

LIENS ENTRE LA MÉTÉOROLOGIE ET L'ABONDANCE DE PHYTOPLANCTON DANS L'OCEAN
À PARTIR D'IMAGES SATELLITES

Par
Joan-Sébastien Morales

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Monsieur Yannick Huot

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Septembre 2014

SOMMAIRE

Mots clés : Phytoplancton, réchauffement climatique, images satellites, météorologie, Atlantique Nord, température, vent, chlorophylle

À l'instar de la végétation terrestre, l'ensemble des microorganismes marins qui effectuent la photosynthèse, le phytoplancton, est à la base de la chaîne alimentaire océanique et permet de séquestrer une partie du gaz carbonique de l'atmosphère. L'étude des impacts des changements climatiques sur le phytoplancton revêt donc toute son importance. L'apparition de satellites d'observation de la terre et des océans a permis une avancée majeure dans ce domaine de recherche.

Le présent essai a pour objectif de trouver des liens entre différents paramètres météorologiques (température, vent) et certaines caractéristiques du phytoplancton (quantité, début de la floraison). Les données de reconstruction climatique de températures et de vents sur plus de 18 000 points du globe de 2003 à 2013 ont été corrélées aux images du radiomètre spectral à résolution modérée embarqué sur le satellite Aqua qui permet de mesurer la concentration de phytoplancton.

Les diverses expérimentations ont démontré que les effets de la température et du vent sur le phytoplancton diffèrent d'une région à l'autre de l'Atlantique Nord. Au sud, le long du Tropique du Cancer, là où il y a une floraison seulement en hiver, les eaux plus chaudes ont tendance à diminuer la production du phytoplancton et à retarder la floraison. De plus, l'augmentation de la vitesse vent devance la floraison. Au centre, là où il y a une double floraison hivernale et printanière, le réchauffement de la température et l'augmentation de l'intensité du vent ne semblent pas avoir un impact important sur le cycle annuel du phytoplancton. Au nord, là où il y a une floraison unique au printemps, une hausse annuelle de la température a un impact positif sur la concentration de phytoplancton et devance la floraison. Par contre, une augmentation de l'intensité du vent retarde la floraison.

Les relations observées sont en phase avec les conclusions d'autres recherches dans ce domaine et peuvent être expliquées par les théories actuellement en vigueur sur les interactions entre le phytoplancton et son milieu. Les bases méthodologiques et théoriques développées dans le cadre du présent travail peuvent être réutilisées afin de poursuivre les recherches sur les effets des changements climatiques sur le phytoplancton.

REMERCIEMENTS

J'aimerais dans un premier temps remercier mon directeur d'essai, M. Yannick Huot, titulaire de la Chaire de recherche du Canada en observation de la Terre et écophysiologie du phytoplancton et directeur du centre d'applications et de recherches en télédétection du département de Géomatique appliquée de l'Université de Sherbrooke. Tout au long de mon travail, il a su me conseiller et me ramener sur la bonne voie lorsque je m'égarais dans les dédales de la recherche.

Merci à mes amis, Stéphane Baldo et Patrice Roy, à qui je dois (presque) tout ce que je connais des mathématiques et de l'informatique, et pour qui j'ai une profonde admiration devant leurs connaissances, leur vivacité d'esprit, leur engagement, mais surtout leur passion.

Merci à tous mes professeurs du Centre universitaire de formation en environnement et développement durable de l'Université de Sherbrooke. Toujours avec compétence et professionnalisme, ils m'ont permis de mieux connaître le monde dans lequel je vis et d'y poser un regard différent et critique. Même si le sujet était parfois déprimant (la gravité des problèmes environnementaux et sociétaux contemporains n'est pas un sujet des plus joyeux), leur optimisme contagieux était un baume réconfortant.

Merci à ma famille, Carmen, Washington, Sergio et Gabriel, qui, avec leur indéfectible confiance, m'ont encouragé et supporté dans cette aventure.

Merci à mon ami de toujours, Etienne, qui ne le sait pas encore, mais qui aura le privilège d'effectuer, et ce, dans la joie, la laborieuse révision linguistique du présent document.

Merci à Kim, qui, au prix de nombreux sacrifices, m'a toujours appuyé tout au long de mes études en environnement, même dans les moments plus difficiles.

Et finalement, merci à ma petite Lily, ma motivation première, celle pour qui je ne peux faire autrement que d'apporter ma modeste contribution au principal enjeu de notre génération. J'espère de tout mon cœur qu'elle pourra profiter pleinement des innombrables beautés que la nature nous offre.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 MISE EN CONTEXTE	3
1.1 La base de la chaîne alimentaire aquatique	3
1.2 Une pompe carbonique biologique	3
1.3 La floraison printanière	4
1.4 La détection du phytoplancton	4
1.5 Le phytoplancton et le climat	4
2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 Méthodologie	5
2.2 Cadre conceptuel	5
2.3 Quels sont les facteurs physiques, chimiques et biologiques qui influencent le phytoplancton?	6
2.4 Quelles sont les conditions qui déclenchent la floraison printanière et à quel moment débute cette floraison?	7
2.4.1 La théorie de la profondeur critique de Sverdrup	8
2.4.2 La théorie de dilution-recouplage de Behrenfeld	9
2.4.3 Les quatre types de floraison selon Toboada et Anadon	10
2.5 De quelles façons les conditions climatiques influencent-elles la floraison du phytoplancton?	11
2.5.1 L'effet de la température	12
2.5.2 L'effet du vent	13
2.5.3 L'effet d'El Niño	13
2.5.4 La composition de la floraison	14
2.5.5 L'Oscillation Nord-Atlantique	15
2.5.6 Tendances générales	16
2.6 Comment peut-on déterminer correctement la concentration du phytoplancton à l'aide d'images satellites?	17
2.6.1 Le ratio des intensités	19
2.6.2 La différence des intensités	19
2.6.3 Détection des différentes espèces de phytoplancton	20
2.6.4 L'analyse de la concentration de chlorophylle	21
2.6.5 Limitations	21
3 DESCRIPTION DES SOURCES DE DONNÉES	24
3.1 NCEP/NCAR	24
3.2 Aqua	24
3.3 MODIS	25
3.4 OC2 : des données brutes à la concentration de chlorophylle	26

4	MÉTHODOLOGIE	28
4.1	Les données météorologiques	28
4.2	Les données sur la concentration de chlorophylle	28
4.3	Le ré-échantillonnage	29
4.4	Le coefficient de corrélation	30
4.5	L'interpolation parabolique	30
4.6	Vitesse du vent	31
4.7	Outils informatiques et présentation des résultats	31
5	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	33
5.1	Influence de la température	33
5.1.1	Influence de la température sur la concentration moyenne annuelle de chlorophylle ...	33
5.1.2	Influence de la température sur la concentration mensuelle de chlorophylle	37
5.1.3	Influence de la température sur le moment de la floraison	39
5.2	Influence du vent	40
5.2.1	Influence du vent sur la concentration moyenne annuelle de chlorophylle	40
5.2.2	Influence du vent sur la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle	42
5.2.3	Influence du vent sur le moment de la floraison.....	44
5.3	Autres expérimentations	45
6	ANALYSE	47
6.1	Le sud de l'Atlantique Nord	47
6.2	Le centre de l'Atlantique Nord	48
6.3	Le nord de l'Atlantique Nord	48
	CONCLUSION	49
	RÉFÉRENCES	51
	ANNEXE 1 - BANDES SPECTRALES DE MODIS ET LEURS UTILISATIONS.....	54
	ANNEXE 2 - CONCENTRATION MOYENNE ANNUELLE DE CHLOROPHYLLE DE 2003 À 2013....	56
	ANNEXE 3 - TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE DE 2003 À 2013	57
	ANNEXE 4 - CORRÉLATION ENTRE LA TEMPÉRATURE MOYENNE MENSUELLE ET LA CONCENTRATION MOYENNE MENSUELLE DE CHLOROPHYLLE	58
	ANNEXE 5 - DU MAXIMUM DE CHLOROPHYLLE	59
	ANNEXE 6 - MOYENNE ANNUELLE DES VENTS	60
	ANNEXE 7 - CORRÉLATION ENTRE LA VITESSE MOYENNE MENSUELLE DU VENT ET LA CONCENTRATION MOYENNE MENSUELLE DE CHLOROPHYLLE	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Bandes spectrales utilisées par différents systèmes de détection des floraisons	20
---	----

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Cadre conceptuel de la revue de littérature.....	6
Figure 2.2 Illustration de la théorie de Sverdrup.....	8
Figure 2.3 Taux de croissance du phytoplancton et profondeur de la couche de mélange.....	9
Figure 2.4 Les quatre types de floraison	11
Figure 2.5 La production primaire et l'index MEI	14
Figure 2.6 Composition de la floraison	15
Figure 2.7 Index ONA et floraison du phytoplancton	16
Figure 2.8 Tendances générales de la floraison	17
Figure 2.9 Absorption de la lumière par la chlorophylle.....	18
Figure 3.1 Lien empirique entre la concentration de chlorophylle-a (C_a) et le ratio de luminance à 490 et 555 nm	26
Figure 5.1 Concentration moyenne de chlorophylle en 2013	33
Figure 5.2 Température moyenne en 2013.....	34
Figure 5.3 Corrélation entre la température annuelle moyenne et la concentration annuelle moyenne de phytoplancton	34
Figure 5.4 Variation de la température et de la chlorophylle (54,2 N 46,875 O).....	35
Figure 5.5 Corrélation entre la température et la chlorophylle (54,2 N 46,875 O)	36
Figure 5.6 Variation de la température et de la chlorophylle (31,422 N 71,25 O).....	36
Figure 5.7 Corrélation entre la température et la chlorophylle (31,422 N 71,25 O)	37
Figure 5.8 Corrélation entre la température moyenne du mois de mars et la concentration moyenne de chlorophylle au mois de mars	37
Figure 5.9 Corrélation entre la température moyenne du mois de mai et la concentration moyenne de chlorophylle au mois de mai	38
Figure 5.10 Corrélation entre la température moyenne du mois de septembre et la concentration moyenne de chlorophylle au mois de septembre	39
Figure 5.11 Mois du maximum de chlorophylle pour l'année 2013.....	39
Figure 5.12 Corrélation entre la température annuelle moyenne et le moment de la floraison	40
Figure 5.13 Moyenne annuelle du vent pour l'année 2013.....	41
Figure 5.14 Corrélation entre la vitesse du vent annuelle et la concentration annuelle de chlorophylle	41
Figure 5.15 Corrélation entre la vitesse moyenne mensuelle du vent en mars et la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle en mars	42
Figure 5.16 Moyenne de l'intensité du vent en mars	42

Figure 5.17	Corrélation entre la vitesse moyenne mensuelle du vent en mai et la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle en mai	43
Figure 5.18	Moyenne de l'intensité du vent en mai	43
Figure 5.19	Corrélation entre la vitesse moyenne mensuelle du vent en août et la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle en août	44
Figure 5.20	Moyenne de l'intensité du vent en août	44
Figure 5.21	Corrélation entre l'intensité annuelle du vent et le moment de la floraison.....	45

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

AIRS	<i>Atmospheric Infrared Sounder</i>
AMSR-E	<i>Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS</i>
AMSU-A	<i>Advanced Microwave Sounding Unit</i>
BITMAP	Tableau de bits
CERES	<i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i>
Chl _{sat}	Concentration de chlorophylle de surface
CIA	<i>Color Index Algorithm</i>
CO ₂	Dioxyde de carbone
C _{phyt}	Concentration de carbone du phytoplancton
CZCS	<i>Costal Zone Color Scanner</i>
ENSO	<i>El Nino Southern Oscillation cycle</i>
EOS	Mission internationale d'observation de la Terre
ESRL	<i>Earth System Research Laboratory</i>
<i>f</i>	Taux de perte de la biomasse par la dilution (<i>flush</i>)
FAI	<i>Floating Algae Index</i>
FLH	<i>Fluorescence Line Height</i>
<i>g</i>	Taux de destruction de la biomasse par les prédateurs (<i>grazing</i>)
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GOCI	<i>Geostationary Ocean Color Imager</i>
HAB-OFS	<i>Harmful Algal Bloom Operational Forecast System</i>
HDF	<i>Hierarchical Data Format</i>
HSB	<i>Humidity Sounder for Brazil</i>
KBBI	<i>Karenia Brevis Bloom Index</i>
<i>I</i>	Taux total de destruction de la biomasse du phytoplancton
MCI	<i>Maximum Chlorophyll Index</i>
MEI	<i>Multivariate ENSO Index</i>
MLD	<i>Mixed Layer Depth</i>
MERIS	<i>Medium Resolution Imaging Spectrometer</i>

MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NetCDF	<i>Network Common Data Form</i>
nm	Nanomètres
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NOMAD	<i>NASA bio-Optical Marine Algorithm Dataset</i>
NPP	<i>Net Primary Production</i>
OC2	<i>Ocean Color Chlorophyll 2 bandes</i>
ONA	Index d'Oscillation Nord-Atlantique
p	Taux de destruction de la biomasse par le parasitisme
r	Taux de croissance de la biomasse du phytoplancton ($r=u-l-u-g-s-p-f$)
RBD	<i>Red Band Difference</i>
RCA	<i>Red tide index Chlorophyll Algorithm</i>
RI	<i>Red tide Index</i>
s	Taux de perte de la biomasse par dépôt au fond (<i>sinking</i>)
SeaWiFS	<i>Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor</i>
SST	<i>Sea Surface Temperature</i>
u	Taux de production primaire de biomasse de phytoplancton
UCAR	<i>University Corporation for Atmospheric Research</i>
Z_{eu}	Profondeur de la zone euphotique

LEXIQUE

Coccolites	Plaque calcaire enveloppant les coccolithophores (Larousse, 2014).
Euphotique	Zone superficielle d'un océan où d'un lac qui reçoit suffisamment de lumière pour que la photosynthèse puisse avoir lieu (Larousse, 2014).
Eutrophe	Plan d'eau enrichie en matières organiques et pauvre en oxygène (Larousse, 2014).
Gyre océanique	Gigantesque tourbillon d'eau océanique formé d'un ensemble de courants marins.
Hétérotrophes	Organisme qui utilise pour se nourrir les matières organiques constituant ou ayant constitué d'autres organismes (Larousse, 2014).
Oligotrophe	Milieu pauvre en nutriments (Larousse, 2014).
Photoautotrophe	Organisme qui utilise la lumière comme source d'énergie et le gaz carbonique comme source de carbone.

INTRODUCTION

Au printemps, dans l'Atlantique Nord, les journées plus longues et plus chaudes et les vents plus faibles favorisent la création d'une couche d'eau plus chaude à la surface de l'eau. Avec la lumière, la chaleur et les nutriments, la quantité de phytoplancton augmente rapidement. C'est la floraison printanière de ces algues unicellulaires qui sont à la base de la chaîne alimentaire de tous les organismes vivants de l'océan. Les caractéristiques de cette floraison (la date de début, sa durée et sa magnitude) ont un impact important sur le développement du zooplancton, les stocks de poissons et sur la quantité de carbone atmosphérique absorbée par l'océan.

L'influence de l'homme sur le climat planétaire est sans équivoque. Selon le cinquième rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) publié le 26 septembre 2013 (GIEC, 2103), la concentration de CO₂ (dioxyde de carbone) dans l'atmosphère a augmenté de 40 % depuis l'époque préindustrielle. À la fin du XXI^e siècle, la température moyenne à la surface de la Terre sera probablement de 1,5 °C supérieure à l'époque allant de 1850 à 1900. L'océan est le système planétaire le plus affecté par le réchauffement climatique. Il a absorbé 30 % des émissions anthropiques et 90 % de l'augmentation de la quantité d'énergie accumulée entre 1971 et 2010. Cela entraîne un réchauffement et une acidification des eaux et une augmentation du niveau moyen des océans (GIEC, 2103).

L'élargissement des connaissances des effets des changements climatiques sur les écosystèmes permet de mieux prendre conscience de la gravité de la situation. Le développement de métriques objectives, qui sont appelées des indicateurs écologiques, permettent d'orienter les prises de décisions en matière de gestion des écosystèmes (Zhai et autres, 2013). Par exemple, l'analyse des images satellites permettent de gérer les écosystèmes côtiers incluant les pêches et la détection de marées rouges (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

L'objectif principal de cet essai consiste à mettre en rapport les événements climatiques et les caractéristiques de la floraison du phytoplancton au printemps dans l'Atlantique Nord en utilisant les données de reconstruction climatique et les données satellites. Pour ce faire, il faudra : extraire les données de reconstruction climatique NCEP (National Centers for Environmental Prediction) et NCAR (National Center for Atmospheric Research), extraire les données sur la concentration de phytoplancton à partir des images du capteur MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) du satellite Aqua, modifier les données de façon à obtenir une base spatiale et temporelle commune comparable et établir des relations empiriques entre les paramètres météorologiques et les concentrations de phytoplancton.

Cet essai se divise en six chapitres. Le premier chapitre met en contexte le sujet à l'étude et précise les relations entre le phytoplancton et les écosystèmes marins et terrestres. Au chapitre suivant, une revue de littérature résume les hypothèses actuelles permettant d'expliquer les caractéristiques de la floraison printanière du phytoplancton en fonction des conditions climatiques. Le chapitre trois présente le satellite et le capteur utilisés ainsi qu'une description de la structure des données. La

description de la méthodologie — les processus et outils utilisés pour mener à bien les expérimentations, les méthodes utilisées pour modifier les données afin qu'elles soient compatibles entre elles et adaptées aux expérimentations, les équations mathématiques et algorithmes utilisés — constitue l'essentiel du chapitre quatre. Le chapitre cinq, le cœur de l'essai, présentera les résultats des expérimentations effectuées. Finalement, au dernier chapitre, l'analyse des résultats permettra de relier les relations observées aux hypothèses actuellement en vigueur.

1 MISE EN CONTEXTE

Le phytoplancton est l'ensemble des microorganismes unicellulaires marins, flottant librement dans les eaux de surface, qui peuvent effectuer de la photosynthèse. À l'instar des végétaux terrestres, le phytoplancton est photoautotrophe et contient de la chlorophylle. Il synthétise du carbone organique et libère l'oxygène à partir du CO₂, de l'eau et de la lumière. Il a une capacité de déplacement limitée et dérive au gré des courants au large des côtes et dans les océans. Il est composé de nombreuses espèces eucaryotes et procaryotes. Plus de 5 000 espèces ont été répertoriées et leur taille varie typiquement entre 1 µm et 100 µm (Blondeau-Patissier et autres, 2013). Les groupes les plus communs sont les diatomées, les dinoflagellés, les coccolithophores et les cyanobactéries. Les diatomées possèdent une fine coquille de verre. Lorsque les conditions sont favorables, sa population croît très rapidement. Les dinoflagellés ont deux flagelles qui leur permettent de se déplacer verticalement vers la lumière ou les nutriments. Les coccolithophores ont de petites plaques calcaires à leur surface. Lorsqu'ils meurent, le calcaire coule vers le fond des océans (Lindsey et Scott, 2010). Les cyanobactéries, aussi connus sous le nom d'algues bleu-vert, sont une des formes de vie les plus anciennes de la Terre. Il y a 2,4 milliards d'années, ces bactéries ont modifié l'atmosphère terrestre en y injectant suffisamment d'oxygène moléculaire pour que les organismes aérobiques, comme nous, puissent évoluer (Townsend, 2012).

1.1 La base de la chaîne alimentaire aquatique

La production de biomasse par le phytoplancton (20 milliards de tonnes de carbone organique par année, presque autant que la production terrestre) est à la base de la chaîne alimentaire aquatique. Le phytoplancton est assimilé par les animaux herbivores microscopiques, le zooplancton, qui sert à son tour de nourriture aux petits poissons, et ainsi de suite jusqu'aux oiseaux et aux baleines. (Townsend, 2012). L'énergie permettant aux niveaux trophiques supérieurs de vivre provient de la capacité du phytoplancton à absorber la lumière solaire et à la transformer en énergie chimique.

1.2 Une pompe carbonique biologique

Le phytoplancton consomme annuellement une quantité de gaz carbonique équivalente approximativement à toute la végétation terrestre (Christopher et autres, 1998). Il est responsable de la plus grande part du CO₂ incorporé dans les océans. Dix gigatonnes de carbone est ainsi séquestré chaque année par cette pompe biologique carbonique. Un léger changement dans la croissance du phytoplancton peut donc avoir un impact sur la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère et par le fait même, sur le climat terrestre. (Lindsey et Scott, 2010)

1.3 La floraison printanière

La croissance du phytoplancton dépend de la disponibilité du CO₂, de la lumière et de nutriments. Généralement, le phytoplancton a besoin de nitrate, de phosphate, de silicate et de fer pour se développer, mais la quantité et les types de nutriments nécessaires varient selon les groupes. La température et la salinité de l'eau, la profondeur et la présence de prédateurs sont autant de facteurs qui peuvent influencer sa croissance. Lorsque les conditions sont réunies, le phytoplancton peut croître de façon exponentielle. Au printemps, dans les hautes latitudes, l'intensité de la radiation solaire augmente, le brassage hivernal diminue, l'eau se stratifie et la profondeur de la couche de mélange diminue. La couche de mélange est la partie supérieure de l'océan qui est constamment alimentée en énergie par les vagues et le soleil. Selon l'hypothèse de Sverdrup, lorsque la profondeur de la couche de mélange est en deçà d'un seuil minimal critique, la concentration de phytoplancton explose : c'est la floraison printanière (Sverdrup, 1955). Le phénomène est facilement repérable sur les images satellitaires. Il peut couvrir des centaines de kilomètres carrés et peut durer plusieurs semaines, quoique chaque individu vive rarement plus de quelques jours (Lindsey et Scott, 2010).

1.4 La détection du phytoplancton

Des échantillons peuvent être prélevés à partir de stations fixes ou de navires. Par contre, afin d'étudier les caractéristiques du phytoplancton à grande échelle, les images satellites sont indispensables. Les pigments du phytoplancton, comme la chlorophylle, modifient la façon dont l'eau diffuse la lumière. Plus le phytoplancton est abondant, moins il y aura de lumière bleue qui ressortira de l'eau et plus il y aura de lumière verte. La couleur de l'eau passe ainsi du bleu au vert avec l'augmentation de la biomasse. En analysant la couleur de l'océan, on peut donc estimer la concentration de chlorophylle et la biomasse du phytoplancton (Lindsey et Scott, 2010).

1.5 Le phytoplancton et le climat

Le vent joue un rôle important dans la distribution spatiale du phytoplancton car il amène l'eau de surface à diverger ou à converger et influence le taux d'ascension des nutriments à la surface. Il est donc plus abondant aux endroits où l'eau remonte, tels qu'à l'équateur et du côté ouest de plusieurs continents. Cette distribution varie aussi selon les saisons. Il est plus abondant dans les hautes latitudes au printemps là où la lumière augmente et les vents diminuent. D'une année à l'autre, l'oscillation australe El Niño est le principal facteur qui influence la productivité du phytoplancton dans l'océan Pacifique et même au-delà. Sous la pression des changements climatiques, certains modèles indiquent une diminution de la productivité du phytoplancton et des modifications dans sa composition. Les variétés plus grosses, comme les diatomées nécessitant davantage de nutriments, sont davantage affectées. Un changement dans l'abondance relative des différentes variétés pourrait avoir une cascade d'impacts négatifs sur la chaîne alimentaire (Lindsey et Scott, 2010).

2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Méthodologie

Afin de présenter une revue de littérature concise et cohérente, un cadre conceptuel a été défini. Ce cadre permet de discerner les différents systèmes à l'étude et leurs interrelations. Dans le but de circonscrire les recherches, la revue de littérature s'articule autour de quatre questions importantes :

1. Quels sont les facteurs physiques, chimiques et biologiques qui influencent le phytoplancton?
2. Quelles sont les conditions qui déclenchent la floraison printanière et à quel moment débute cette floraison?
3. De quelles façons les conditions climatiques influencent-elles la floraison du phytoplancton?
4. Comment peut-on déterminer correctement la concentration du phytoplancton à l'aide d'images satellitaires?

