

Aix-Marseille Université

Master Recherche d'Océanographie 2^{ème} années

OPB 304 - Modélisation

Responsables : Mme M. Baklouti et M F. Diaz

**Impact du changement climatique sur l'écosystème pélagique planctonique :
effets de l'augmentation de la température et de l'abondance de CO2 dans
l'atmosphère.**

Par Sébastien Le clec'h
Sebastien.leclech@gmail.com



Janvier 2014

Sommaire

1) Introduction.....	2
2) Simulation de référence (simulation 1).....	3
a) Caractéristiques physiques.....	3
b) Phytoplancton.	3
c) Zooplanctons et bactéries.	4
d) Le système des carbonates.	4
3) Impact de la variation du coefficient de mélange sur les distributions.	5
a) Augmentation du coefficient de mélange (Simulation 2).	5
b) Diminution du coefficient de mélange (Simulation 3).	5
c) Devenir du coefficient de mélange dans l’océan futur.	5
d) Evolution de l’écosystème en fonction des variations du coefficient de mélange.	6
4) Impacte de la vitesse de chute (Simulation 4).	6
5) Variation entre condition Préindustrielle et future.	7
a) Condition Préindustrielle (Simulation 5).	7
b) Conditions futures en 2100 (Simulation 6).....	8
c) Comparaison avec la simulation de référence.	9
6) Modèle future plus réaliste (Simulation 7)	9
7) Effet de la température et de la pCO_2 sur l’évolution de l’écosystème.	10
a) Effet de la température (Simulation 8 VS Simulation 6).	10
b) Effet de la pCO_2 atmosphérique (Simulation 9 VS simulation 6).	10
8) Etudes complémentaires et conclusion.	11
9) Annexes	12

1) Introduction

Dans l’objectif d’étudier l’impact des changements de températures et d’abondance de CO₂ dans l’atmosphère (pCO_2) il est important d’avoir une simulation dite « de référence » (Ref) représentant les conditions actuelles et à partir de laquelle il sera opéré toutes les modifications que l’on souhaite (de Temperature et de pCO_2 dans ce rapport). La première simulation est donc paramétrisée avec des valeurs actuelles. Une pCO_2 atmosphérique à 393ppm et une Temperature moyenne variant avec la saison entre 13 et 25°C. Il est aussi important de savoir que les forçages physique du vent et des courants ne sont pas pris en compte. Toutes les simulations commencent le 1 Janvier de l’année et se finissent le 31 décembre de cette même année. La simulation simule donc les quatre saisons des latitudes tempérées. Il est possible de trouver le détail de paramétrisation utilisé pour chaque simulation dans le tableau 4 situé en annexe.

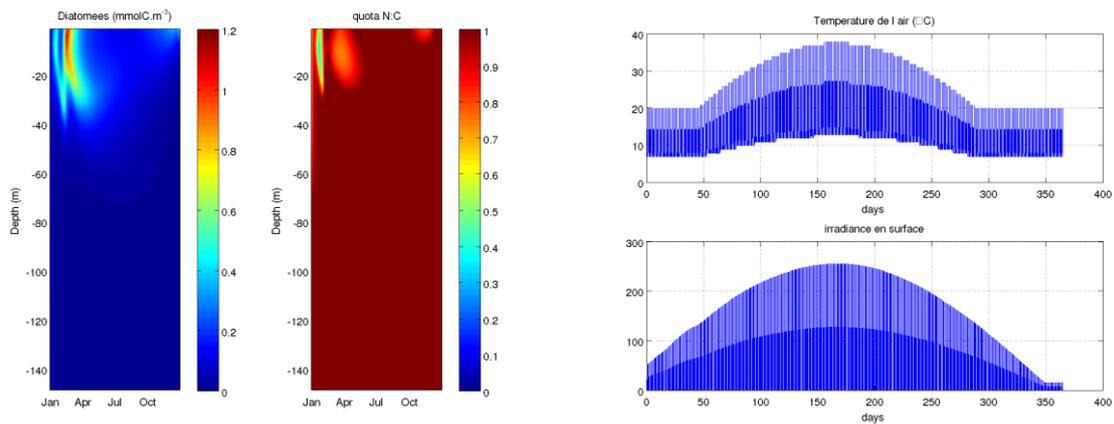


Figure 1 : (Gauche) Evolution des concentrations de diatomées en $\text{mmolC} \cdot \text{m}^{-3}$ et évolution du quota N:C au cours du temps pour la simulation 1. (Droite) Evolution de la température et de l'irradiance pour la simulation1

2) Simulation de référence (simulation 1)

a) Caractéristiques physiques.

Dans un premier temps, l'observation des caractéristiques de température montrent un réchauffement de la surface des eaux progressives en fonction de l'avancement vers la saison estivale. Le maximum de température en surface est de 25°C au milieu du mois de Juillet ensuite les températures diminuent en s'approchant de la période hivernale pour retrouver des températures de surface proche de 13°C en fin d'année. La simulation montre aussi la propagation du flux de chaleur vers les profondeurs. Plus la couche d'eau est profonde plus le flux est retardé et diminué. On retrouve par exemple le maximum de température de surface à la mi-août à 20 m de profondeur.

