que les mesures satellitaires de SAF Océan.

Comparaison avec des données *in situ*

Casey et Cornillon (1999) ont confronté diverses climatologies à deux jeux de données *in situ*, le World Ocean Atlas de 1994 et le Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set (COADS), déjà mentionné. Le premier est constitué d'environ 88 millions de valeurs de TSM mesurées entre 1945 et 1994. Le deuxième est constitué d'environ 4 millions de valeurs de TSM mesurées entre 1900 et 1993. Après 1945, les TSM COADS sont majoritairement issues des thermistances placées sur les coques de navires volontaires et sont plus bruitées que les données World Ocean Atlas 1994.

Climatologie	Écart type	Biais moyen
SAF Océan mensuelle	1,64	-0,23
SAF Océan décadaire	1,70	-0,23
Pathfinder-Erosion mensuelle	1,59	-0,41
Pathfinder-Erosion pentadaire	1,61	-0,40

Tableau 2 – Comparaison des climatologies SAF Océan et Pathfinder-Erosion avec les données *in situ* du World Ocean Atlas de 1994. Écart type et biais moyen (en degrés Celsius).

Climatologie	Écart type	Biais moyen
SAF Océan mensuelle	1,65	0,12
SAF Océan décadaire	1,68	0,18
Pathfinder-Erosion mensuelle ^(*)	1,64	-0,07
Pathfinder-Erosion pentadaire	1,65	-0,09

Tableau 3 – Comparaison des climatologies SAF Océan et Pathfinder-Erosion avec les données *in situ* du COADS. Écart type et biais moyen (en degrés Celsius).

(*) Données de 1985 à 1995 seulement et sans lissage.

Casey et Cornillon ont calculé les différences (mesure *in situ* - donnée climatologique), où les données climatologiques sont interpolées linéairement pour le jour de la mesure ; puis, ils ont évalué l'écart type et le biais moyen de la distribution ainsi obtenue. Un biais n'implique pas forcément un défaut de performance, puisque la période couverte par les données *in situ* est beaucoup plus large que celle dont les climatologies sont issues. En revanche, l'écart type caractérise la qualité de la climatologie : le plus faible est obtenu par la climatologie Pathfinder-Erosion (Casey et Cornillon, 1999). À notre demande, Casey et Cornillon ont inclus la climatologie SAF Océan dans leur comparaison. Les tableaux 2 et 3 résument les résultats obtenus.

L'écart type très légèrement supérieur de la climatologie SAF Océan s'explique par le fait que les différences sont calculées avec des mesures *in situ* effectuées de jour comme de nuit. Le calcul devra être repris en sélectionnant uniquement les mesures effectuées de nuit. Ces premiers résultats donnent toutefois pour la climatologie SAF Océan des performances comparables à celles de la climatologie Pathfinder-Erosion.

Conclusion

Des champs climatologiques décennaires de température de surface de la mer moyenne, minimale et maximale à 9 km de résolution ont été élaborés à partir des données quotidiennes Pathfinder de nuit. Le manque de données dans les zones de nébulosité persistante nous a conduits à mettre en œuvre une méthode d'interpolation optimale, en utilisant la climatologie de Reynolds comme ébauche. Cette méthode, particulièrement adaptée au problème posé, donne des résultats cohérents.

Le choix de conserver dans la climatologie des valeurs obtenues avec uniquement deux données originales de TSM est un choix extrême, guidé par le souci de minimiser le temps de calcul consacré à l'interpolation optimale et de privilégier les observations, même rares, par rapport à des données interpolées.

La résolution spatiale adoptée permet de mettre en évidence des structures fines et des phénomènes locaux comme les upwellings côtiers, ce qui permettra d'améliorer la qualité des masques nuageux déduits de cette climatologie.

Nous avons pu confronter nos résultats à la climatologie de Reynolds et à ceux du projet parallèle Pathfinder-Erosion, qui utilise des données de jour et de nuit. Ces comparaisons méritent certainement des développements plus importants ; dans le cadre de cette étude, elles n'avaient pour but que de tester la fiabilité de notre climatologie. Les TSM SAF Océan, obtenues à partir des données de nuit uniquement, sont logiquement plus froides de 0,1 à 0,3 °C que les TSM de la climatologie Pathfinder-Erosion. Les méthodes distinctes utilisées pour le remplissage des zones de données manquantes donnent des résultats sensiblement différents dans les régions de nébulosité persistante comme la région du Gulf Stream. Les résultats des deux climatologies comparées aux données in situ sont toutefois très proches. L'ensemble des comparaisons menées nous a permis de constater la fiabilité de la climatologie SAF Océan, qui est en outre aujourd'hui la seule à proposer des températures minimales décennaires.

Dans l'avenir, il faudra mettre à jour cette climatologie, ce qui sera facilité par la disponibilité d'un plus grand nombre d'années de données Pathfinder, mises à jour régulièrement. Il sera alors possible d'éliminer les années exceptionnelles, comme l'année de l'éruption du Pinatubo par exemple, qui peuvent affecter la qualité des champs de température minimale.

Remerciements

Les données du programme Pathfinder de la NOAA et de la Nasa utilisées dans cette étude ont été obtenues au Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC) du Jet Propulsion Laboratory (États-Unis). Nous remercions également K. S. Casey et P. Cornillon qui ont accepté de comparer notre climatologie de températures moyennes aux données in situ du World Ocean Atlas de 1994 et de COADS.

Bibliographie

- **Casey K. S.** et **P. Cornillon**, 1999 : A comparison of satellite and in situ based sea surface temperature climatologies. *J. Climate*, 6, 1848-1863.
- **De Mey P.** et **Y. Ménard**, 1989 : Synoptic analysis and dynamical adjustment of Goes 3 and Seasat altimeter eddy fields in the northwest Atlantic. *J. Geophys. Res.*, 94, 6221-6231.
- **Derrien M.**, **B. Farki**, **L. Harang**, **H. Le Gléau**, **A. Noyalet**, **D. Pochic** et **A. Sairouni**, 1993 : Automatic cloud detection applied to NOAA-11/AVHRR imagery. *Remote Sens. Environ.*, 46, 246-267.
- **Evans R.** et **G. Podesta**, 1998 : AVHRR Pathfinder oceans sea surface temperature algorithm version 4.0. *Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science*, Université de Miami, États-Unis.
- **Miller L.**, **B. Cheney** et **J. Carton**, 1997 : NAO-related changes in sea surface topography and temperature in the North Atlantic during 1995-97. Recueil des actes du symposium international « Surveillance des océans à l'horizon 2000 : une approche intégrée », Biarritz, France, 15-17 octobre 1997.
- **Reynolds R.** et **T. Smith**, 1995 : A high-resolution global sea surface temperature climatology. *J. Climate*, 8, 1571-1583.
- **Vasquez J.**, **K. Perry** et **K. Kilpatrick**, 1998 : NOAA/NASA AVHRR ocean Pathfinder sea surface temperature data set user's reference manual version 4.0. JPL publication D-14070, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, États-Unis.