Les trois premières questions découlent naturellement du cadre conceptuel, tandis que la quatrième permettra de mener à bien les expérimentations. La revue de littérature apportera des réponses à ces questions. Les articles étudiés proviennent principalement du Service des bibliothèques et archives de l'Université de Sherbrooke, du moteur de recherche Google Scholar et de la base de données en ligne Science Direct. Seuls les articles souvent cités et permettant d'apporter au minimum un nouvel élément de réponse ont été retenus. Les articles récents ont été privilégiés, mais les articles plus anciens constituant des avancées majeures et toujours pertinents n'ont pas été négligés. Puisqu'il s'agit d'établir l'état actuel des connaissances et non l'historique de la recherche dans ce domaine, les hypothèses largement réfutées ont été passées sous silence.

2.2 Cadre conceptuel

L'atmosphère influence les conditions physiques, chimiques et biologiques de l'eau. Ces facteurs sont interdépendants. Par exemple, la température de l'eau influence la quantité de CO₂ dissout. Les paramètres permettant de décrire le phytoplancton, tels que sa concentration, sa composition ainsi que sa distribution spatiale, sont influencés par son milieu. Par exemple, le phytoplancton est affecté par la quantité de lumière, la quantité de nutriments et la présence de prédateurs. En rétroaction, le phytoplancton a aussi un impact sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'eau et les océans ont un impact majeur sur les conditions atmosphériques. Au final, les conditions atmosphériques ont donc une incidence sur les caractéristiques du phytoplancton. Le cadre conceptuel utilisé pour orienter la revue de littérature est illustré à la figure 2.1.

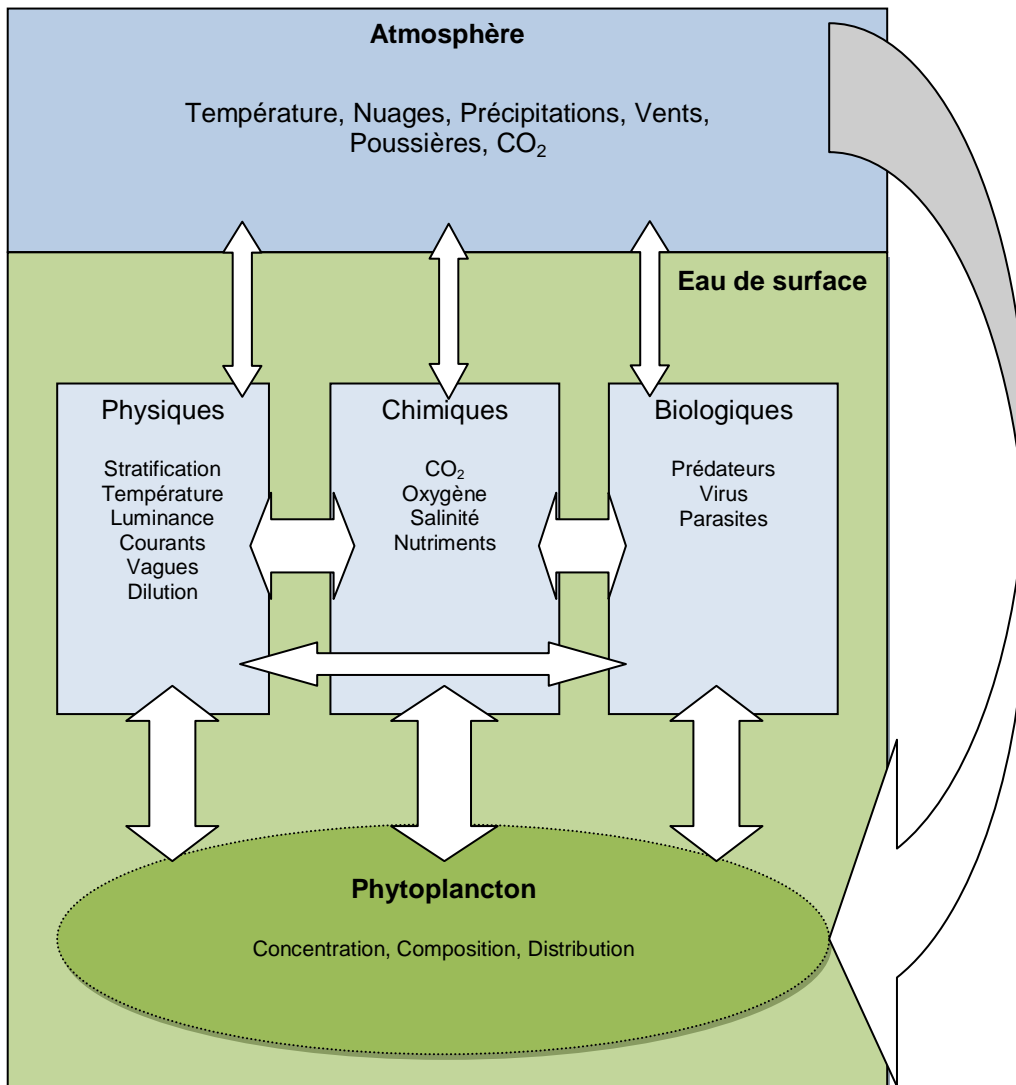


Figure 2.1 Cadre conceptuel de la revue de littérature

2.3 Quels sont les facteurs physiques, chimiques et biologiques qui influencent le phytoplancton?

Les plantes sont principalement dépendantes de la lumière et des nutriments. Un apport net de nutriments dans une zone avec beaucoup de lumière est nécessaire pour maintenir une bonne productivité (Sverdrup, 1955). La quantité de lumière est influencée par la saison, la latitude, la couverture nuageuse et les propriétés optiques de l'eau, incluant l'ombre que le phytoplancton se fait à lui-même (Winder et Sommer, 2012).

Les observations démontrent que les couches supérieures de l'océan sont généralement plus pauvres en phosphates et en nitrates que les couches inférieures. Ces nutriments sont consommés par le phytoplancton dans les couches supérieures et relâchés lors de la décomposition des organismes dans les couches inférieures (Sverdrup, 1955). Les eaux profondes sont ainsi riches en nutriments.

En surface, les nutriments proviennent majoritairement des remontées d'eau profondes mais aussi des poussières des déserts qui se déposent sur l'eau et, dans les eaux côtières, des pluies qui emportent les nutriments de la terre vers les océans. La concentration de phytoplancton répond principalement au taux de remontée d'eaux profondes et est donc plus grande à l'équateur, dans les latitudes tempérées et polaires, et le long des côtes ouest des continents (Doney, 2006).

La dynamique du phytoplancton est liée aux caractéristiques des provinces océaniques. Longhurst a été le premier en 1995 à proposer une classification des provinces océaniques basée sur la variabilité spatiale des propriétés physiques. À l'exception du biome équatorial, la distribution spatiale et la variabilité de la concentration de chlorophylle peuvent être classifiées selon les mêmes provinces océaniques que celles proposées par Longhurst (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

La composition du phytoplancton est différente selon la saison. Les phytoplanctons plus petits et flagellés qui coulent moins facilement sont davantage présents l'hiver tandis que les diatomées qui coulent rapidement sont davantage présents lors de la floraison (Behrenfeld, 2010). De plus, les diatomées dominent dans des eaux turbulentes et riches en nutriments tandis que les dinoflagellés sont davantage associés aux eaux stratifiées et moins riches en nutriments (Zhai et autres, 2013). La productivité varie d'une espèce de phytoplancton à l'autre.

La température de la surface de l'eau (SST) accélère la vitesse des processus physiologiques et écologiques, augmente la stratification horizontale et l'exposition à la lumière, mais réduit la disponibilité des nutriments (Taboada et Anadon, 2013).

Les relations entre le phytoplancton et les composantes physiques, chimiques et biologiques de son environnement ne sont pas triviales. C'est pourquoi, dès 1955, Sverdrup insiste sur le fait que l'océanographie est une science multidisciplinaire et que l'interdépendance et la complexité des systèmes en cause appellent à la coopération des spécialistes (Sverdrup, 1955).

2.4 Quelles sont les conditions qui déclenchent la floraison printanière et à quel moment débute cette floraison?

La définition de la présence d'une floraison (son début, son intensité, etc.) varie selon les paramètres (biomasse totale, concentration, une ou plusieurs espèces, etc.) et les critères utilisés (maxima, dépassement d'un seuil, accélération maximale, etc.). Pour notre étude, on peut définir une floraison comme étant un événement biologique composé de phytoplanctons qui est maintenu dans le temps et dans l'espace, dont l'augmentation de biomasse par rapport aux eaux voisines est détectable par les satellites. La température de la surface de l'océan (SST) est souvent utilisée avec la concentration de chlorophylle pour relier la floraison à la profondeur de la couche de mélange et aux zones de remontées de courants. (Blondeau-Patissier et autres, 2013)

2.4.1 La théorie de la profondeur critique de Sverdrup

Le brassage hivernal crée une couche profonde où les nutriments sont uniformément répartis. La production de biomasse (et par le fait même la captation de CO_2) par la photosynthèse s'effectue surtout le jour au niveau de la surface, là où il y a de la lumière, tandis que la perte du phytoplancton s'effectue jour et nuit à tous les niveaux (Sverdrup, 1955). Ce qui implique qu'il existe une profondeur critique où la lumière est suffisante pour permettre à la production de surpasser les pertes (Sverdrup, 1955). Cette profondeur critique augmente au printemps lorsque l'éclairement solaire augmente mais de façon irrégulière en fonction de la couverture nuageuse (Sverdrup, 1955). Le réchauffement et la réduction des vents stabilisent et réduisent la profondeur de la couche de mélange. La production (u) augmente alors que la destruction (l) reste stable. Lorsque la profondeur est moindre que la profondeur critique, c'est la floraison! C'est la théorie de la profondeur critique de Sverdrup (Sverdrup, 1955).

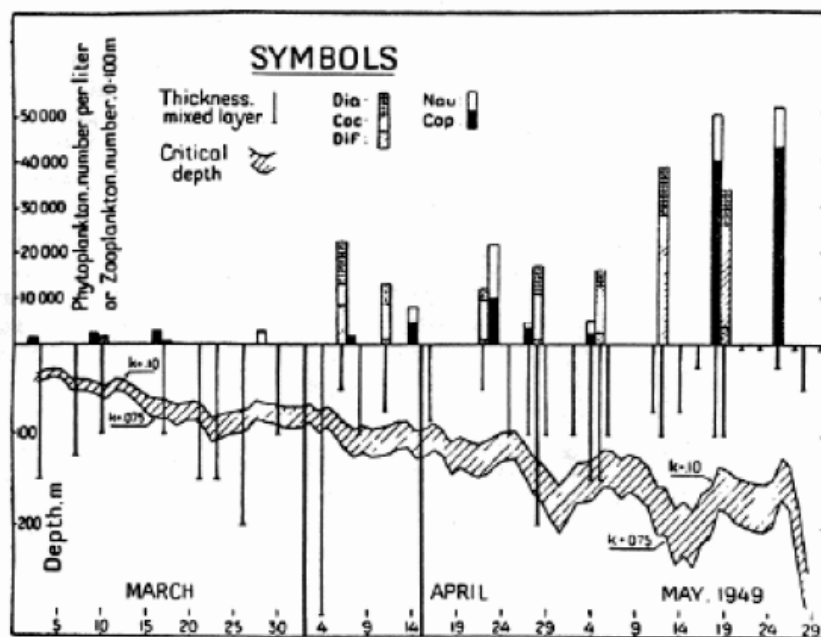


Figure 2.2 Illustration de la théorie de Sverdrup (tiré de Sverdrup, 1955, p. 290)

La partie du bas de la figure 2.2 présente la profondeur de la couche de mélange (les lignes verticales, en mètres) ainsi que le calcul de la profondeur critique (la bande grise, en mètres). La partie du haut illustre la quantité de phytoplancton par litre pour plusieurs espèces : diatomées (dia), coccolithophores (coc), dinoflagellés (dif), Nauplif (Nau) et copépodes (cop). On remarque que lorsque la profondeur de la couche de mélange est moindre que la profondeur critique (au début d'avril), il y a une augmentation rapide de la quantité de phytoplancton.

2.4.2 La théorie de dilution-recouplage de Behrenfeld

Behrenfeld précise que le taux de destruction (l) n'est pas indépendant de la production (u) et qu'il contient plus que la respiration. Il contient aussi la perte par les prédateurs (g), la perte par dépôt au fond (s), l'infection virale et le parasitisme (p), et la dilution (\hat{h}). Grâce aux satellites, absents à l'époque de Sverdrup, plusieurs floraisons printanières ont été observées même en l'absence d'une stratification de l'eau, invalidant ainsi la théorie de Sverdrup (Behrenfeld, 2010). Behrenfeld démontre qu'effectivement, les plus grandes augmentations de concentration coïncident avec la diminution de la profondeur de la couche de mélange, mais ce qui n'implique pas nécessairement que c'est la première fois que le taux de croissance ($r=u-l$) est positif. La concentration de phytoplancton commence à augmenter au milieu de l'hiver et non au printemps alors que la couche de mélange atteint sa profondeur maximale (Behrenfeld, 2010).

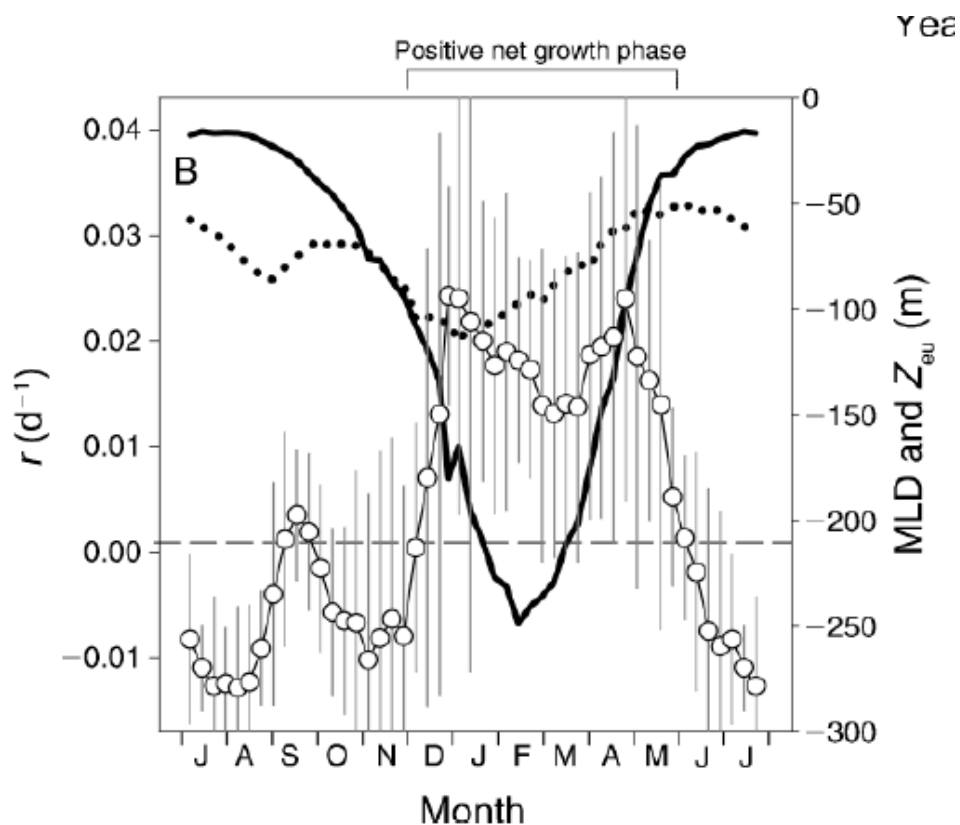


Figure 2.3 Taux de croissance du phytoplancton et profondeur de la couche de mélange (tiré de Behrenfeld, 2010, p. 983)

La figure 2.3 illustre le taux de croissance du phytoplancton (r , les cercles vides et l'axe de gauche), la profondeur de la couche de mélange (MLD, la ligne pleine et l'axe de droite) ainsi que la profondeur de la zone euphotique (Z_{eu} , la ligne pointillée et l'axe de droite). Behrenfeld démontre aussi que le moment où le taux de croissance (r) est positif ne correspond ni à l'augmentation de l'éclairement ni à la diminution de la profondeur de la couche de mélange. Il peut survenir aussi tôt que 45 jours avant le solstice d'hiver. De plus, la croissance maximale n'est pas toujours unique, pas toujours au printemps et pas toujours facilement identifiable. Par contre, de façon générale, on observe une

floraison à l'automne, un ralentissement de la croissance, puis une deuxième floraison au printemps (Behrenfeld, 2010).

Il montre aussi que la croissance n'est pas due à une augmentation de la production primaire (u) mais plutôt à une diminution des pertes (l), surtout par les prédateurs (g). Il explique ce phénomène par le fait que la dilution provoquée par la croissance de la couche de mélange diminue les chances des prédateurs de rencontrer leurs proies. La floraison se termine lorsque les nutriments viennent à manquer et qu'il s'établit un équilibre entre les proies et les prédateurs (Behrenfeld, 2010).

À l'automne, la couche de mélange devient de plus en plus profonde, diluant ainsi la concentration de phytoplancton, découplant les prédateurs et leurs proies qui ont moins de chances de se rencontrer. La biomasse augmente, mais non la concentration puisque le volume augmente aussi. Lorsque la profondeur de la couche de mélange se stabilise, le volume n'augmente plus, la concentration recommence donc à augmenter. Lorsque la stratification débute, l'augmentation de la luminosité permet au phytoplancton de croître et cette croissance dépasse les pertes dues au recouplage des proies-prédateurs. On assiste donc à une floraison en deux phases et ce scénario ne requiert pas nécessairement une stratification pour provoquer une floraison. C'est la théorie de dilution-recouplage de Behrenfeld (Behrenfeld 2010).

2.4.3 Les quatre types de floraison selon Tobaada et Anadon

Tobaada et Anadon définissent le début de la floraison comme étant le moment où l'augmentation de la concentration est maximale (contrairement à Sverdrup qui le définit comme étant le moment où l'augmentation est positive) et la magnitude est définie comme étant la concentration maximale lors de la floraison. Il y a quatre scénarios possibles (voir figure 2.4) : une floraison printanière seulement dans l'Atlantique Nord, une floraison hivernale et printanière plus au sud, une floraison hivernale seulement au niveau du Tropique du Cancer et aucune floraison détectable en Arctique et à l'ouest du continent africain (Tobaada et Anadon, 2013).

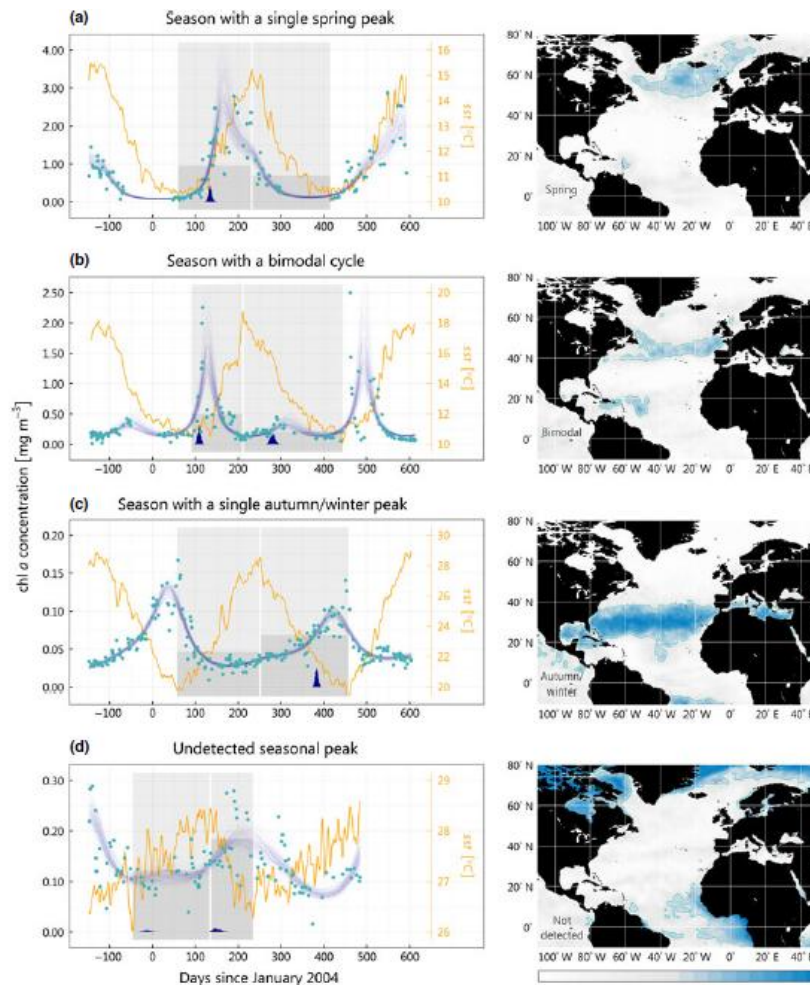


Figure 2.4 Les quatre types de floraison (tiré de Tobaada et Anadon, 2013, p. 702)

Les graphiques de gauche schématisent la méthode employée afin de détecter les quatre différents types de floraison. Les observations de concentrations de chlorophylle-a (en mg/m^3) sont illustrées par des points verts tandis que les lignes bleues représentent des résultats de simulations antérieures. Les sections en gris foncé indiquent les moments où la concentration de chlorophylle-a dépasse un seuil critique permettant de détecter le début d'une floraison. Les saisons sont déterminées à l'aide de la température de l'eau (la ligne orange en degrés Celsius) et sont mises en relief par les sections en gris clair. Les cartes de droite montrent les endroits où chacune des floraisons a la plus grande probabilité de se produire.

2.5 De quelles façons les conditions climatiques influencent-elles la floraison du phytoplancton?

Le climat affecte directement le milieu physique du phytoplancton, la stratification, les nutriments, la lumière et ses prédateurs. Cela peut modifier le début de la floraison, son intensité et favoriser les espèces mieux adaptées aux conditions changeantes (Winder et Sommer, 2012).

2.5.1 L'effet de la température

Selon la théorie de Sverdrup, un printemps plus chaud favoriserait la stratification et donc une floraison printanière plus abondante. Par ailleurs, selon la théorie de Behrenfeld, un hiver plus chaud limiterait l'effet de dilution et donc la concentration du phytoplancton (Behrenfeld, 2010).

Des simulations suggèrent que l'augmentation de la température stimule le métabolisme du phytoplancton et augmente la production de ce dernier, mais seulement dans le cas où elle n'est pas limitée par le manque de lumière ou de nutriments. Par contre, le métabolisme de ses prédateurs hétérotrophes est davantage sensible à une hausse des températures. Conséquemment, le réchauffement de l'eau augmente la perte davantage que la production (Winder et Sommer, 2012).

Une plus grande stratification réduit l'apport de nutriments par les couches inférieures, favorise les espèces de phytoplancton plus petites et plus actives, comme les cyanobactéries, et appauvrit les couches inférieures en oxygène. Le phytoplancton plus petit est avantage dans un environnement pauvre en nutriments car il échange plus rapidement avec son environnement (plus de surface pour moins de volume) et se divise plus rapidement (Winder et Sommer, 2012). Sur une échelle de temps géologique, la taille et la diversité du phytoplancton diminue avec une plus grande stratification des océans associée à une augmentation des températures (Winder et Sommer, 2012). La prédominance du pico-phytoplancton augmente avec la température et sa taille moyenne diminue (Winder et Sommer, 2012).

Les floraisons côtières sont principalement dues à des apports terrestres, alors que les floraisons dans les eaux libres sont causées par la remontée des nutriments (Blondeau-Patissier et autres, 2013). Les vents parallèles à la terre mènent à des remontées d'eaux profondes. De plus, la fonte des glaciers apporte localement des nutriments (Winder et Sommer, 2012).

Le réchauffement climatique devance la floraison printanière et cela est principalement dû à une plus grande pression des prédateurs, mais toutes les espèces ne sont pas affectées de la même façon. La performance de chaque espèce est directement liée à la stratification puisque celle-ci détermine sa position par rapport aux nutriments et à la lumière (Winder et Sommer, 2012).

L'effet du réchauffement climatique a différentes conséquences en fonction de l'écosystème (lac, côte, océan), du site, des ressources et de sa composition. Une désynchronisation des moments où le phytoplancton est abondant et du moment où les prédateurs ont besoin de nourriture peut avoir de grandes répercussions sur les niveaux trophiques supérieurs (Winder et Sommer, 2012).

Dans les basses latitudes, la croissance du phytoplancton est limitée par les nutriments et le réchauffement climatique accentue la stratification ce qui freine l'apport de nutriments. Depuis 1999, on observe une diminution de la production inversement proportionnelle au réchauffement climatique. Dans les hautes latitudes, la croissance du phytoplancton est limitée par la luminosité. Une augmentation de la température provoquerait donc une meilleure stratification et par le fait même, une

augmentation de la production. Même s'il y a certaines augmentations locales, aucune relation globale n'a été observée (Behrenfeld et autres, 2006).

Un réchauffement augmenterait la stratification dans les hautes latitudes, les précipitations et la fonte des glaciers, ce qui augmenterait la productivité, tandis que celle-ci diminuerait dans les basses latitudes. Il y aurait donc une migration des écosystèmes marins vers les pôles (Doney, 2006).

2.5.2 L'effet du vent

Le début de la floraison printanière, défini comme étant le moment où la concentration dépasse de 5 % la médiane annuelle, est retardé si les vents hivernaux (janvier à mars) sont forts et si l'apport d'énergie hivernal (janvier à mars) est moindre (Henson et autres, 2006). Si la floraison est retardée, elle est aussi de moindre importance, car elle a manqué sa fenêtre d'opportunité (Henson et autres, 2006). L'augmentation du nombre de jours de tempête (jours où le vent est de force 8 et plus) diminue la concentration maximale du phytoplancton (Henson et autres, 2006). Une couche hivernale plus profonde mène à une floraison tardive et de moindre importance (Henson et autres, 2006). Une floraison plus tardive permet aux prédateurs de se reproduire davantage (Henson et autres, 2006).

2.5.3 L'effet d'El Niño

La pression, les vents, la température de l'eau et de l'air, et la couverture nuageuse ont été combinés dans l'index MEI (Multivariate ENSO Index) afin de mesurer l'effet de l'oscillation australe, aussi nommée ENSO (El Niño Southern Oscillation cycle), sur la production du phytoplancton. Le MEI ne fait pas de distinction entre le réchauffement naturel et le réchauffement anthropogénique. Le NPP (Net Primary Production) a été calculé en utilisant des images satellites et il mesure la production de carbone par le phytoplancton (Tg de carbone par mois). De 1997 à 2006, dans les océans où la stratification est permanente (basses latitudes), une corrélation du premier ordre est observée entre le NPP et le MEI (Behrenfeld et autres, 2006).

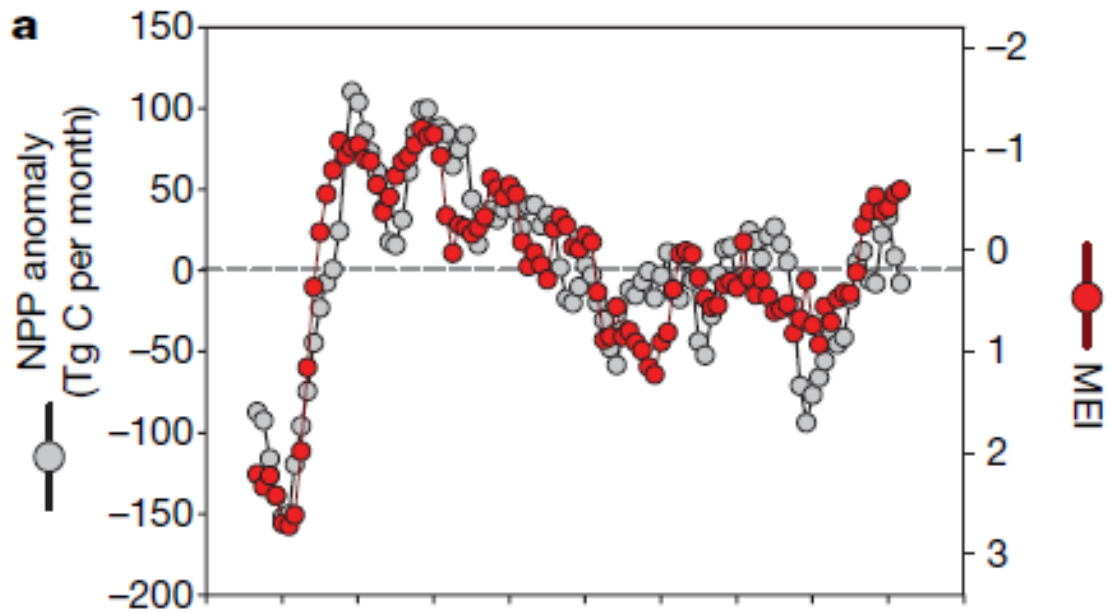


Figure 2.5 La production primaire et l'index MEI (tiré de Behrenfeld et autres, 2006, p. 753)

La figure 2.5 démontre la corrélation entre la production primaire (les cercles gris) et l'index MEI (les cercles rouges).

2.5.4 La composition de la floraison

Pour Zhai, le début de la floraison est défini comme étant le moment où la concentration de chlorophylle dépasse la moyenne annuelle. Le cycle annuel du phytoplancton est dominé par une floraison au printemps, commence en mai et se termine en août (voir figure 2.6). Les diatomées sont davantage présents au printemps alors que les dinoflagellés atteignent leur maximum en août (Zhai et autres, 2013).

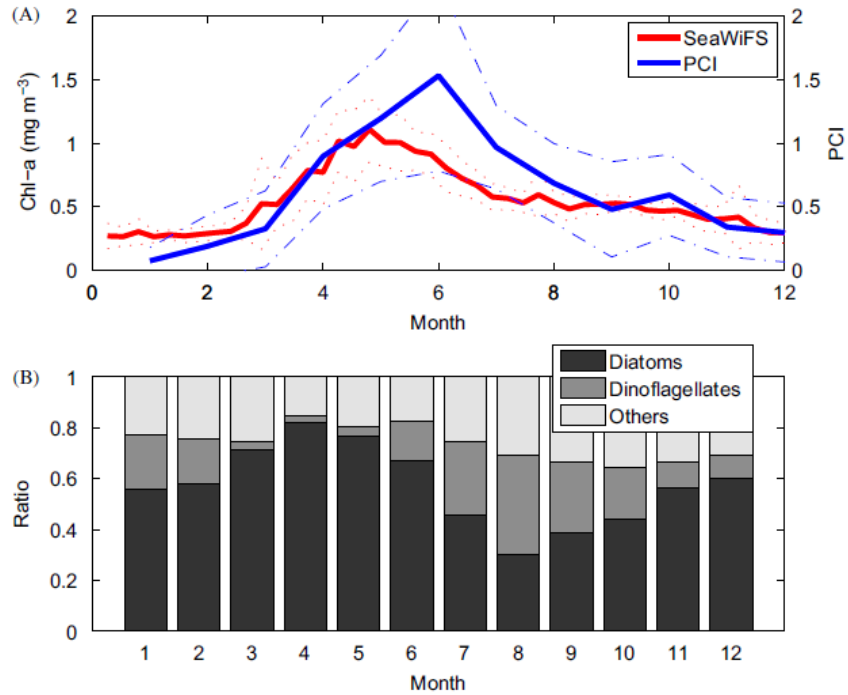


Figure 2.6 Composition de la floraison (tiré de Zhai et autres, 2013, p. 162)

Dans la figure du haut, la ligne bleue illustre la concentration de chlorophylle-a en mg/m^3 telle que mesurée par SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) de 1991 à 2009 au centre de l'Atlantique Nord, tandis que la figure du bas présente les proportions de diatomées et de dinoflagellés aux mêmes moments.

2.5.5 L'Oscillation Nord-Atlantique

L'index d'Oscillation Nord-Atlantique (ONA) décrit les variations du système climatique et est défini comme étant la différence moyenne annuelle de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. L'ONA influence la trajectoire et la magnitude des perturbations météorologiques et les températures océaniques de l'Atlantique Nord. Un index ONA positif est généralement associé à de forts vents d'ouest.

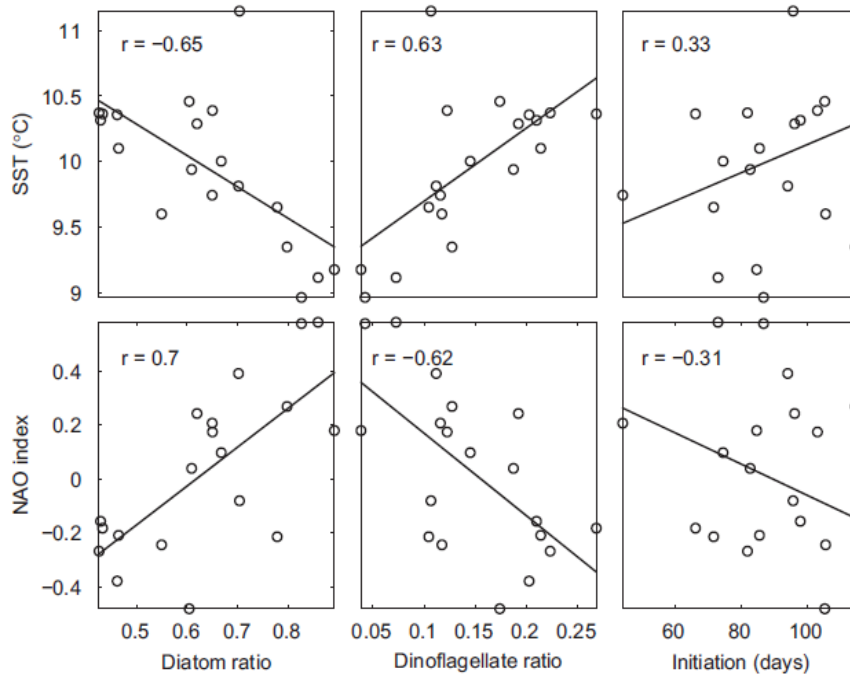


Figure 2.7 Index ONA et floraison du phytoplancton (tiré de Zhai et autres, 2013, p. 164)

Zhai et autres ont trouvé des corrélations (correction de Spearman) entre l'index ONA, la température de la surface de l'eau (SST), le début de la floraison, l'abondance relative de diatomées et l'abondance relative de dinoflagellés (voir figure 2.7).

Pour les années avec un ONA positif, les vents forts favorisent une couche de mélange plus profonde alors que l'augmentation de l'apport d'eau froide vers le sud favorise la stratification, donc une couche de mélange moins profonde. La relation inverse entre l'index ONA et le début de la floraison suggère donc que l'effet de l'apport d'eau froide est plus important (Zhai et autres, 2013). L'abondance relative de diatomées a diminuée entre 1991 et 2009 alors que l'abondance de dinoflagellés a augmenté durant la même période (Zhai et autres, 2013).

2.5.6 Tendances générales

Les analyses par satellites ont révélé un lien entre le climat et la décroissance de la production du phytoplancton. De 1998 à 2012, on obtient quatre tendances : floraison plus grande ou plus petite et floraison devancée ou retardée. Globalement, il y a une prédominance des floraisons retardées et plus intenses et des floraisons devancées et moins intenses (59 % de la surface). L'impact sur le début de la floraison est plus hétérogène spatialement que l'impact sur l'intensité. 58,7 % de la surface présente des floraisons retardées. 62,3 % des floraisons hivernales sont de moindre intensité et 54,1 % des floraisons printanières sont de moindre intensité. Dans les régions avec deux floraisons, l'intervalle entre les deux floraisons s'allonge sur 71,4 % de la surface et l'intensité de la floraison hivernale augmente, tandis que l'intensité de la floraison printanière diminue. Pour les régions avec une seule floraison hivernale, l'intensité diminue sur 67,1 % de la surface. La concentration moyenne de phytoplancton dans l'Atlantique Nord diminue sur 60,5 % de la surface. 78 % de la surface où il y a

de la floraison hivernale seulement diminue en concentration moyenne. Il n'y a pas vraiment de différences dans les régions à deux floraisons (46,5 %), alors que 81,2 % des régions avec une seule floraison printanière présentent une augmentation de la concentration moyenne.

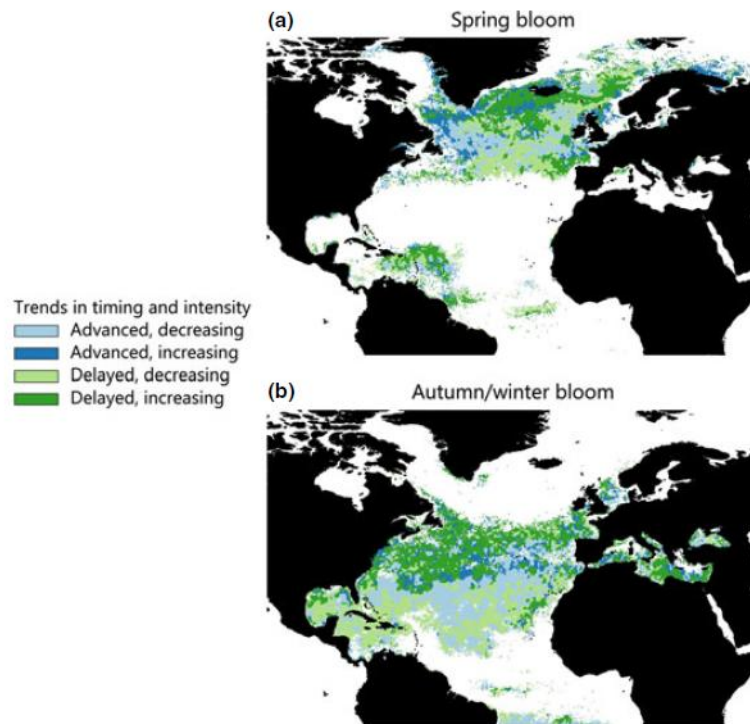


Figure 2.8 Tendances générales de la floraison (tiré de Taboada et Anadon, 2013, p. 706)

En fonction des régions, le facteur climatique expliquant les variations d'intensité et de début de la floraison change. Le vent joue un rôle critique sur la majorité de la surface. Le vent fort est majoritairement associé à une floraison retardée et plus intense (Taboada et Anadon, 2013).

Certaines études ont été incapables de trouver une tendance à long terme de la dynamique du phytoplancton en utilisant des images satellites de diverses provenances. D'autres ont relié les changements aux oscillations physiques locales (ONA, ENSO, etc.), certaines rapportent une augmentation locale ou globale et d'autres une diminution (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

2.6 Comment peut-on déterminer correctement la concentration du phytoplancton à l'aide d'images satellites?

La molécule chlorophylle-a est la principale forme de chlorophylle présente chez les organismes qui mettent en œuvre la photosynthèse. Elle absorbe la lumière de 430 à 440 nanomètres (nm) dans le bleu et autour de 670 nm dans le rouge (voir figure 2.9). Elle absorbe très peu les ondes lumineuses entre 470 à 610 nm, ce qui donne la couleur caractéristique verte aux organismes qui effectuent la photosynthèse.

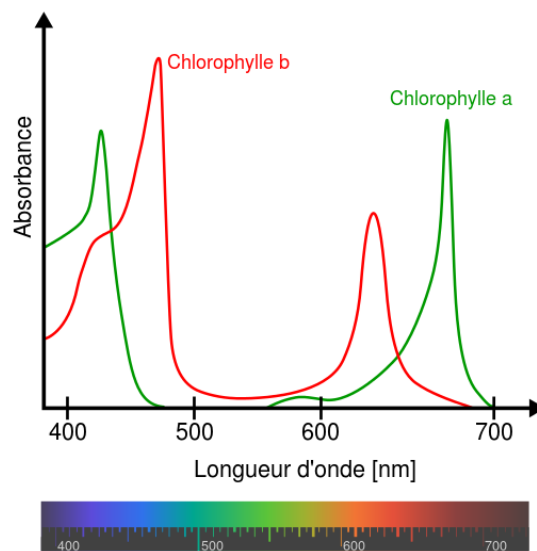


Figure 2.9 Absorption de la lumière par la chlorophylle (tiré de May, 2014)

Behrenfeld utilise deux façons de mesurer la concentration de phytoplancton : la concentration en chlorophylle de surface (Chl_{sat} en mg/m^3) et la concentration de carbone du phytoplancton (C_{phyt} en mg/m^3). L'utilisation de la chlorophylle comme indicateur de la biomasse de phytoplancton peut être trompeuse, car la chlorophylle est influencée par la luminosité et la quantité de nutriments intracellulaires. Par contre, la forte corrélation entre la Chl_{sat} et la C_{phyt} est une indication de la grande variabilité de la biomasse du phytoplancton dans l'Atlantique Nord. Behrenfeld ajoute qu'il ne faut pas oublier l'effet de dilution. Lorsque la profondeur de la couche de mélange augmente, l'apport d'eau libre de phytoplancton peut faire baisser le niveau de concentration sans modifier la quantité totale de biomasse. On peut calculer la biomasse totale en intégrant la concentration sur toute la profondeur de la couche de mélange ($MLD \times C_{phyt}$). Le taux de croissance (r) peut alors être calculé en utilisant la biomasse totale plutôt que la concentration. Ce calcul est utilisé seulement lorsque la couche de mélange grandit et que la profondeur de la couche de mélange est supérieure à la profondeur euphotique (Behrenfeld, 2010).

Différentes méthodes peuvent être appliquées pour transformer les données brutes reçues par les capteurs (une intensité lumineuse pour chacune des bandes de fréquences) en concentration de chlorophylle-a. Les méthodes les plus utilisées peuvent être regroupées en deux catégories : le ratio de deux ou plusieurs bandes et la différence entre deux ou plusieurs bandes.

2.6.1 Le ratio des intensités

Le ratio entre les intensités de deux longueurs d'onde différentes du spectre (typiquement bleu 440 nm et vert 550 nm) peut être relié empiriquement à la concentration de chlorophylle-a. La relation empirique est calculée à partir de grandes quantités de mesures simultanées *in situ* de la concentration de chlorophylle-a et du spectre lumineux. Par contre, dans les eaux côtières où le phytoplancton n'est pas majoritaire, ces mesures sont aussi affectées par les particules en suspension et la réflexion du fond. La concentration ainsi calculée est souvent surestimée à l'extérieur des gyres océaniques, près des côtes ou lorsque la concentration est faible (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

Des études suggèrent que les longueurs d'onde près de l'infrarouge (autour de 676 nm) sont davantage fiables pour évaluer les concentrations de chlorophylle-a près des côtes (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

2.6.2 La différence des intensités

Le Florescence Line Height (FLH) évalue plutôt la florescence (par l'émission d'une nouvelle couleur et non par l'absorption) de la chlorophylle-a en calculant la différence de radiance de la bande 678 nm par rapport à ses voisins 667 nm et 748 nm. Certaines études ont démontré que le FLH appliqué aux données du capteur MODIS a été plus efficace que la méthode des ratios pour détecter les floraisons d'algues dangereuses (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

Le Maximum Chlorophyll Index (MCI) est conçu pour détecter les floraisons avec de grandes concentrations ($>30 \text{ mg/m}^3$) et utilise les fréquences près des infrarouges en calculant la différence des intensités lumineuses de la bande 708,75 nm par rapport à ses voisins 681 nm et 753 nm. Elle ne peut être utilisée qu'avec le capteur MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) car seul ce dernier possède ces bandes de fréquences (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

Le Floating Algae Index (FAI) utilise la différence entre trois fréquences afin de mesurer la concentration de phytoplancton. L'algorithme utilise des seuils prédéterminés afin de séparer les endroits où la concentration est grande d'autres observations comme les nuages, la côte ou des sédiments submergés (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

Le Color Index Algorithm (CIA) utilise aussi la différence entre trois fréquences et a été spécialement développé pour les milieux oligotrophes. Il est réputé bien fonctionner avec de faibles concentrations de chlorophylle mais n'est pas complètement validé parce qu'il y a un manque de données *in situ* (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

Le tableau 2-1 résume les différentes méthodes développées pour calculer la concentration de chlorophylle-a. Pour chaque méthode, on y retrouve le capteur et les bandes de fréquences utilisés ainsi que l'application typique.

Tableau 2.1 Bandes spectrales utilisées par différents systèmes de détection des floraisons (tiré de Blondeau-Patissier et autres, 2013, p. 49)

Table 2 Spectral bands (in nm) used in algal bloom indices for SeaWiFS, MODIS and MERIS sensors (cited research)

Sensor	Product	Band 1	Band 2	Band 3	Algal bloom type
MODIS	FLH	667	678	746	algal blooms, surface algal blooms
MERIS	FLH	665	681	708.75	algal blooms
MODIS	FAI	667	859	1240 or 1640	Surface algal blooms
SeaWiFS	CIA	443	555	670	Low Chlorophyll concentrations
MERIS	MCI	681	708.75	753	High concentration in water and surface algal blooms
MERIS	MCI _{wide}	665	708.75	753	High concentration in water and surface algal blooms
MERIS	EBI	665	708.75	n/a	Surface algal blooms
SeaWiFS	RI	443	510	555	algal blooms
SeaWiFS	ABI	443	490	555	HAB, algal blooms
MODIS	ABI	443	490	555	HAB, algal blooms
MODIS	KBBI & RBD	667	678	n/a	Surface algal blooms (<i>K. brevis</i>)
MERIS	KBBI & RBD	665	681	n/a	Surface algal blooms (<i>K. brevis</i>)

2.6.3 Détection des différentes espèces de phytoplancton

Les pigments spécifiques aux espèces (par exemple les phycobiliprotéines pour les cyanobactéries, la fucoxanthine pour les diatomées et la péridinine pour les dinoflagellés) reflètent des profils spectraux différents, ce qui permettrait en théorie de les distinguer (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

La floraison à expression en surface, comme celle du coccolithophore, a des caractéristiques propres (large, dense, la plupart des latitudes, radiance répartie à cause des coccolites) qui permettent de spécialiser les algorithmes. En utilisant une technique de classification des intensités lumineuses, on peut cartographier ces événements à l'échelle globale ou de bassins (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

La floraison de cyanobactéries *Trichodesmium* fixe le nitrogène atmosphérique en ammonium, ce qui le rend indisponible aux autres organismes. Le phycoerythrin présent dans le *Trichodesmium* absorbe davantage les fréquences à 550 nm, ce qui permet de les identifier (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

Le *Sargassum* est une micro-algue flottant à la surface et peut couvrir des dizaines de kilomètres, ce qui permet d'observer certains processus océanographiques. En utilisant le MCI et le FLH, on peut suivre la migration du *Sargassum* du golfe du Mexique au printemps vers le nord de l'Atlantique en juillet et terminant sa course près des Bahamas en février. Son importance (10⁶ tonnes par année) en fait un acteur important pour le cycle du carbone. Un changement dans sa distribution saisonnière a été démontré mais est encore inexplicé (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

Le Red Band Difference (RBD) et le *Karenia Brevis* Bloom Index (KBBI) sont des algorithmes spécialement développés pour détecter *Karenia Brevis* (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

La floraison importante d'une seule espèce de phytoplancton peut avoir des impacts négatifs sur les écosystèmes côtiers et sur l'économie (marrée rouge). Le Red tide Index (RI) a spécialement été

conçu pour détecter les marrées rouges. Le Red tide index Chlorophyll Algorithm (RCA) relie de façon empirique le RI à la concentration de chlorophylle et a été plus consistant avec les observations sur le terrain que les ratios classiques (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

2.6.4 L'analyse de la concentration de chlorophylle

L'analyse temporelle de la concentration de chlorophylle peut révéler des tendances et permettre de faire des liens avec des facteurs environnementaux. Le signal peut être découpé en fenêtres temporelles de façon à détecter le moment d'apparition de certains phénomènes. L'étude du signal dans le domaine des fréquences à l'aide de transformation de types Fourier ou ondelettes, permet de détecter des évènements dans un signal imparfait. Le bruit du signal provient des conditions atmosphériques, de la présence de nuages, des effets miroirs, etc. (Blondeau-Patissier et autres, 2013)

Plusieurs techniques sont utilisées pour détecter une floraison. Certaines utilisent des seuils pour un pixel ou une région spécifique, d'autres des techniques de soustraction de fond ou de représentations espace-temps (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

2.6.5 Limitations

L'analyse du spectre lumineux permet d'obtenir de l'information sur les constituants optiquement actifs d'une parcelle d'eau. La classification des différents spectres permet d'obtenir une information qualitative et est surtout utile pour détecter les floraisons qui s'expriment en superficie et d'en préciser la surface. Si cette analyse peut être suffisante pour détecter la présence ou l'absence de floraison, la recherche d'informations quantitatives est souvent minée par la sensibilité du spectre lumineux aux particules en suspension, à la réflexion du fond et aux fluctuations de l'atmosphère (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

Les senseurs des satellites reçoivent la fraction de lumière réfléchiée par la chlorophylle sous la surface de l'eau, mais ceux-ci peuvent capter la lumière à une profondeur limitée. Conséquemment, les floraisons survenant profondément dans la colonne d'eau ou avec une faible concentration de chlorophylle peuvent ne pas être captées par les satellites même si elles ont déjà été observées (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

L'efficacité des méthodes pour calculer la concentration de chlorophylle-a en fonction des différentes intensités lumineuses est limitée par la robustesse des algorithmes de correction atmosphérique. L'oxygène de l'atmosphère absorbe la lumière dont la longueur d'onde est de 687 nm et 760 nm et la vapeur d'eau absorbe les longueurs d'ondes de 730 nm (Xing, 2007). La composition de l'atmosphère variant d'un endroit à l'autre, son impact n'est donc pas uniforme sur la lumière émise par le phytoplancton et les méthodes qui permettent de calculer sa concentration doivent en tenir compte. Les techniques permettant de détecter les nuages et les effets de miroitement du soleil ont aussi un impact important sur la validité des calculs.

Les différences régionales dans les propriétés optiques de l'eau et les concentrations rendent l'utilisation d'algorithmes généraux inapplicables dans certaines régions. L'extraction d'informations fiables à partir des images satellites est plus complexe près des côtes car les eaux sont moins profondes et reçoivent beaucoup d'eau douce chargée de nutriments, de particules organiques, de sédiments et de contaminants (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

De plus, les différents algorithmes ne sont pas applicables à tous les satellites ou alors nécessitent des adaptations car les satellites ont des bandes de fréquences différentes. Par contre, les différents algorithmes peuvent être combinés afin de mieux interpréter les floraisons et leur mécanismes sous-jacents (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

Les satellites apportent des informations sur la couleur de l'eau seulement, ce qui limite les informations que l'on peut fournir aux modèles d'écosystèmes. Cependant, l'énorme quantité de données permet de couvrir une panoplie de réponses biogéochimiques à une vaste gamme de conditions physiques (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

Les ratios ont démontré leur efficacité pour détecter les floraisons dans les eaux libres, tandis que les algorithmes utilisant les bandes rouges et près des infrarouges sont plus efficaces pour les eaux côtières. Les algorithmes utilisant les caractéristiques bio-optiques du phytoplancton sont de plus en plus étudiés mais les informations *in situ* à ce sujet sont limitées. Plusieurs autres données peuvent être obtenues à partir des images satellites (rayonnement photosynthétiquement actif, vitesse et direction du vent, précipitations, température de la surface de l'eau, salinité, hauteur de l'eau, etc.) afin de mieux comprendre la phénoménologie du phytoplancton. L'utilisation de plusieurs sources de données (satellites, *in situ*, modèles d'écosystèmes) permet d'étoffer les expérimentations (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

La surveillance des floraisons, de leur progression et de leurs caractéristiques, est un défi continué spécialement près des côtes, là où se situe un tiers de la productivité marine. Des satellites avec davantage de bandes spectrales et une meilleure résolution spatiale, des bandes spectrales identiques pour tous les senseurs et un meilleur couplage entre les différentes calibrations et validations est souhaitable pour l'avenir. Des satellites géostationnaires, tel que GOCI (Geostationary Ocean Color Imager) permettraient de prendre plusieurs images par jour de la même région. Le retard et l'annulation de nouvelles missions pourraient faire une brèche dans les données (comme le trou de 10 ans entre CZCS (Costal Zone Color Scanner) et SeaWiFS) et cela pourrait avoir des conséquences importantes sur notre compréhension des écosystèmes et de leur réponse aux changements climatiques. En 1991, le Pinatubo a éjecté des tonnes de fer éparpillées par le vent, mais nous n'avons aucune image satellite de cet évènement et de ses conséquences (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

Depuis les 13 dernières années, il y a eu une augmentation des études des floraisons à partir des images satellites. Ces études portent majoritairement sur l'étude des floraisons nuisibles près des côtes, aussi connues sous le nom de marées rouges, qui peuvent nuire aux activités récréatives,

commerciales et industrielles (Blondeau-Patissier et autres, 2013). Le National Oceanic and Atmospheric Administration Harmful Algal Bloom Operational Forecast System (NOAA HAB-OFS) est un exemple de système de prédiction des marées rouges entièrement opérationnel (NOAA's Center for Operational Oceanographic Products and Services, 2013).

3 DESCRIPTION DES SOURCES DE DONNÉES

Le présent chapitre décrit la provenance des données utilisées afin de trouver des liens entre la météorologie et la floraison du phytoplancton. La première partie présente la source de données climatiques NCEP/NCAR. La seconde section porte sur le satellite Aqua et son capteur MODIS, tandis que la dernière résume l'algorithme OC2 (Ocean Color Chlorophyll 2 bandes) qui permet de calculer des concentrations de chlorophylle à partir des données brutes du capteur MODIS à des concentrations de chlorophylle.

3.1 NCEP/NCAR

Le National Center for Environmental Prediction (NCEP) est une organisation gouvernementale fédérale responsable de la prédiction de la température, du climat et de l'eau (National Weather Service, 2014).

Le National Center for Atmospheric Research (NCAR) est un centre de recherche et de développement fédéral dédié à l'étude du comportement de l'atmosphère. Il supporte la communauté universitaire et scientifique nationale et internationale.

Tous deux sont sous l'égide de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), une agence du département du commerce américain qui offre des services de prévisions météorologiques, de surveillance des tempêtes, du climat, de la gestion des pêches, de la restauration des côtes et du commerce maritime.

Le NCEP et le NCAR ont joint leurs efforts afin de créer une base de données météorologiques qui contient plus de 40 années d'observations de l'atmosphère et du climat. Les données proviennent de capteurs terrestres, de navires, d'avions et de satellites de divers pays et organisations. Les données sont corrigées de façon à combler les manques et à uniformiser les résultats obtenus par les différents outils de mesure. (Kalnay et autres, 1996)

La deuxième version de la base de données NCEP/NCAR est une version améliorée qui corrige certaines erreurs de paramétrisation et des modèles physiques. Elle contient des valeurs de janvier 1979 à décembre 2013. Les données sont disponibles quatre fois par jour, quotidiennement ou mensuellement. On y retrouve des informations sur la température, le vent, l'humidité, les précipitations, la pression, etc.

3.2 Aqua

Aqua est un satellite de recherche scientifique conçu par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) dont la mission première est l'étude du cycle de l'eau. Il fait partie de la mission internationale d'observation de la Terre (EOS) qui comporte 3 satellites : Terra (1999), Aqua (2002) et Aura (2004).

Il fait aussi partie d'une constellation de satellites (A-train) qui comportera à terme sept satellites. Les données de la constellation A-train peuvent être corrélées et combinées afin d'obtenir des résultats plus fiables et plus complets (Graham, 2014).

Situé à 750 km d'altitude, le satellite Aqua fait le tour de la Terre en 98,5 minutes et couvre entièrement la surface terrestre en moins de 2 jours. Il recueille une impressionnante quantité d'informations sur les conditions de la terre et des océans. Par exemple, il enregistre et transmet des données sur la végétation terrestre, l'évaporation des océans, la composition de l'atmosphère, les nuages, les précipitations, le couvert de glace, la matière organique dissoute dans les océans, le phytoplancton, etc.

Aqua embarque six instruments à la fine pointe de la technologie :

- un radiomètre à micro-ondes pour l'observation des nuages et du vent (AMSR-E);
- un capteur à micro-ondes pour mesurer la température et l'humidité de l'atmosphère (AMSU-A);
- un capteur infrarouge pour la mesure de la température du sol et de la mer (AIRS);
- un capteur développé au Brésil qui utilise la bande VHF pour mesurer l'humidité atmosphérique (HSB);
- un capteur qui mesure les flux d'énergie radiative sur un large domaine de fréquences (CERES);
- et un radiomètre spectral à résolution modérée pour l'observation des nuages et des flux d'énergie radiative. Il permet aussi d'étudier les aérosols, l'utilisation des sols et la détection des incendies et des éruptions volcaniques (MODIS).

3.3 MODIS

Le radiomètre spectral à résolution modérée capte les ondes électromagnétiques sur 36 bandes spectrales variant de 400 nm à 14 400 nm. Cela inclut donc tout le domaine de la lumière visible et une partie du rayonnement infrarouge. Selon l'application et le type d'information recherché, différentes bandes de fréquence sont utilisées (voir annexe 1). La résolution spatiale des capteurs varie de 250 à 1000 mètres selon la bande de fréquence, et la quantification des données s'effectue sur 12 bits, donc 4096 valeurs. MODIS est composé de miroirs rotatifs afin d'élargir son champ de vision, d'un système de refroidissement et de plusieurs systèmes de calibration (Maccherone, 2014).

On retrouve également un radiomètre spectral à résolution modérée à bord de Terra, mais celui-ci souffre de dégradation et les données qu'il produit sont donc moins fiables. C'est pourquoi l'acronyme MODIS fait généralement référence à l'instrument du satellite Aqua (Blondeau-Patissier et autres, 2013).

3.4 OC2 : des données brutes à la concentration de chlorophylle

Dans un premier temps, les données brutes sont calibrées pour tenir compte de la fluctuation de la sensibilité des capteurs qui se dégrade avec le temps. Ensuite, les données sont épurées pour ne garder que les informations provenant de l'océan et des bandes de fréquences pertinentes. Grace aux instruments de positionnement du satellite, les données sont géo-référencées à l'aide d'une projection cylindrique équidistante du globe. La caractérisation de la lumière émise par l'eau tient compte de l'absorption et de la diffraction des éléments qui composent l'atmosphère (vapeur d'eau, ozone, oxygène, poussière, etc.). Les nuages et la réflexion spéculaire du soleil sur l'eau (effet de miroitement) font en sorte que, pour certaines positions sur le globe et à certains moments, les données ne sont pas disponibles (Thomas et Franz, 2005).

Afin de mesurer la concentration de chlorophylle à partir du spectre d'ondes lumineuses émise par l'eau, l'algorithme OC2 (Ocean Color Chlorophyll 2 bandes) a été mis au point (Werdell, 2010). Cet algorithme se base sur le ratio des intensités de deux bandes (voir section 2.6). Il est largement utilisé et fonctionne généralement bien dans toutes sortes de situations. Il établit un lien empirique (une fonction polynomiale de degré 3) entre le ratio de deux bandes de fréquences et les concentrations de chlorophylle mesurées *in situ* et colligées dans la base de données NOMAD (NASA bio-Optical Marine Algorithm Dataset), gérée par la NASA Ocean Biology Processing Group (Proctor, 2013).

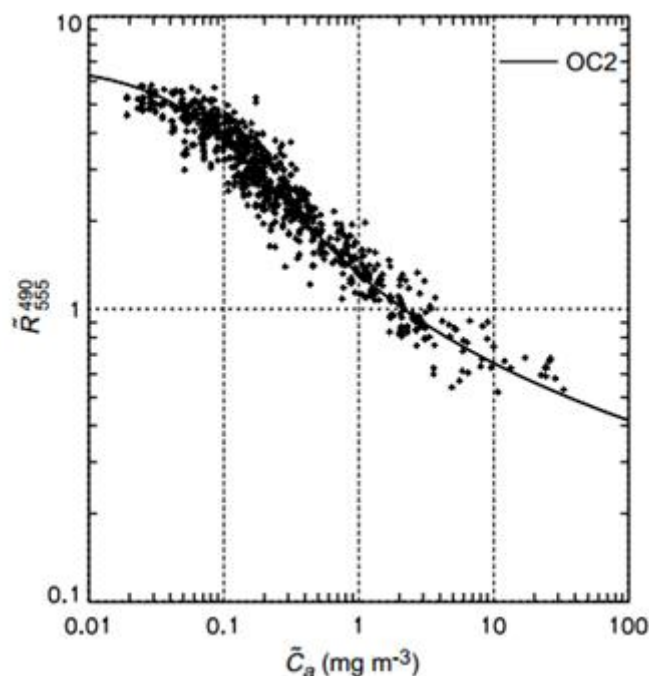


Figure 3.1 Lien empirique entre la concentration de chlorophylle-a (C_a) et le ratio de luminance à 490 et 555 nm (tiré de O'Reilly et autres, 2000, p. 4)

Sur une échelle logarithmique, la fonction polynomiale est donnée par l'équation suivante :

$$C_a = 10^{(a_0 + a_1 R_2 + a_2 R_2^2 + a_3 R_2^3)} + a_4$$

où $R_2 = \log_{10}(R_{555}^{490})$ et (R_{555}^{490}) est une notation compacte pour le ratio de réflectance $R_{rs}(\lambda_i)/R_{rs}(\lambda_j)$

Sur le site Web de la NASA, les données sont présentées de différentes façons. Entre autres, les moyennes journalières, mensuelles et annuelles sont disponibles. Deux résolutions spatiales sont aussi disponibles : 0,042 degrés de longitude (4 km à l'équateur) ou 0,084 degrés de longitude (9 km à l'équateur). Les données sont disponibles depuis 2002, mais la première année avec des données disponibles pour toute l'année est 2003 (Franz, 2007).

4 MÉTHODOLOGIE

Le quatrième chapitre précise la structure des données météorologiques et des données sur la concentration de chlorophylle. Il présente aussi les outils mathématiques (ré-échantillonnage, coefficient de corrélation, interpolation, etc.) et les outils informatiques utilisés dans le présent essai.

4.1 Les données météorologiques

Les données météorologiques ont été téléchargées à partir du site de l'Earth System Research Laboratory (ESRL) de la NOAA. Elles sont présentées sous la forme Network Common Data Form (NetCDF) qui est un format ouvert de données auto-documenté, indépendant du matériel destiné à la création, l'accès et au partage de données scientifiques (National Oceanic And Atmospheric Administration, 2014).

Aux fins des expérimentations, la version 4.3.2 de la librairie C développée par le consortium UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) qui permet la lecture des informations stockées en format NetCDF sera utilisée (University Corporation for Atmospheric Research, 2014).

Les données météorologiques de température de surface et de vent utilisées sont structurées sous forme d'un tableau à trois dimensions où la première dimension représente le temps en jours du 1^{er} janvier 2003 au 31 décembre 2013, ce qui donne 4 018 journées en comptant les années bissextiles 2004, 2008 et 2012. La deuxième dimension est la latitude de 88,542 N à 88,542 S avec une précision de 1,904 degré. Il y a donc 94 latitudes échantillonnées. La troisième dimension est la longitude de 0 degré à 358,125 degrés avec une précision de 1,875 degré. Il y a donc 192 valeurs de longitude.

4.2 Les données sur la concentration de chlorophylle

Les données sur la concentration de la chlorophylle ont été téléchargées à partir du site OceanColor Web de la NASA (National Aeronautics and Space Administration, 2014). Elles sont présentées sous la forme HDF (Hierarchical Data Format) et la librairie utilisée afin de lire ces données provient de l'HDF Group lié à l'Université de l'Illinois (HDF Group, 2013). La version utilisée est 4.2.10.

Les données sur la concentration de chlorophylle utilisées sont aussi structurées sous la forme d'un tableau à trois dimensions, mais à des échelles différentes. La première dimension représente aussi le temps, mais en mois de janvier 2003 à décembre 2013. Les données sont donc disponibles sur 132 mois. La deuxième dimension est la latitude de 90 N à 89,917 S avec une précision de 0,083 degré. Il y a donc 2 160 valeurs de latitudes. La troisième dimension est la longitude de -179.958 degrés à 178,685 avec une précision de 0,083 degré. Il y a 4 320 longitudes échantillonnées.

4.3 Le ré-échantillonnage

Afin de rendre les données compatibles entre elles et de pouvoir ainsi établir des liens, il faut les ramener sur la même échelle temporelle et spatiale. Il faut ré-échantillonner les données de façon à ce qu'elles partagent le même point d'origine et la même précision. Deux méthodes sont possibles. La première consiste à sous-échantillonner les données de plus grande précision et sélectionnant les données les plus pertinentes. La deuxième consiste à sur-échantillonner les données de plus faible précision en interpolant de nouveaux résultats. Puisqu'il est vain d'inventer des informations (comme un zoom logiciel par exemple) et que les données interpolées nécessairement artificielles pourraient fausser les résultats, il est donc plus judicieux d'utiliser la première méthode et d'adapter les données de plus grande précision aux données de moindre précision. De plus, cette façon de faire nécessitera moins de mémoire vive et de temps de calculs.

Dans un premier temps, il faut donc transformer les données météorologiques d'une base temporelle journalière à une échelle mensuelle. Pour ce faire, une simple moyenne a été effectuée pour chacun des mois en tenant compte, bien sûr, du nombre de jours dans le mois, mais aussi des données manquantes.

Dans un deuxième temps, puisque les données météorologiques sont spatialement beaucoup moins nombreuses et précises que les données sur la chlorophylle, les images de concentrations de chlorophylle ont été ré-échantillonnées de façon à ce qu'elles correspondent exactement aux données météorologiques. Il s'agit donc d'un changement d'échelle et d'origine effectués par une simple transformation linéaire en latitude et longitude. L'algorithme utilisé consiste à calculer, pour chaque latitude et longitude de la nouvelle image, la latitude et la longitude dans l'image originale et de prendre la valeur la plus proche.

$Lat_d = Lat_{do} + yLat_{dp}$ où Lat_d est la latitude de la destination, Lat_{do} est l'origine de la destination, y la position verticale dans l'image et Lat_{dp} la précision de la destination.

$Lat_s = \frac{(Lat_d - Lat_{so})}{Lat_{sp}}$ où Lat_s est la latitude source, Lat_{so} l'origine de la source et Lat_{sp} la précision de la source.

Les mêmes équations s'appliquent pour la transformation des longitudes et la position horizontale dans l'image. Il n'y a pas d'effets de bord puisque, heureusement, la Terre est ronde.

4.4 Le coefficient de corrélation

Le calcul du coefficient de corrélation est largement utilisé dans le cadre de cet essai. Il consiste à effectuer une régression linéaire à l'aide de la méthode des moindres carrés, puis à calculer le coefficient de corrélation :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

Un coefficient de corrélation r de 1 indique qu'il existe une corrélation parfaite entre les deux séries de données x_i et y_i . Une transformation affine permet alors de calculer les valeurs d'une série à partir de l'autre. Un coefficient de -1 indique une corrélation inverse parfaite. Un coefficient de 0 indique que les données ne sont aucunement corrélées. Une corrélation forte est généralement comprise entre 0,5 et 1 ou entre -1 et -0,5.

4.5 L'interpolation parabolique

Afin de déterminer avec plus de précision la position d'un maximum (x_{max}, y_{max}) dans une série de données, l'interpolation polynomiale d'ordre 2 (ou parabolique) est souvent utilisée. À l'aide de trois points (x_1, y_1) , (x_2, y_2) et (x_3, y_3) , on peut calculer les coefficients de l'équation $y = ax^2 + bx + c$ de la façon suivante :

$$a = \frac{(y_2 - y_1)(x_1 - x_3) + (y_3 - y_1)(x_2 - x_1)}{(x_1 - x_3)(x_2^2 - x_1^2) + (x_2 - x_1)(x_3^2 - x_1^2)}$$

$$b = \frac{(y_2 - y_1) - a(x_2^2 - x_1^2)}{(x_2 - x_1)}$$

$$c = y_1 - ax_1^2 - bx_1$$

$$x_{max} = \frac{-b}{2a}$$

$$y_{max} = ax_{max}^2 - bx_{max} + c$$

Par exemple, avec les points illustrés à la figure 4.1, la position du maximum est située à $x_{max} = 0,72$. On peut aussi calculer la valeur du maximum en plaçant x_{max} dans l'équation de la parabole. Dans cas-ci, on obtient $y_{max} = 10,35$.

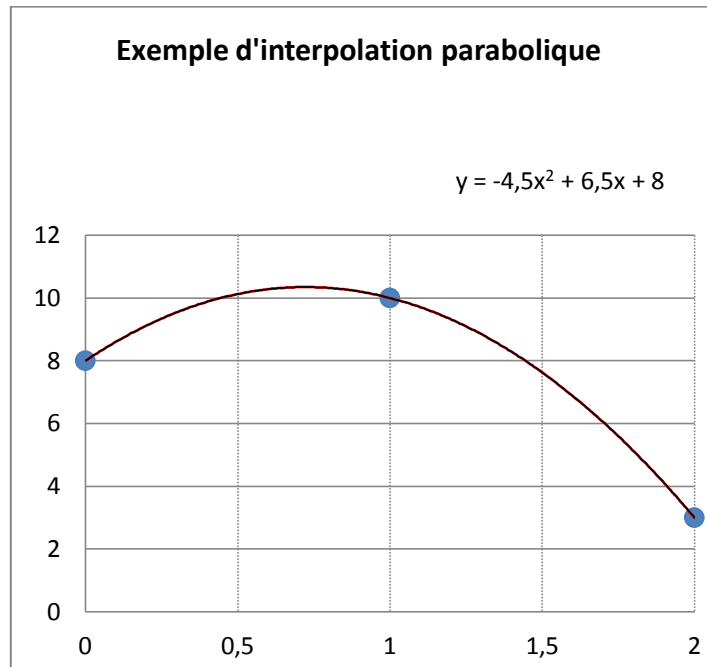


Figure 4.1 Illustration de l'interpolation parabolique

4.6 Vitesse du vent

Les données sur la vitesse et la direction du vent sont présentées sous la forme de vecteurs dont la composante u représente la force du vent selon l'axe horizontal (est-ouest) et la composante v représente la force du vent selon l'axe vertical (nord-sud). Peu importe sa direction, la vitesse du vent, nécessairement positive, est utilisée dans les expérimentations. La vitesse du vent est calculée en évaluant la norme du vecteur (u, v) :

$$\|(u, v)\| = \sqrt{u^2 + v^2}$$

4.7 Outils informatiques et présentation des résultats

Les divers expérimentations et calculs seront programmés en C++ à l'aide de l'environnement de développement Microsoft Visual Studio Professionnel 2012 sous Windows 7. La grande flexibilité de la programmation C++ offre la possibilité de créer des algorithmes originaux sans limites et son étonnante efficacité permet de manipuler rapidement une énorme quantité de données.

Les images produites dans le cadre de cet essai ont été enregistrées en format BITMAP avec une palette de couleurs semblable à celle de Matlab (voir figure 4.2).

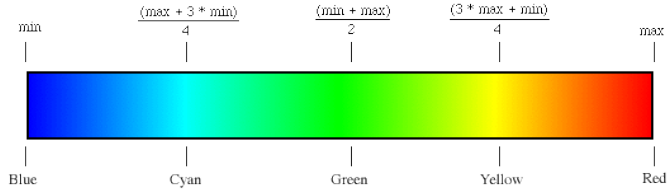


Figure 4.2 Palette de couleurs utilisée pour produire les images

5 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Cette section expose les résultats des différentes expérimentations effectuées afin de trouver des liens entre les données météorologiques de 2003 à 2013 et la concentration du phytoplancton sur la même échelle de temps. La première partie porte sur l'influence de la température sur la concentration de phytoplancton. La deuxième, sur l'influence du vent, et la dernière résume les diverses expériences réalisées mais dont les résultats ne sont pas présentés ici.

5.1 Influence de la température

L'impact de la température sur le phytoplancton sera analysé sous trois angles : l'influence de la température moyenne annuelle sur la concentration moyenne annuelle de chlorophylle, l'influence de la température moyenne mensuelle sur la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle et l'influence de la température moyenne annuelle sur la chronologie de la floraison, plus spécifiquement sur le moment où la floraison du phytoplancton est maximale.

5.1.1 Influence de la température sur la concentration moyenne annuelle de chlorophylle

La première expérience consiste à calculer le coefficient de corrélation entre la température annuelle moyenne et la concentration annuelle moyenne de chlorophylle 2003 à 2013.

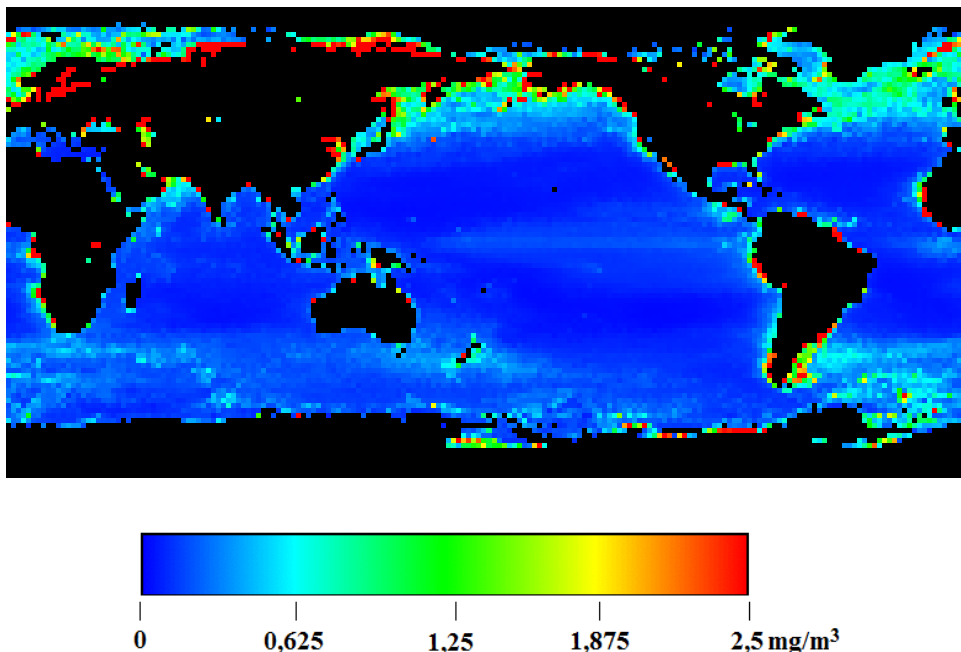


Figure 5.1 Concentration moyenne de chlorophylle en 2013

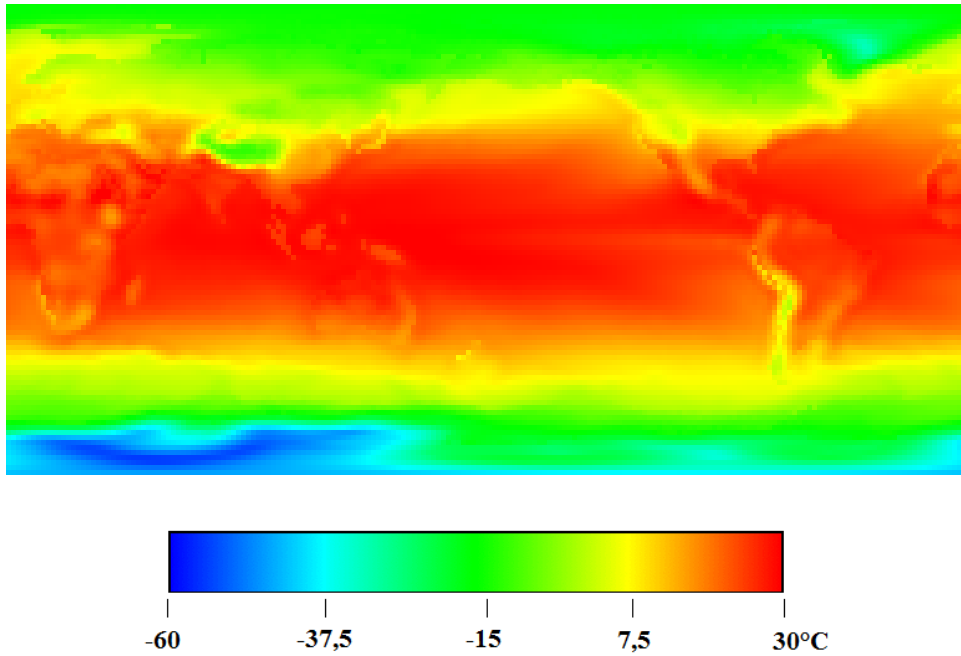


Figure 5.2 Température moyenne en 2013

À titre d'exemple, la concentration moyenne de chlorophylle en 2013 est présentée à la figure 5.1 et la température moyenne en 2013 est présentée à la figure 5.2. Les autres années sont disponibles aux annexes 2 et 3. Pour chaque pixel de l'image, c'est-à-dire pour chaque latitude et longitude, le coefficient de corrélation a été calculé, puis associé à une couleur. Le rouge représente une corrélation fortement positive, le vert, aucune corrélation et le bleu, une corrélation fortement négative. L'image ainsi produite est présentée à la figure 5.3.

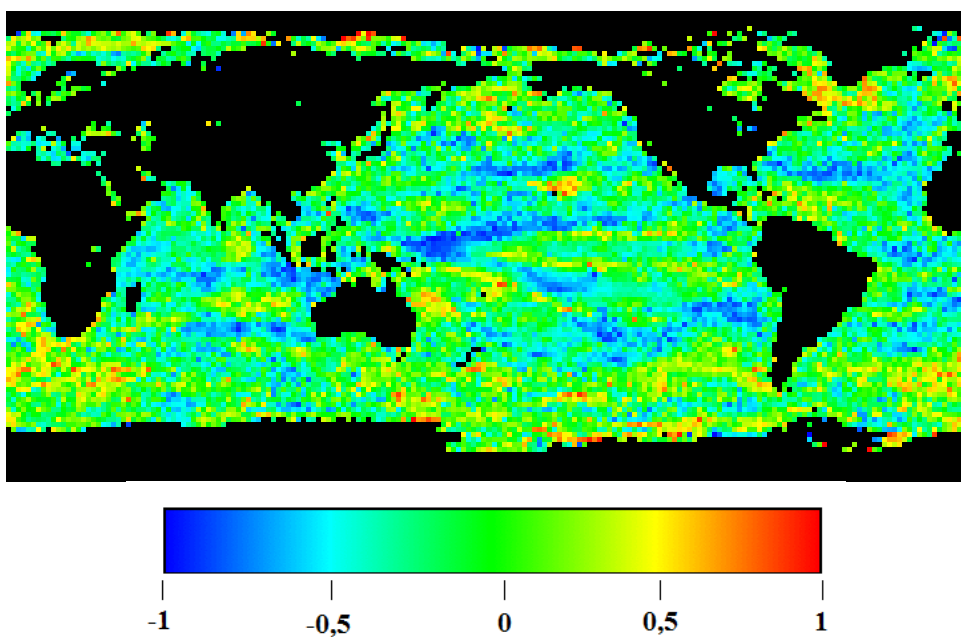


Figure 5.3 Corrélation entre la température annuelle moyenne et la concentration annuelle moyenne de phytoplancton

On remarque plusieurs zones de corrélations fortement négatives ou positives. Plus spécifiquement, dans l'Atlantique nord, une zone de forte corrélation positive est située au sud du Groenland tandis qu'une bande de corrélation négative s'étale le long du Tropique du Cancer.

Afin de valider les résultats obtenus, deux coordonnées précises ont été analysées plus en profondeur. La figure 5.4 illustre la variation de la température annuelle moyenne (échelle de droite) et la variation de la concentration annuelle moyenne (échelle de gauche) pour un point au sud du Groenland (54,2 N 46,875 O). On remarque que les deux courbes augmentent et diminuent aux mêmes moments, ce qui indique une bonne corrélation (voir figure 5-5). Pour chaque degré de température supplémentaire, la concentration de chlorophylle augmente en moyenne de 0,2024 mg/m³.

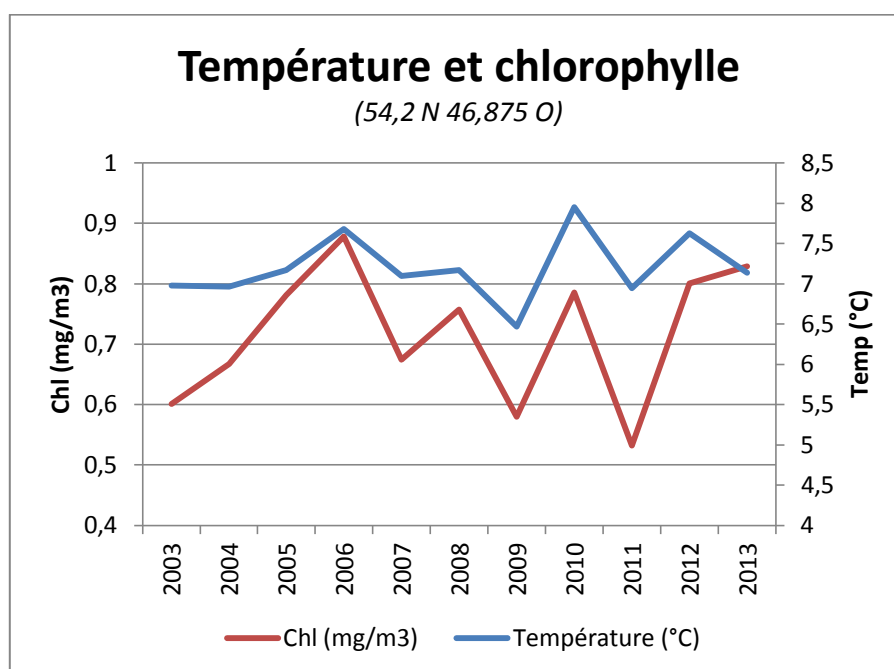


Figure 5.4 Variation de la température et de la chlorophylle (54,2 N 46,875 O)

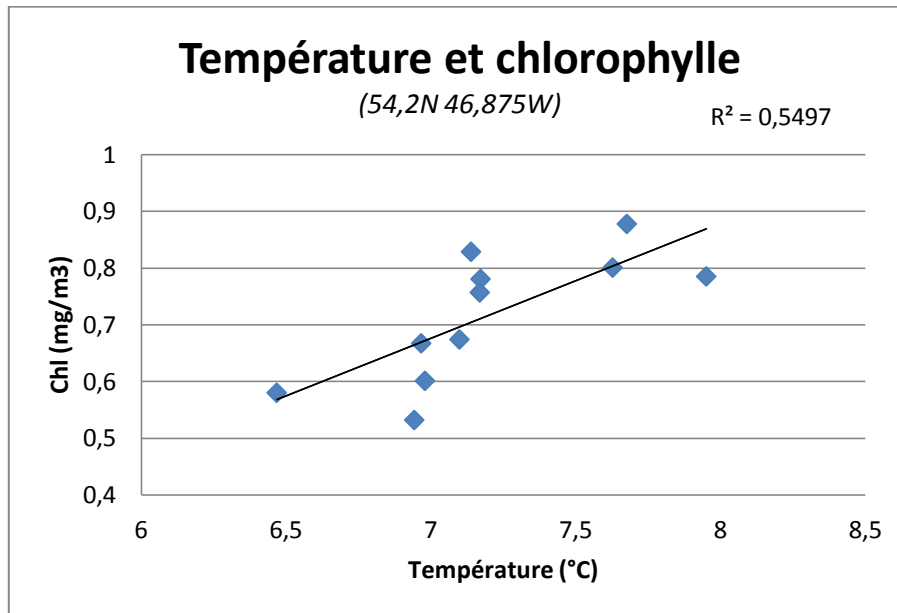


Figure 5.5 Corrélation entre la température et la chlorophylle (54,2 N 46,875 O)

La figure 5.6 illustre la variation de la température et de la chlorophylle pour un point situé à l'est de la Floride sur le Tropique du Cancer (31,422 N 71,25 O). On remarque aisément que la concentration de chlorophylle a tendance à diminuer lorsque la température augmente. Pour chaque degré Celsius supplémentaire, la concentration de chlorophylle diminue en moyenne de 0,093 mg/m³. Inversement, la concentration augmente lorsque la température diminue. Cela dénote une corrélation inverse importante (voir figure 5.7).

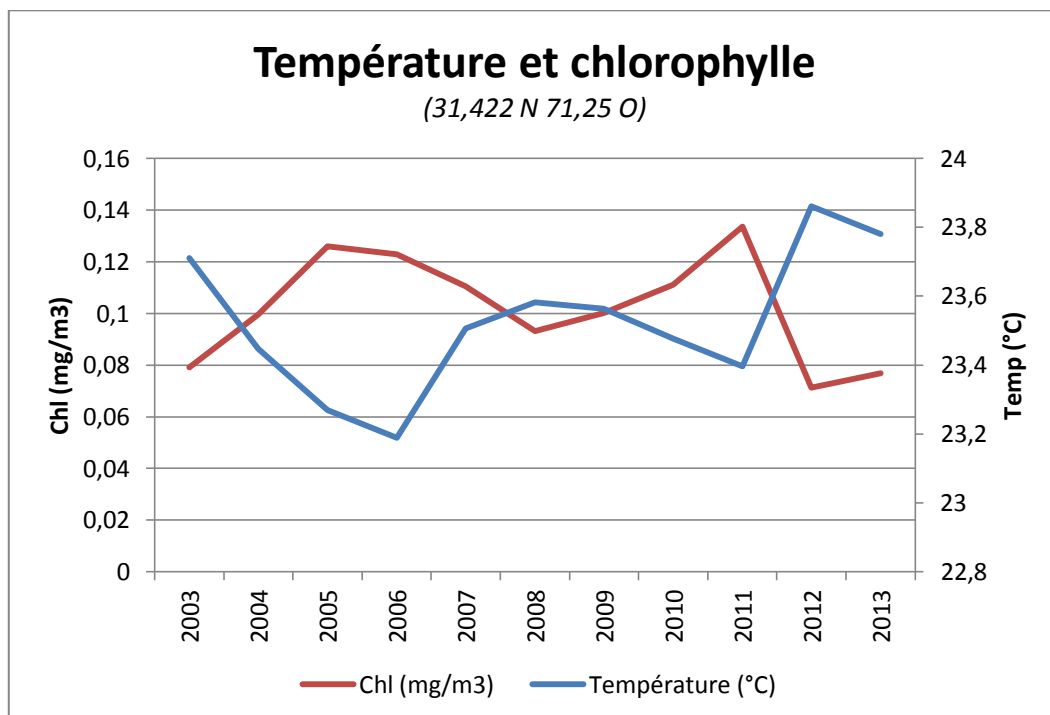


Figure 5.6 Variation de la température et de la chlorophylle (31,422 N 71,25 O)

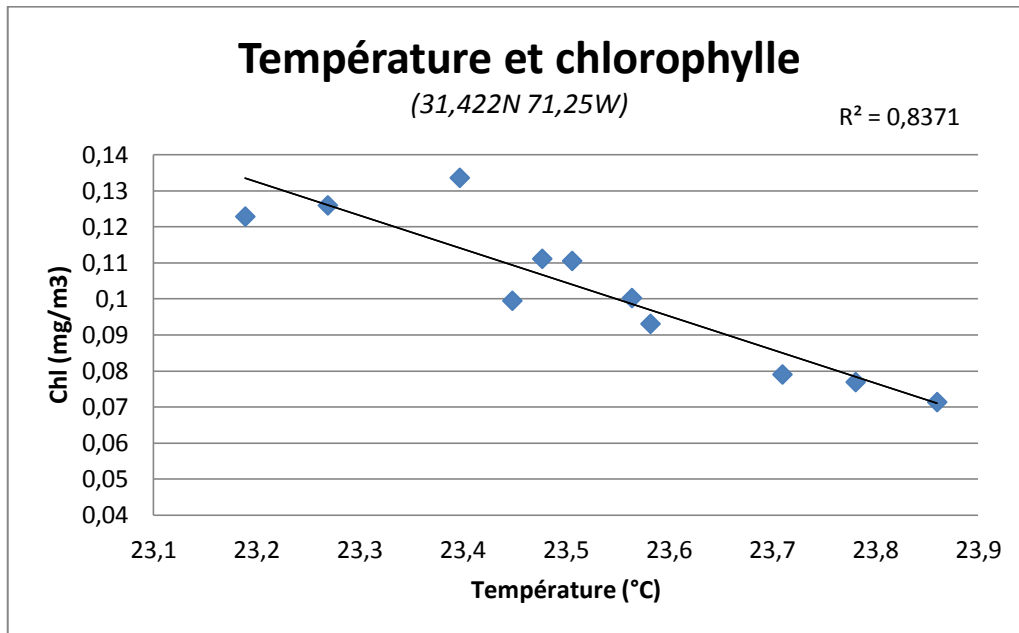


Figure 5.7 Corrélation entre la température et la chlorophylle (31,422 N 71,25 O)

5.1.2 Influence de la température sur la concentration mensuelle de chlorophylle

La deuxième expérience consiste à mesurer la corrélation entre la température moyenne mensuelle et la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle et ce, pour chacun des mois de l'année. Par soucis de concision, seuls quelques mois qui présentent des zones de corrélations d'intérêt seront détaillés ici, les résultats complets étant présentés à l'annexe 4.

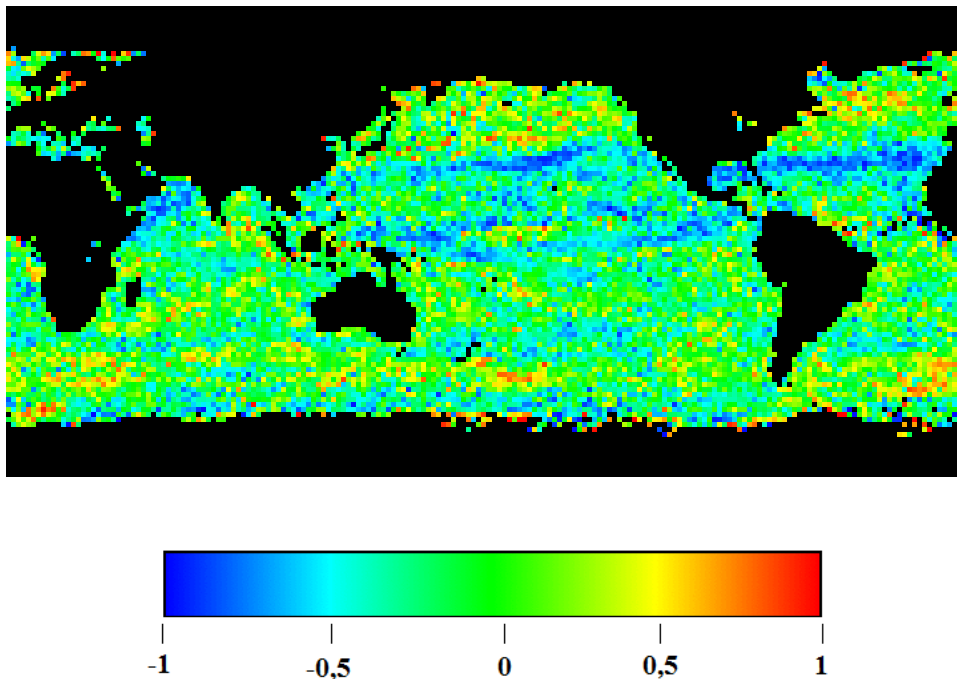


Figure 5.8 Corrélation entre la température moyenne du mois de mars et la concentration moyenne de chlorophylle au mois de mars

De janvier à mars (la figure 5.8 présente les coefficients de corrélation du mois de mars), la corrélation entre la température et la concentration moyenne de phytoplancton est, une fois de plus, fortement négative sur une bande longeant le Tropicque du Cancer dans l'Atlantique Nord (voir figure 5.8).

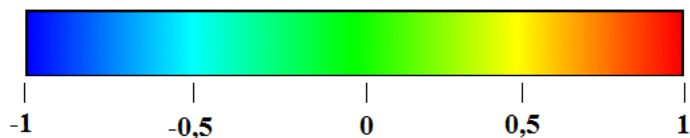
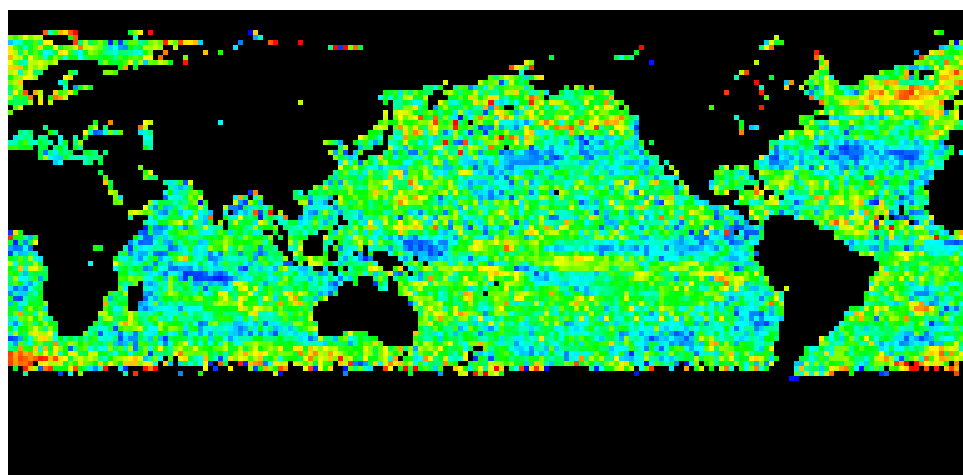


Figure 5.9 Corrélation entre la température moyenne du mois de mai et la concentration moyenne de chlorophylle au mois de mai

Au mois de mai, on remarque une zone de forte corrélation positive au sud de l'Islande (voir figure 5.9).

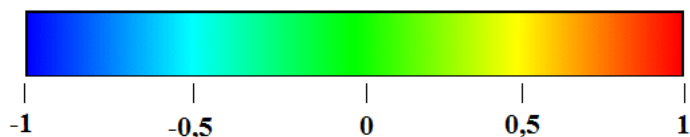
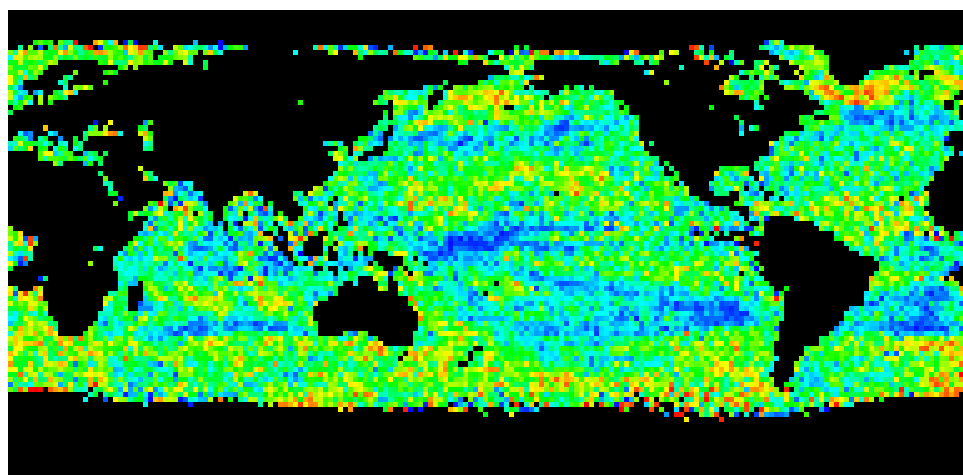


Figure 5.10 Corrélation entre la température moyenne du mois de septembre et la concentration moyenne de chlorophylle au mois de septembre

En août et septembre (la figure 5.10 présente la corrélation au mois de septembre), on retrouve la zone de forte corrélation positive au sud du Groenland.

5.1.3 Influence de la température sur le moment de la floraison

Pour chacune des années de 2003 à 2013, le moment où la floraison est maximale a été calculé en trouvant, pour chaque latitude et longitude, le mois de l'année où la concentration de phytoplancton est maximale et en utilisant une interpolation parabolique (voir section 4.5) afin de préciser le résultat.

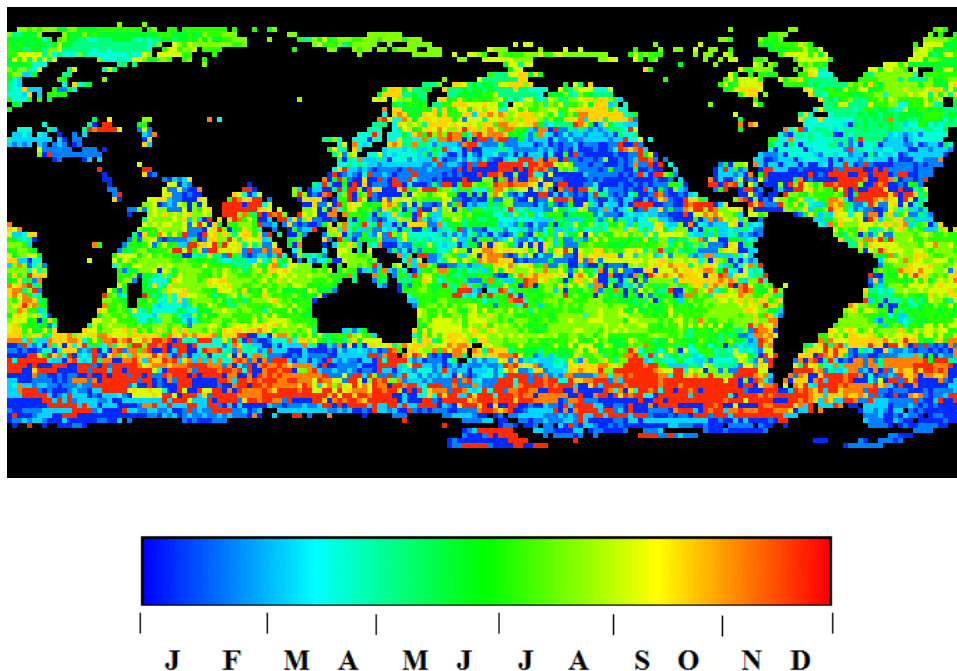


Figure 5.11 Mois du maximum de chlorophylle pour l'année 2013

À titre d'exemple, les moments de la floraison pour l'année 2013 sont présentés à la figure 5.11. Les moments de la floraison pour les autres années sont disponibles à l'annexe 5. La couleur bleue indique une floraison au mois de janvier, la couleur verte une floraison au mois de juin et la couleur rouge, une floraison au mois de décembre. Il est normal que des pixels de couleurs rouges et bleues se côtoient car une floraison à la fin décembre d'une année est proche dans le temps d'une floraison au début de janvier de l'année suivante. Il faut interpréter les résultats sur une échelle cyclique davantage que linéaire. On remarque alors que, dans l'Atlantique Nord, le maximum de la floraison a lieu en hiver dans les basses latitudes et retarde de plus en plus vers le printemps et l'été lorsque la latitude augmente.

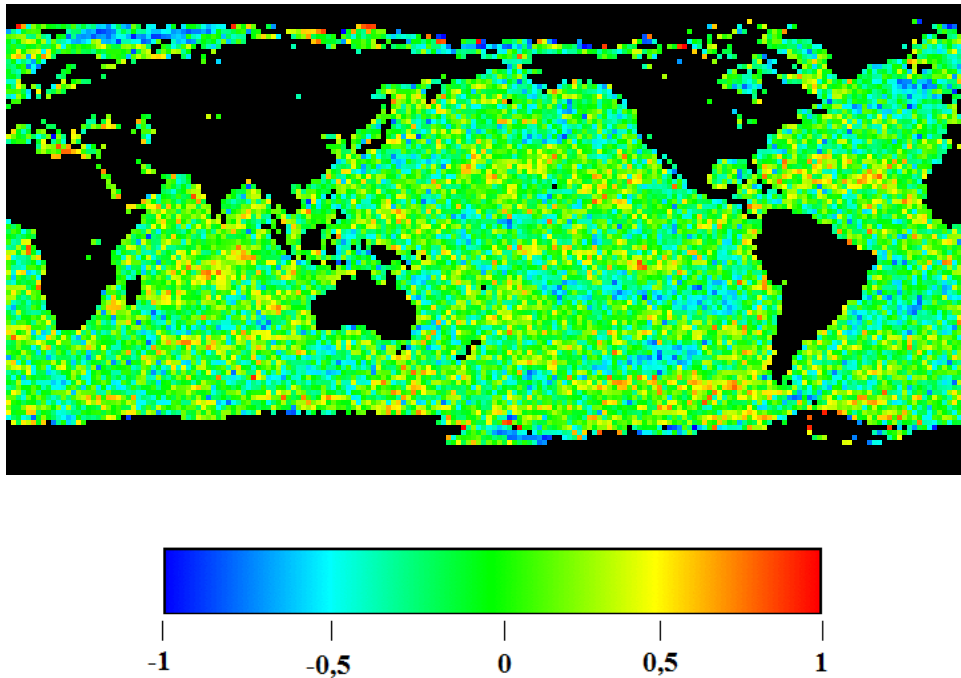


Figure 5.12 Corrélation entre la température annuelle moyenne et le moment de la floraison

La corrélation entre la température annuelle moyenne et le moment de la floraison a été calculée et est présentée à la figure 5.12. On y remarque peu de zones de forte corrélation si ce n'est une petite zone de corrélation négative au sud de l'Islande et quelques zones de corrélation positive le long du Tropique du Cancer. Une corrélation négative signifie qu'une hausse de température devance le moment de la floraison maximale tandis qu'une corrélation positive indique qu'une hausse de température retarde le moment de la floraison maximale.

5.2 Influence du vent

L'impact du vent sur le phytoplancton est analysé à l'aide des mêmes expériences que celles menées pour la température, c'est-à-dire : l'influence du vent moyen annuel sur la concentration moyenne annuelle de chlorophylle, l'influence du vent moyen mensuel sur la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle et l'influence du vent moyen annuel sur le moment où la floraison du phytoplancton est maximale.

5.2.1 Influence du vent sur la concentration moyenne annuelle de chlorophylle

La quatrième expérience consiste à évaluer l'impact du vent moyen annuel sur la concentration moyenne annuelle de chlorophylle.

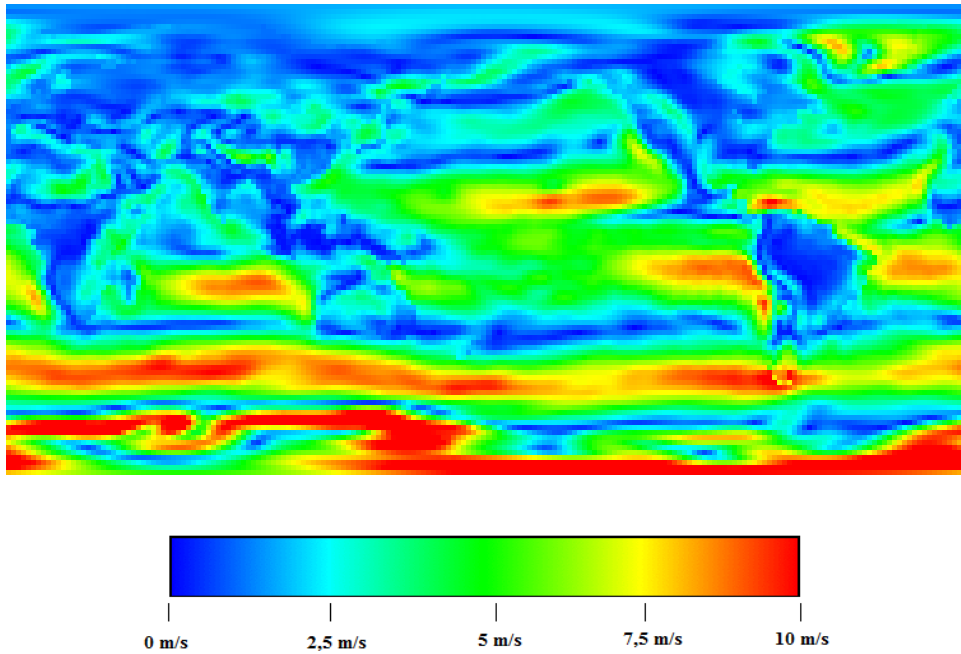


Figure 5.13 Moyenne annuelle du vent pour l'année 2013

À titre d'exemple, la vitesse moyenne annuelle du vent (calculée à l'aide de la norme, voir section 4.6) pour l'année 2013 est présentée à la figure 5.13. Les autres années sont disponibles à l'annexe 6.

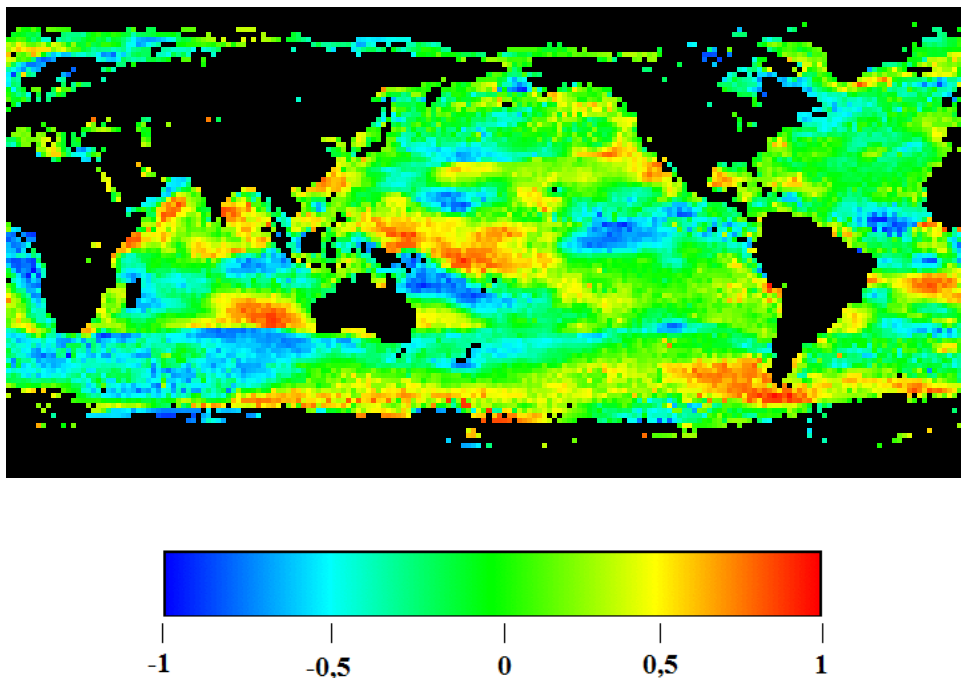


Figure 5.14 Corrélation entre la vitesse du vent annuelle et la concentration annuelle de chlorophylle

La figure suivante (5.14) illustre la corrélation entre la vitesse du vent annuelle et la concentration annuelle de chlorophylle. Selon cette image, le vent annuel semble avoir peu d'influence sur le phytoplancton dans l'Atlantique Nord, mais on y retrouve d'impressionnantes zones de corrélation positives et négatives ailleurs sur la Terre!

5.2.2 Influence du vent sur la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle

L'intensité moyenne mensuelle du vent a été corrélée avec la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle. Les résultats complets sont disponibles à l'annexe 7. Seuls les mois avec des observations intéressantes sont présentés dans cette section.

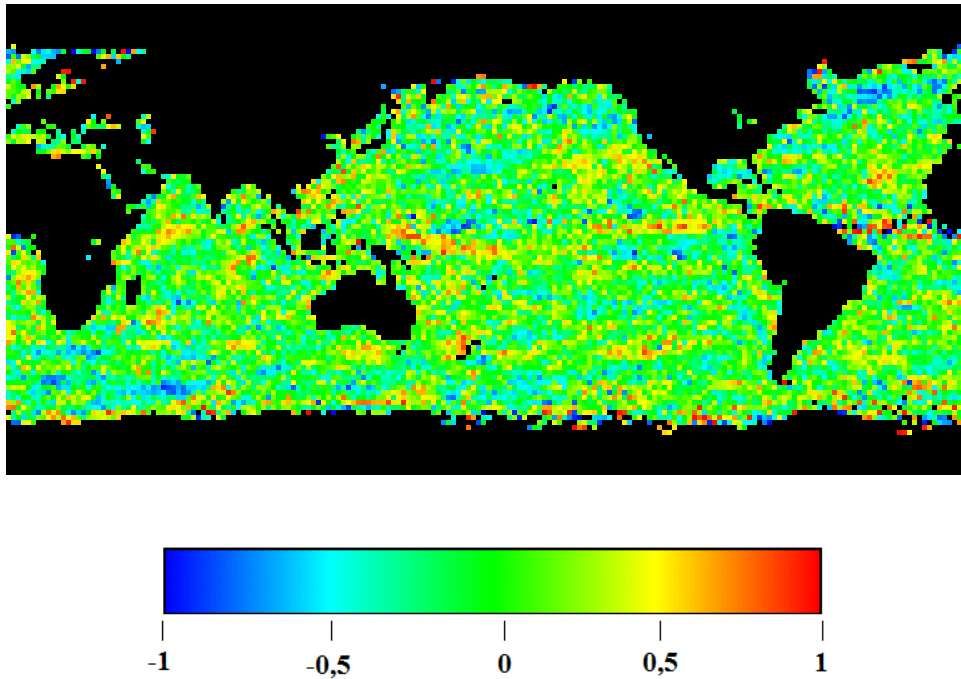


Figure 5.15 Corrélation entre la vitesse moyenne mensuelle du vent en mars et la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle en mars

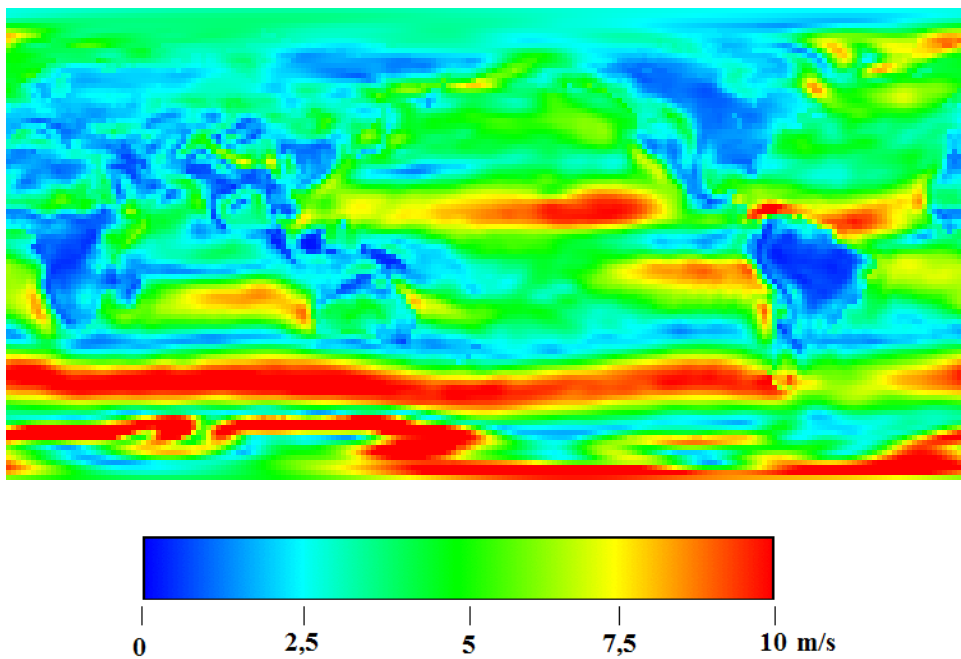


Figure 5.16 Moyenne de l'intensité du vent en mars

Au mois de mars (voir figure 5.15), on observe quelques zones de corrélations négatives dans le nord de l'Atlantique. La moyenne de l'intensité du vent en mars est présentée à la figure 5.16. À cette époque de l'année et à cet endroit, les vents d'est polaires sont assez forts.

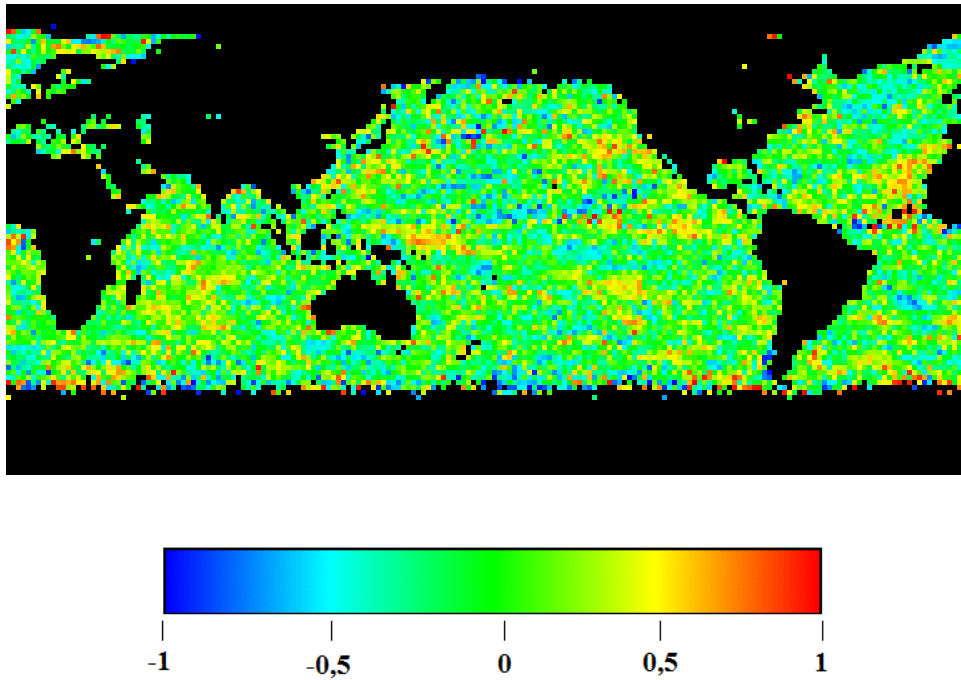


Figure 5.17 Corrélation entre la vitesse moyenne mensuelle du vent en mai et la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle en mai

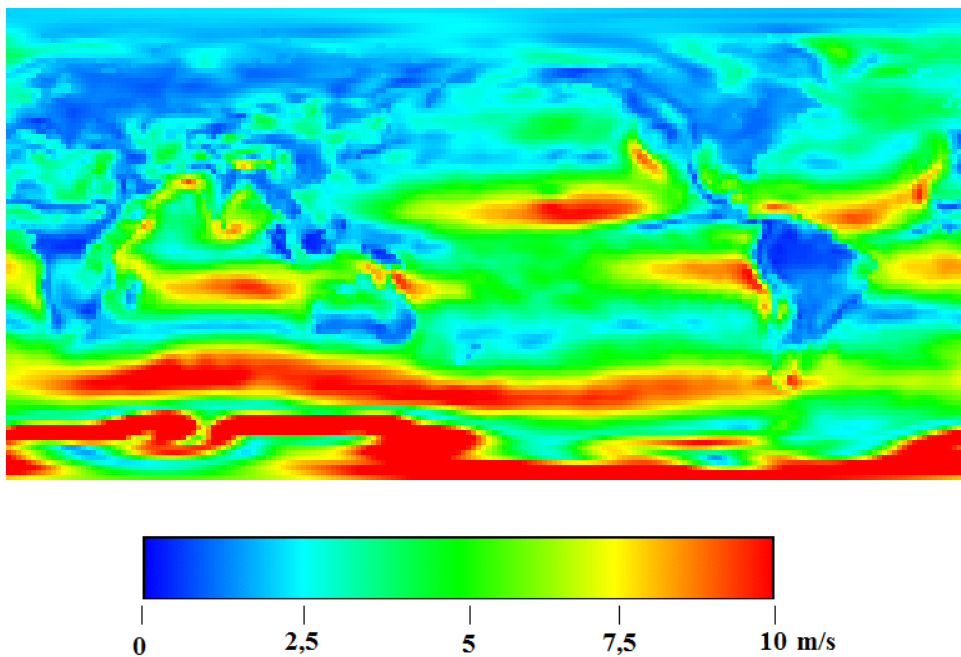


Figure 5.18 Moyenne de l'intensité du vent en mai

Au mois de mai (voir figure 5.17), une zone de corrélation positive est observable à l'ouest du continent africain. Au mois de mai et à l'ouest de l'Afrique, les Alizés du Nord-Est soufflent intensément comme le démontre la figure 5.18.

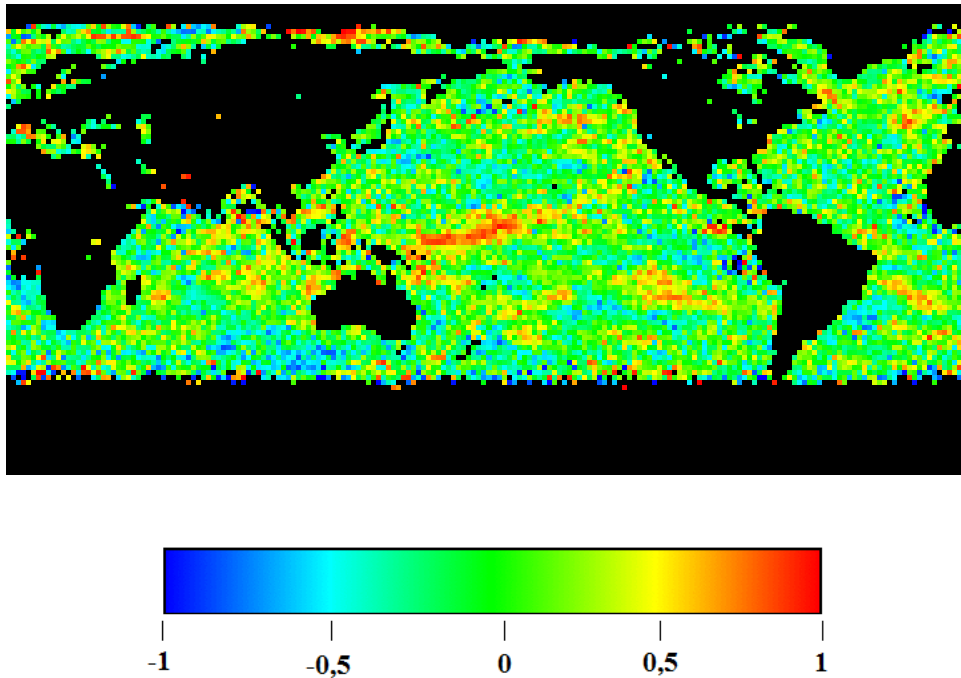


Figure 5.19 Corrélation entre la vitesse moyenne mensuelle du vent en août et la concentration moyenne mensuelle de chlorophylle en août

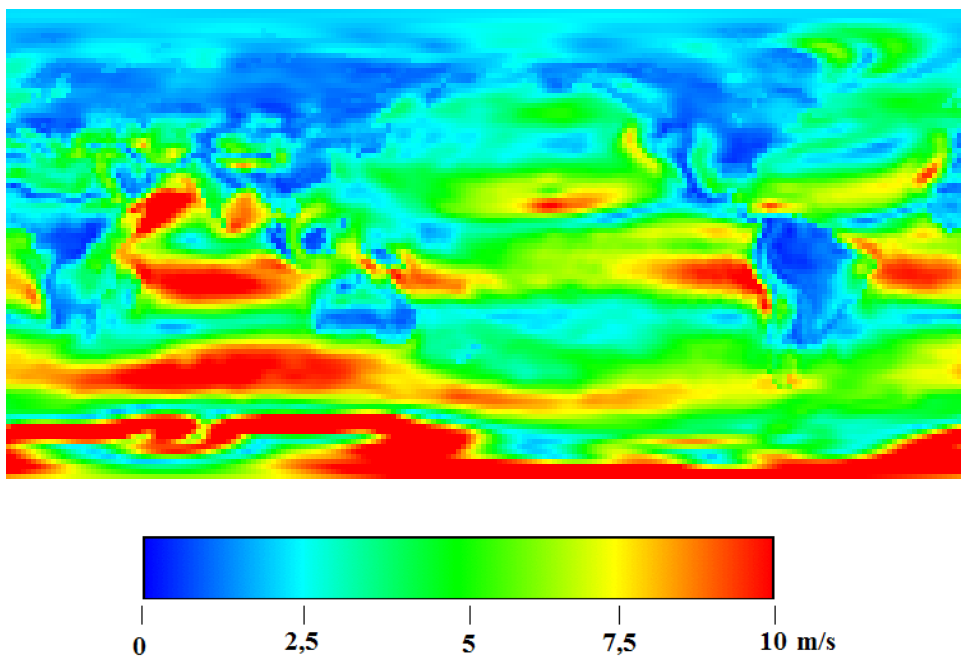


Figure 5.20 Moyenne de l'intensité du vent en août

Au mois d'août, quelques régions de l'Atlantique Nord présentent des corrélations positives (voir figure 5.19) et ce, malgré le fait que le vent est peu présent dans cette région en été (voir figure 5.20).

5.2.3 Influence du vent sur le moment de la floraison

La dernière expérience consiste à évaluer l'impact du vent annuel sur le moment où la floraison du phytoplancton est maximale. L'approche utilisée pour déterminer le moment de la floraison maximale

est la même que celle utilisée à la section 5.1.3, c'est-à-dire une recherche du maximum et une interpolation parabolique. Par contre, les résultats obtenus ont été corrélés non pas avec la température, mais avec l'intensité annuelle du vent. L'image obtenue est présentée à la figure 5.21.

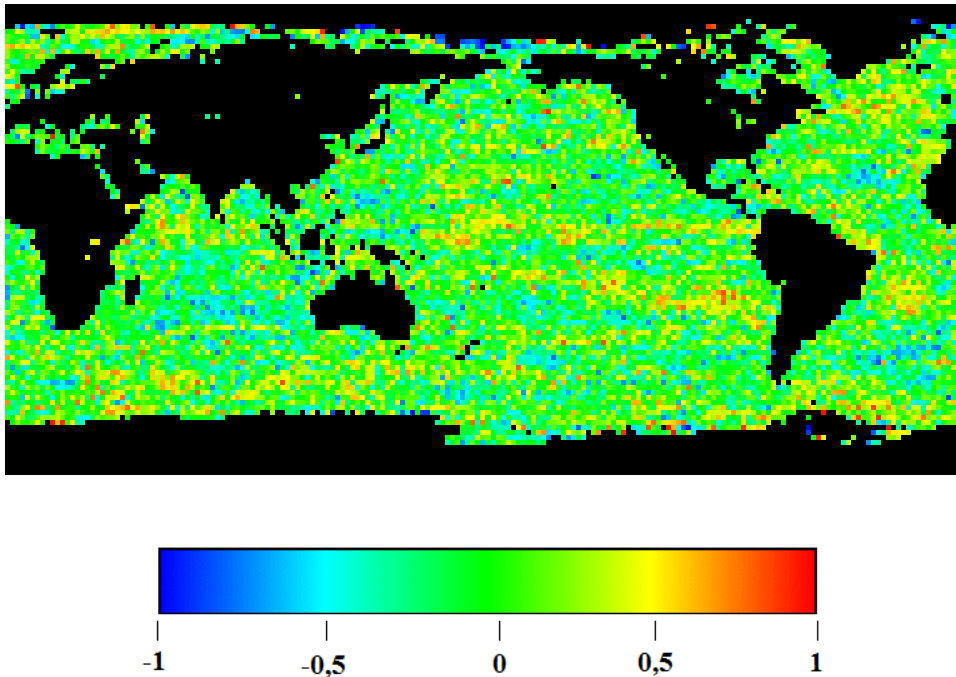


Figure 5.21 Corrélation entre l'intensité annuelle du vent et le moment de la floraison

On y dénote peu de zones de forte corrélation si ce n'est çà et là quelques points de corrélation positive au nord de l'Atlantique Nord et quelques points de corrélation négative au sud de l'Atlantique Nord. Une corrélation positive indique qu'un vent fort retarde la floraison, tandis qu'une corrélation négative indique qu'un vent fort devance la floraison.

Les moments de floraison maximale sont disponibles à l'annexe 5 et les vents annuels, à l'annexe 3.

5.3 Autres expérimentations

Pour fins de clarté, les résultats de plusieurs expérimentations menées ne sont pas explicités dans le présent ouvrage car les résultats n'apportaient aucune observation probante ou les techniques utilisées se sont avérées discutables.

Par exemple, la concentration de chlorophylle de chacun des mois a été corrélée avec, non pas la température mensuelle du même mois, mais avec la température mensuelle de chacun des douze mois précédents. Aucun résultat plus significatif que les relations entre la concentration de chlorophylle et la température au cours du même mois (voir section 5.1.2) n'a été observé.

Ensuite, dans le même ordre d'idées, la concentration de chlorophylle mensuelle de chacun des pixels a été corrélée avec la température mensuelle de son voisinage en reculant dans le temps. La position dans le temps et l'espace qui obtenait la meilleure corrélation a été conservée. Les résultats étaient

stupéfiants! Trop beaux pour être vrai! Statistiquement, on trouve toujours une bonne corrélation si l'on cherche assez longtemps! Le nombre d'années disponibles (11) ne permet pas ce genre d'expérience. L'avenue est toutefois intéressante car il suppose que le phytoplancton se déplace. Il faudrait pour améliorer l'expérience intégrer un modèle numérique des courants océaniques.

Plusieurs expériences ont été effectuées afin de déterminer s'il y a une corrélation entre la température, le vent, le début de la floraison et la durée de la floraison. Deux techniques ont été utilisées afin de calculer le début de la floraison : le moment où la concentration dépasse la moyenne annuelle et le moment où l'accélération positive de la concentration (la dérivée numérique d'ordre 1) est maximale. La durée a été évaluée en calculant le temps entre l'accélération maximale positive et l'accélération maximale négative. Le début de la floraison étant une mesure plus volatile que le moment où se produit la concentration maximale (voir section 5.1.3), aucune relation plus intéressante n'a été observée.

Finalement, des statistiques globales sur toute la surface de l'Atlantique Nord ont été calculées. Des régressions linéaires multivariées ont été utilisées afin d'établir une relation mathématique entre la concentration globale du phytoplancton pour un mois donné et la température et le vent des mois précédents. Les résultats étaient parfois intéressants, mais une analyse plus attentive a démontré qu'il serait difficile de les relier à la théorie puisque deux mois consécutifs pouvaient avoir l'un une influence fortement positive et l'autre fortement négative. Une fois de plus, le nombre de données (11 années) à peine supérieur au nombre de paramètres recherchés (4 ou 5) ne permet pas aux calculs de corrélation de donner des résultats fiables.

Des régressions linéaires simples ont aussi été calculées, mais aucun résultat concluant n'a été obtenu. La vaste surface de l'Atlantique Nord considérée abrite des phénomènes trop différents comme le démontrent les expériences explicitées plus haut. Une avenue intéressante serait d'étudier les statistiques globales sur des surfaces choisies de telle sorte qu'elles aient des propriétés physico-chimiques uniformes, connues sous le nom de provinces océaniques.

6 ANALYSE

Les expériences ont démontré que la température et le vent ont des impacts, qu'ils soient directs ou indirects, sur la concentration de chlorophylle et, par le fait même, sur la quantité de phytoplancton et le moment où la floraison est maximale. Afin de comprendre les relations observées, il faut tenir compte du comportement du phytoplancton qui est différent d'une région à l'autre de l'Atlantique Nord. Les régions utilisées pour le fins de l'analyse sont celles décrites par Tobaada et Anadon : le nord où la floraison est printanière seulement, le centre où la floraison est hivernale et printanière, le sud où la floraison est hivernale seulement et les autres endroits où il n'a pas de floraison détectable. Pour les fins de cette analyse, cette dernière région sera passée sous silence puisqu'elle sort des limites de l'Atlantique Nord.

6.1 Le sud de l'Atlantique Nord

Selon Tobaada et Anadon, la floraison le long du Tropique du Cancer survient seulement à l'hiver (Tobaada et Anadon, 2013). À cet endroit, la lumière est abondante tout au long de l'année, la croissance du phytoplancton est donc davantage limitée par la quantité de nutriments et la présence de prédateurs. Une température plus chaude augmente la stratification ce qui empêche les nutriments des eaux plus profondes de remonter à la surface. De plus, une plus grande stratification augmente le couplage entre le phytoplancton et ses prédateurs, ce qui diminue l'effet de dilution décrit par Behrenfeld (Behrenfeld, 2010). Cela confirme l'hypothèse de Winder et Sommer qui avance qu'une hausse de température est davantage profitable au métabolisme des prédateurs hétérotrophes qu'au phytoplancton autotrophe (Winder et Sommer, 2012). Au total, le réchauffement de l'eau augmente la perte davantage que la production. Les bandes de corrélation fortement négative entre la température moyenne annuelle et la concentration de chlorophylle observées le long du Tropique du Cancer sont donc en accord avec les théories actuelles. De plus, Behrenfeld a fait les mêmes observations en 2006 (Behrenfeld et autres, 2006). Selon Tobaada et Anadon, la floraison hivernale au niveau du Tropique du Cancer a lieu de janvier à mars (voir figure 2.4). Cette hypothèse est confirmée par les expériences sur la recherche du moment de la floraison menées au cours de cet essai (voir figure 5.11). Il n'est donc pas étonnant de retrouver les plus fortes bandes de corrélation négative aux mois de janvier, février et mars (voir annexe 4). Quoique de façon moins claire, les expériences ont aussi démontré qu'un réchauffement des températures a tendance à retarder la floraison.

Les points de corrélation négative entre le vent annuel moyen et le début de la floraison indiquent que le vent devance la floraison hivernale en favorisant une couche de mélange plus profonde et donc un découplage plus rapide entre le phytoplancton et ses proies.

6.2 Le centre de l'Atlantique Nord

Au centre de l'Atlantique Nord, là où il y a une floraison hivernale et printanière, l'augmentation de la température annuelle moyenne a un double effet sur la production du phytoplancton. L'hiver, une température plus élevée limite l'effet de dilution et réduit donc le découplage entre le phytoplancton et ses prédateurs. La floraison est alors de moindre intensité à l'hiver. À l'inverse, une plus haute température au printemps augmente la stratification et permet donc au phytoplancton de profiter davantage de l'augmentation de la luminosité. La floraison est plus abondante au printemps. Annuellement, les deux effets opposés semblent s'annuler. Ce qui explique les bandes de corrélation faible au centre de l'Atlantique Nord.

6.3 Le nord de l'Atlantique Nord

Au nord, la floraison a lieu uniquement au printemps. Une hausse annuelle de la température a donc un effet positif sur la concentration annuelle de phytoplancton puisque l'impact négatif sur la floraison hivernale n'est pas présent à ces latitudes. Selon Tobaoda et Anadon (voir figure 2.4) et selon le calcul du moment de floraison (voir figure 5.11), c'est en mai que débute la floraison avec un maximum en mai ou en juin. Il est donc logique que, dans cette région, le moment de l'année où la température a la plus grande influence sur la concentration de phytoplancton se situe au mois de mai (voir figure 5.10). De plus, la fonte des banquises apporte localement des nutriments (Winder et Sommer, 2012). On observe effectivement plusieurs points de corrélation négative aux frontières de l'Arctique et de l'Antarctique, annuellement et mensuellement. Une meilleure stratification et l'apport de nutriments par la fonte des banquises expliquent les zones de corrélation fortement positives observées au sud du Groenland.

Les expériences ont aussi démontré que la floraison a tendance à devancer lorsque la température augmente. Cela s'explique par le fait qu'une hausse des températures permet une stratification plus hâtivement dans l'année et le phytoplancton peut donc profiter plus rapidement de l'augmentation de l'ensoleillement.

En mai, les vents polaires d'est influencent négativement la concentration de phytoplancton car en favorisant le brassage des eaux, le vent limite la création d'une couche de mélange moins profonde. Au mois d'août, lorsque la stratification est bien établie et que les nutriments ont été consommés, le vent, quoique faible à cette période de l'année, pourrait stimuler le brassage des eaux apportant ainsi de nouveaux nutriments et découplant le phytoplancton de ses prédateurs. Près des côtes, le vent emporte des nutriments de la terre vers la mer.

Les points de corrélation positive entre le vent annuel moyen et le début de la floraison indiquent que le vent retarde la floraison printanière tel que déjà mentionné par Henson et autres car la stratification prend plus de temps à s'établir (Henson et autres, 2006).

CONCLUSION

L'objectif de cet essai consistait à extraire les données de reconstruction climatique NCEP/NCARR, à extraire les données sur la concentration de phytoplancton à partir des images du satellite MODIS/Aqua et à modifier les données de façon à obtenir une base commune comparable afin d'établir des relations empiriques entre les concentrations de phytoplancton et les paramètres météorologiques. En ce sens, l'objectif de départ a été pleinement atteint puisque nombre de relations ont été démontrées entre la température, le vent et la production de phytoplancton. Qui plus est, ces relations sont en accord avec les théories actuellement acceptées sur le comportement du phytoplancton.

Ce travail établit de nombreuses bases méthodologiques et théoriques sur l'étude des relations entre la météorologie et la concentration du phytoplancton. Des expérimentations futures pourraient intégrer d'autres facteurs météorologiques (les précipitations, la pression, la couverture nuageuse, etc.) et plusieurs autres caractéristiques de la floraison (son début, son intensité maximale, sa durée, sa trajectoire, sa composition, etc.). De plus, l'étude pourrait s'élargir au-delà de l'Atlantique Nord, c'est-à-dire à la grandeur de la planète.

La résolution spatiale des expérimentations étant limitée par la précision des données NCEP/NCAR, il faudrait dénicher des données météorologiques plus précises. Cela permettrait de profiter de la haute résolution des images de concentration de phytoplancton de MODIS/Aqua. Les expérimentations utilisent des données générées par le satellite Aqua échelonnées sur onze années de 2003 à 2013. Cela peut paraître beaucoup, mais la floraison étant un phénomène annuel, cela ne représente que onze répétitions. Afin d'améliorer la fiabilité des analyses statistiques, les informations d'autres missions antérieures (MODIS/Terra, SeaWiFS, CZCS, etc.) pourraient être utilisées. Les outils mathématiques, relativement simples, appliqués dans le présent essai, supposent que les relations entre les facteurs météorologiques et les caractéristiques de la floraison sont linéaires et unifactoriels. Des régressions polynomiales d'ordre supérieur et des analyses multivariées pourraient être utilisées afin de découvrir des relations plus complexes et de les décrire. Par contre, comme déjà mentionné à la section 5.3, ce type d'analyse nécessite plus de données pour être crédible.

Cet essai confirme plusieurs conclusions de recherches sur les impacts de la météorologie sur le phytoplancton. Globalement, ces études sont importantes afin de mieux comprendre le fonctionnement de la pompe carbonique océanique. Elles permettent de raffiner les modèles climatiques utilisés par les scientifiques afin de prédire l'ampleur et les effets du réchauffement climatique. Localement, une meilleure compréhension du comportement du phytoplancton et de ses réactions aux conditions physicochimiques de son environnement améliore les modèles de gestion éco-responsable des pêches et les systèmes de détection des marées rouges.

En résumé, un réchauffement des températures diminue la production de phytoplancton au niveau du Tropique du Cancer et augmente la production plus au nord. Cet essai confirme donc aussi le principe

bien connu qui veut que le réchauffement climatique provoque une migration des écosystèmes vers les pôles. Les écosystèmes marins n'y feraient donc pas exception.

RÉFÉRENCES

- Behrenfeld, M.J. (2010). Adandoning Sverdrup's Critical Depth Hypothosis on phytoplankton blooms. *Ecology*, vol. 4, n° 91, p. 977-989.
- Behrenfeld, M.J., O'Malley, R.T., Siegel, D.A., McClain, C.R., Sarmiento, J.L., Feldman, G.C., Milligan, A.J., Falkowski, P.G., Letelier, r.M. et Boss, E.S. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, vol. 444, p. 752-755.
- Blondeau-Patissier, D., Gower, J.F.R., Dekker, A.G., Phinn, S.R. et Brando, V.E. (2013). A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. *Progress in Oceanography*,
- Christopher, B., Behrenfeld, M.J., Randerson, J.T. et Falkowski, P.G. (1998). Primary Production of the Biosphere : Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science*, vol. 281, n° 5374, p. 237-237.
- Doney, S.C. (2006). Plankton in a warmer wolrd. *Nature*, vol. 444, p. 695-696.
- Franz, B. (2007). MODIS Ocean Data Processing. In Ocean Biology Processing Group. *Ocean Color Web*. http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/Presentations/seadas_umbc_franz.pdf (Page consultée le 17 juin 2014).
- Graham, S. (2014). Overview. In National Aeronautics and Space Administration. *Aqua project science*. <http://aqua.nasa.gov/> (Page consultée le 3 août 2014).
- Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) (2013). Changements climatiques 2013, les éléments scientifiques. In Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change*. http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/docs/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf (Page consultée le 28 janvier 2014).
- HDF Group (2013). About the HDF Group. In HDF Group. *The HDF Group*. <http://www.hdfgroup.org/about/> (Page consultée le 24 mars 2014).
- Henson, S.A., Robinson, I., T. Allen, J. et J. Waniek, J. (2006). Effect of meteorological conditions on interannual variability in timing and magnitude of the spring bloom in the Irminger Basin. *Deep-Sea Research*, vol. I, n° 53, p. 1601-1615.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R. et Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. In National Center for Atmospheric Research. *CISL Reseach data archive for Atmospheric and Geosciences*. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds090.0/docs/bams/bams1996mar/bams1996mar-bm.pdf> (Page consultée le 7 juillet 2014).
- Larousse (2014). Dictionnaire Larousse en ligne. In Éditions Larousse. *Dictionnaire Larousse en ligne*. <http://www.larousse.fr/> (Page consultée le 7 septembre 2014).
- Lindsey, R. et Scott, M. (2010). What are Phytoplankton? In NASA Earth Observatory. *NASA Earth Observatory*. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Phytoplankton/> (Page consultée le 2 février 2014).
- Maccherone, B. (2014). About MODIS. In National Aeronautics and Space Administration. *MODIS*. <http://modis.gsfc.nasa.gov/> (Page consultée le 7 juillet 2014).

- May, P. (2014). Chlorophyll. *In* School of Chemistry, University of Bristol. *School of Chemistry, University of Bristol*. http://www.chm.bris.ac.uk/motm/chlorophyll/chlorophyll_h.htm (Page consultée le 1 juin 2014).
- National Aeronautics and Space Administration (2014). Ocean Color Web. *In* National Aeronautics and Space Administration. *Ocean Color Web*. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> (Page consultée le 23 mars 2014).
- National Oceanic And Atmospheric Administration (2014). PSD Climate Research Data Resources and Help. *In* National Oceanic And Atmospheric Administration. *Earth System Research Laboratory, Physical Science Division*. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/help.html#readnetcdf> (Page consultée le 23 mars 2014).
- National Weather Service (2014). About NOAA's National Weather Service. *In* National Oceanic And Atmospheric Administration. *National Weather Service*. <http://www.weather.gov/about> (Page consultée le 7 juillet 2014).
- NOAA's Center for Operational Oceanographic Products and Services (CO-OPS) (2013). NOAA Harmful Algal Bloom Operational Forecast System. *In* National Oceanic And Atmospheric Administration. *Tides and currents*. <http://tidesandcurrents.noaa.gov/hab/overview.html> (Page consultée le 15 juillet 2014).
- O'Reilly, J.E., Maritorena, S., O'Brien, M.C., Siegel, D.A., Toole, D., Menzies, D.S., R.C., Mueller, J.L., Mitchell, B.G., Kahru, M., Chavez, F.P., Strutton, P., Cota, G.F., Hooker, S.B., McClain, C.R., Carder, K.L., Muller-Karger, F., Harding, L., Magnuson, A., Phinney, D., Moore, G.F., Aiken, J., Arrigo, K.R., Letelier, R. et Culver, M. (2000). SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses. *In* NASA Goddard Space Flight Center. *Ocean Color Web*. http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/REPROCESSING/SeaWiFS/R3/Documents/postlaunch_Volume_11.pdf (Page consultée le 17 juin 2014).
- Proctor, C. (2013). NOMAD : NASA bio-Optical Marine Algorithm Dataset. *In* Ocean Biology Processing Group. *SeaWiFS Bio-optical Archive and Storage System*. <http://seabass.gsfc.nasa.gov/wiki/article.cgi?article=NOMAD> (Page consultée le 17 juin 2014).
- Sverdrup, H.U. (1955). The place of physical oceanography in oceanographic research. *Journal of Marine Research*, vol. 14, n° 4, p. 287-294.
- Taboada, F.G. et Anadon, R. (2013). Seasonality of North Atlantic phytoplankton from space : impact of environmental forcing on a changing phenology (1998-2012). *Global Change Biology*, vol. 20, p. 698-712.
- Thomas, D. et Franz, B. (2005). Overview of MODIS Aqua Data Processing and Distribution. *In* Ocean Biology Processing Group. *Ocean Color Documents*. http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/MODISA_processing.html (Page consultée le 17 juin 2014).
- Townsend, D.W. (2012). *Oceanography and Marine Biology, An Introduction to Marine Science*. Sunderland, Massachusetts, USA, Sinauer Associates, Inc., 512 p.
- University Corporation for Atmospheric Research (2014). Network Common Data Form. *In* University Corporation for Atmospheric Research. *Unidata*. <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/index.html> (Page consultée le 10 août 2014).
- Werdell, J. (2010). Ocean Color Chlorophyll (OC) v6. *In* NASA Ocean Biology Processing Group. *Ocean Color Web*. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/REPROCESSING/R2009/ocv6/> (Page consultée le 5 août 2014).
- Winder, M. et Sommer, U. (2012). Phytoplankton response to a changing climate. *Hydrobiologia*, p. 5-16.

Zhai, L., Platt, T., Tang, C., Sathyendranath, S. et Walne, A. (2013). The response of phytoplankton to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. *Deep-Sea Research II*, vol. 93, p. 159-168.

ANNEXE 1 - BANDES SPECTRALES DE MODIS ET LEURS UTILISATIONS

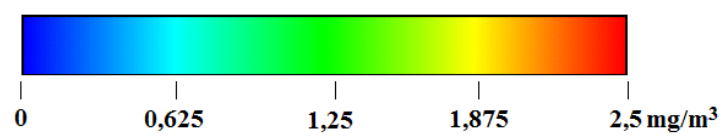
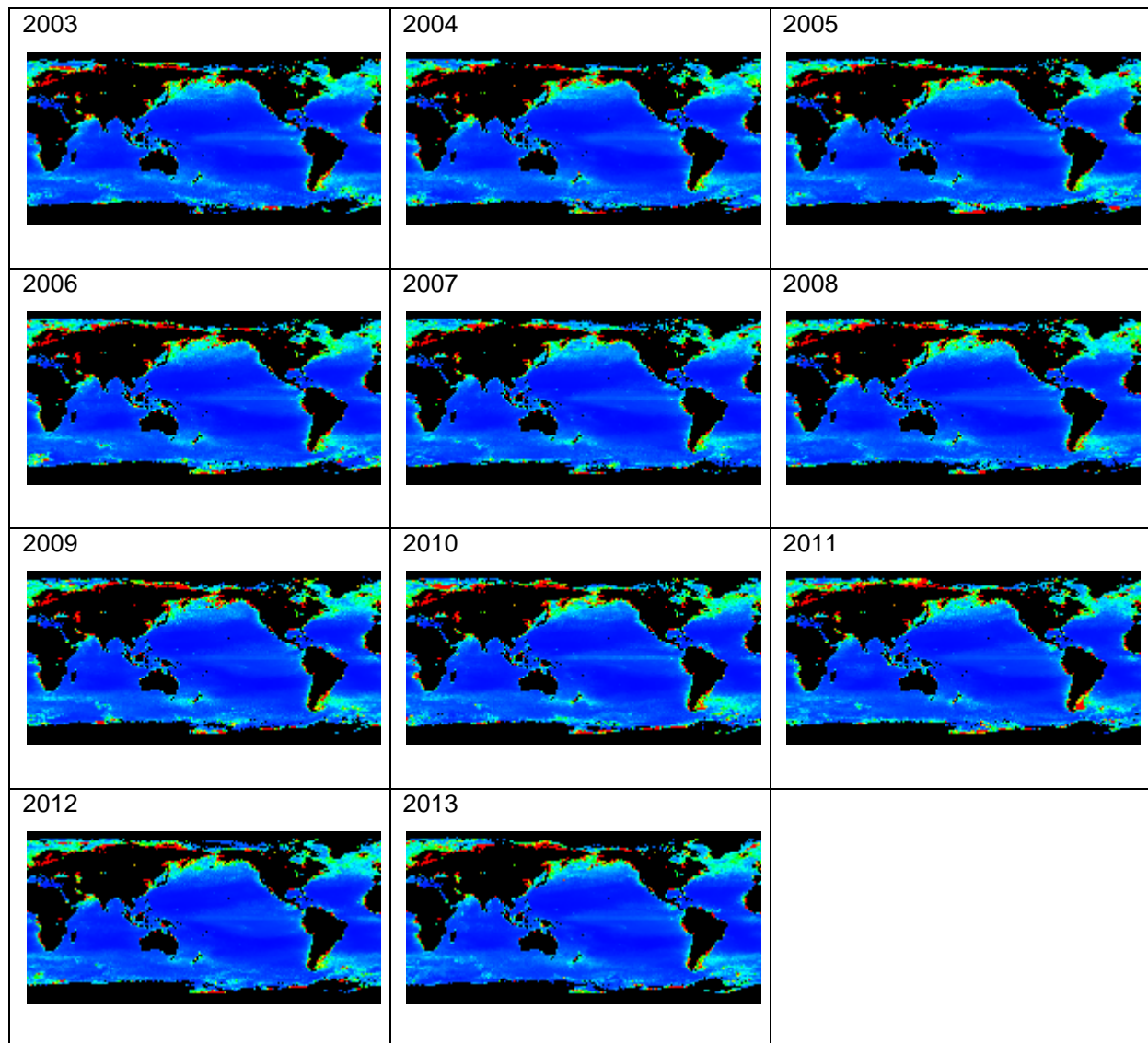
Maccherone, 2014

Primary Use	Band	Bandwidth	Spectral Radiance	Required SNR
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1.0	110
Ocean Color/ Phytoplankton/ Biogeochemistry	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21.0	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
	16	862 - 877	6.2	516
Atmospheric Water Vapor	17	890 - 920	10.0	167
	18	931 - 941	3.6	57
	19	915 - 965	15.0	250

Primary Use	Band	Bandwidth	Spectral Radiance	Required NE[delta]T(K) ⁴
Surface/Cloud Temperature	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0.05
	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2.00
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.07
	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.07
Atmospheric Temperature	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.25
	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.25
Cirrus Clouds Water Vapor	26	1.360 - 1.390	6.00	150(SNR)
	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0.25
Cloud Properties	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	0.05
Ozone	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	0.25
Surface/Cloud Temperature	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	0.05
	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	0.05
Cloud Top Altitude	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0.25
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0.35

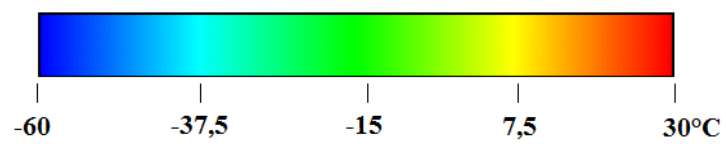
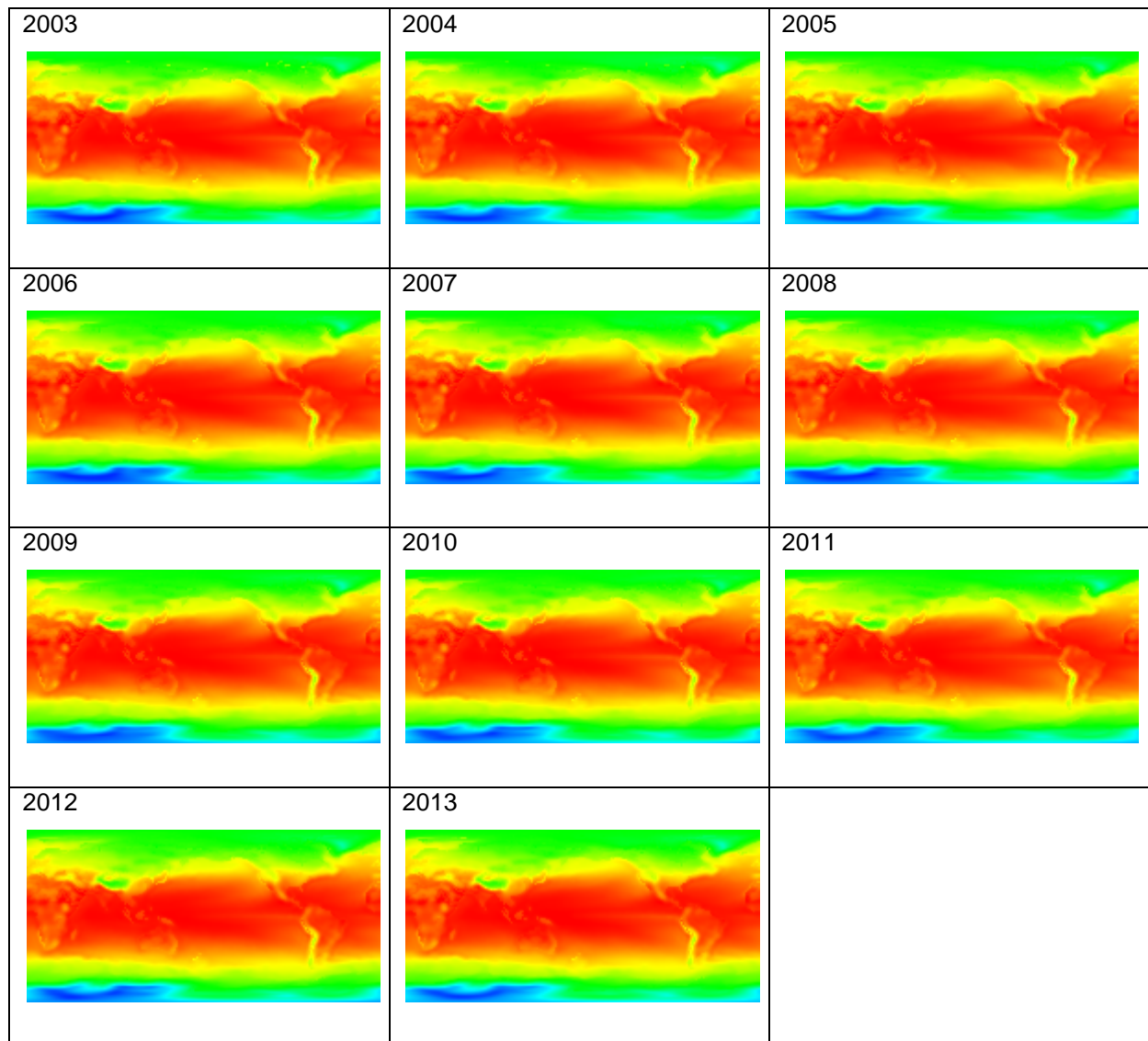
ANNEXE 2 - CONCENTRATION MOYENNE ANNUELLE DE CHLOROPHYLLE DE 2003 À 2013

Résolution : 1 année, 1,904 degré de latitude, 1,875 de longitude.



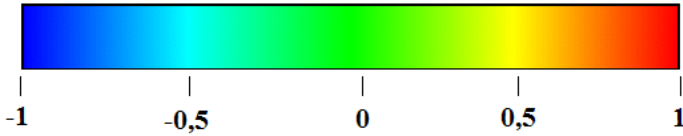
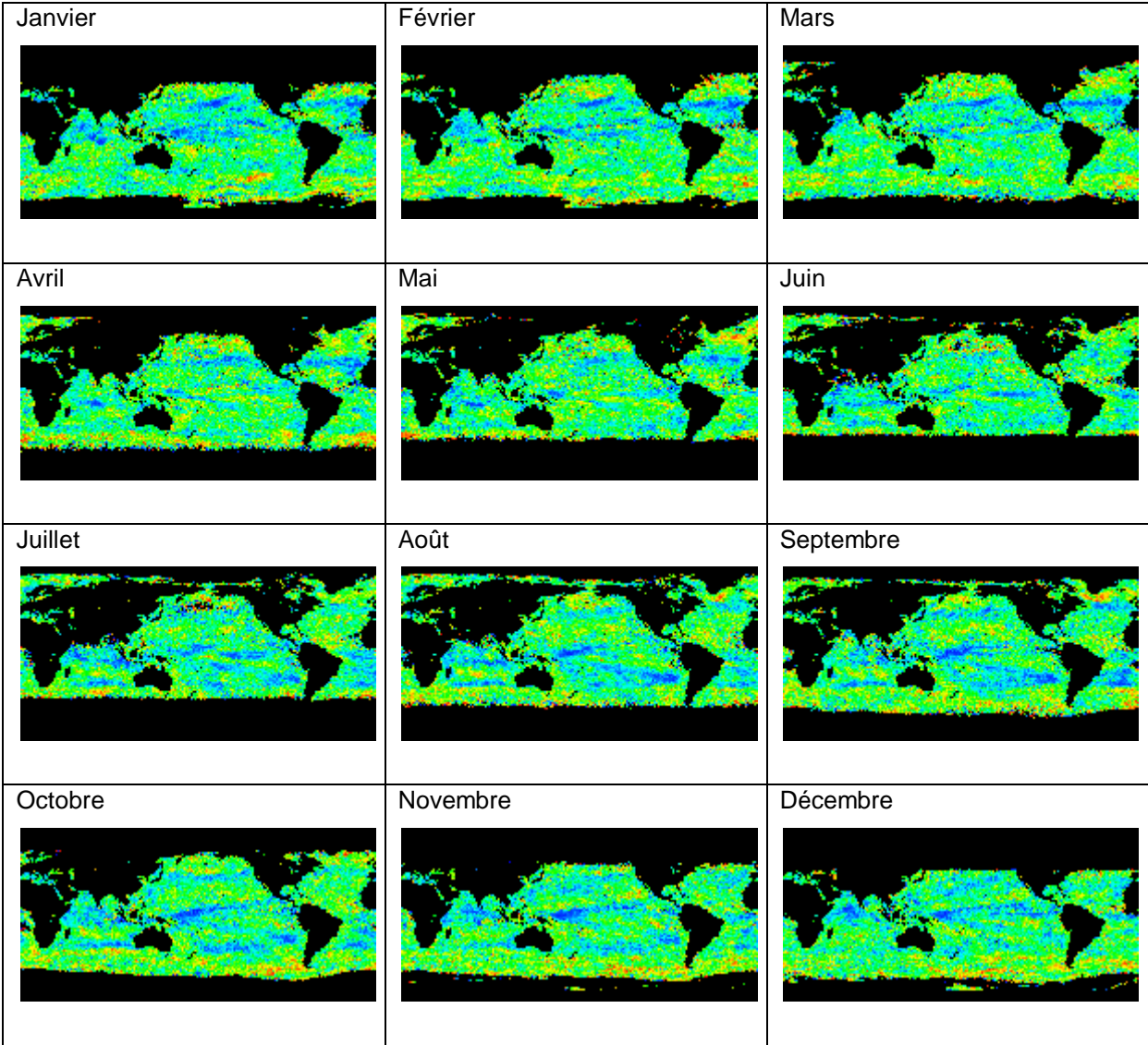
ANNEXE 3 - TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE DE 2003 À 2013

Résolution : 1 année, 1,904 degré de latitude, 1,875 de longitude.



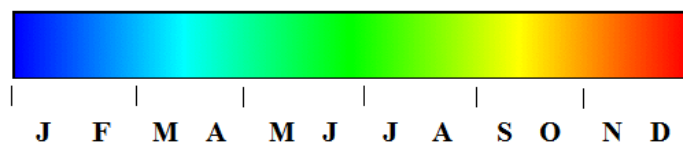
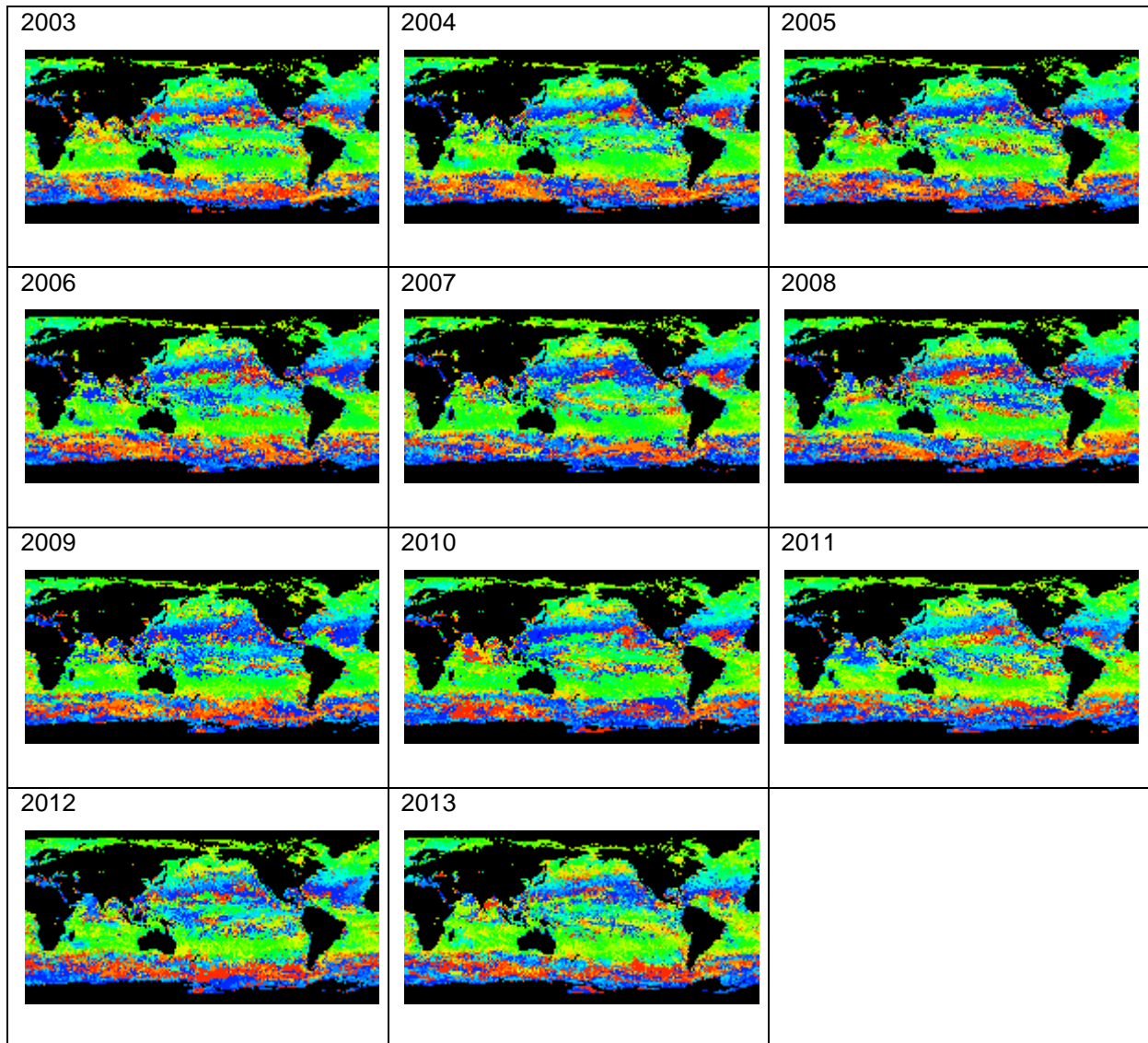
ANNEXE 4 - CORRÉLATION ENTRE LA TEMPÉRATURE MOYENNE MENSUELLE ET LA CONCENTRATION MOYENNE MENSUELLE DE CHLOROPHYLLE

Résolution : 1 mois, 1,904 degré de latitude, 1,875 de longitude.



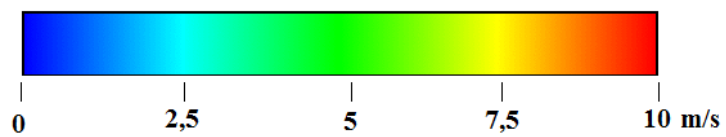
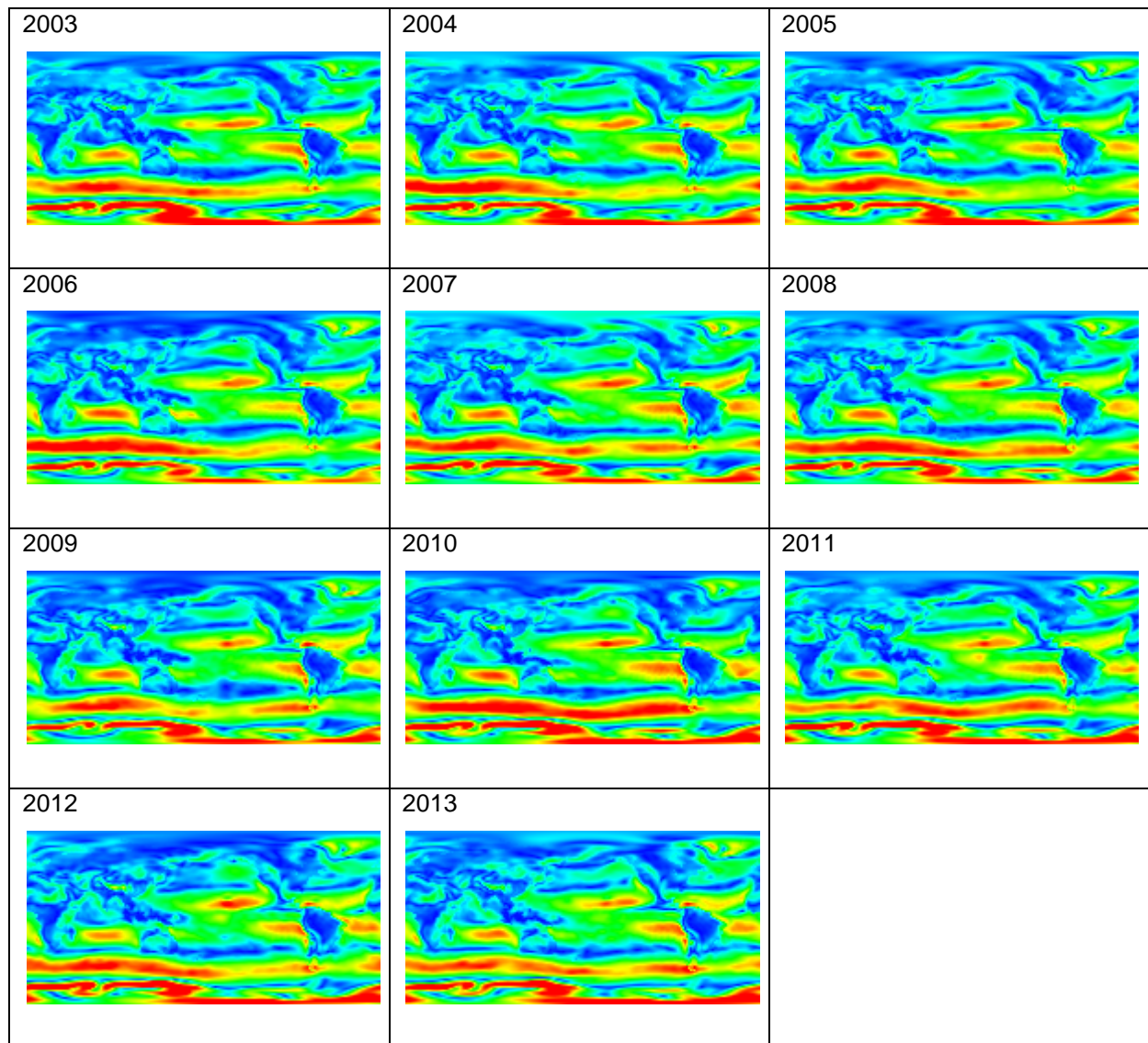
ANNEXE 5 - DU MAXIMUM DE CHLOROPHYLLE

Résolution : 1 année, 1,904 degré de latitude, 1,875 de longitude.



ANNEXE 6 - MOYENNE ANNUELLE DES VENTS

Résolution : 1 année, 1,904 degré de latitude, 1,875 degré de longitude.



ANNEXE 7 - CORRÉLATION ENTRE LA VITESSE MOYENNE MENSUELLE DU VENT ET LA CONCENTRATION MOYENNE MENSUELLE DE CHLOROPHYLLE

Résolution : 1 mois, 1,904 degré de latitude, 1,875 de longitude.