Ces modifications de la température de surface sont directement liées à l'irradiance en surface qui est simulé dans des conditions méditerranéennes (minimum en hiver, maximum en été). La propagation du flux de chaleur vers le fond est uniquement liée au coefficient de mélange.

b) Phytoplancton.

L'observation des profils de diatomées et de picophytoplancton montrent la présence de deux blooms. Le premier est du aux conditions initiales de la simulation et n'est donc pas représentatif, par contre le second bloom correspond à celui que l'on observe en milieu naturel et qui se produit en début de printemps.

Chez les diatomées il s'agit d'un bloom intense et unique. Il répond à différentes conditions qui se produisent, températures optimum, sels nutritifs abondant. Une fois l'une de ces conditions disparues la croissance cesse. C'est principalement les sels nutritifs qui viennent à manquer en premier et limite donc la croissance des diatomées. L'observation des profils d'azotes montre que le nitrate est l'élément limitateur le plus important car au cours des saisons on retrouve parfois des concentrations d'ammonium non négligeable mais pour autant pas de croissance de diatomée. Chez le picophytoplancton on observe plusieurs blooms mais une production continue d'intensité variable en fonction des saisons. L'observation précise de cette variabilité saisonnière montre aussi la présence de variation journalière avec un cycle jour/nuit. Une première zone de croissance apparait durant tout le printemps puis une seconde période de croissance en automne. Entre les deux périodes la production devient nettement plus faible, notamment à cause de l'augmentation de température de l'eau. Le picophytoplancton semble donc être plus efficace dans l'utilisation de l'azote car même avec des faibles concentrations il est capable de se développer.

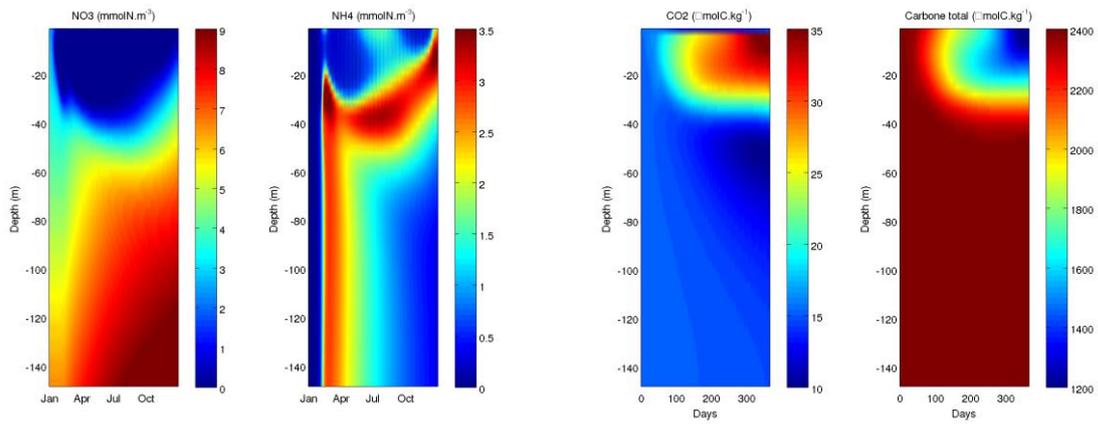


Figure 2 : (Gauche) Variation de nitrate et d'ammonium en mmolN.m^{-3} au cours du temps pour la simulation 1. (Droite) Variation de la $p\text{CO}_2$ océanique et du carbone total en molC.kg^{-1} pour la simulation 1.

Cela se retrouve dans l'observation des quotas N:C qui sont plus faible pour les diatomées que pour le picophytoplancton. Pour les deux types d'organismes la croissance est contenue dans une couche précise, dite couche de mélange. La température et l'azote limite la croissance du phytoplancton mais ce ne sont pas les seuls facteurs. La présence de prédateur comme le zooplancton et les bactéries limitent aussi la production.

c) Zooplanctons et bactéries.

Les bactéries présentent un optimum de croissance durant la période estivale, et sont limitées par la présence de carbone organique particulaire (COP) ou d'azote organique particulaire (NOP) produit principalement lors de la mort du phytoplancton et les déchets du zooplancton. La croissance du zooplancton est contrôlée par la température et par la disponibilité de sa nourriture. Les profils sont semblables à ceux des bactéries. En été, les concentrations en phytoplancton sont faible alors que les concentrations en zooplancton sont élevées car il y a broutage et le zooplancton en profite pour augmenter ça biomasse, parallèlement l'émission de détritux (COP, NOP) et la température favorise la croissance bactérienne durant cette même période.

Le picophytoplancton semble jouer un rôle important dans la croissance du zooplancton car il se développe continuellement et est donc probablement la source principale de nourriture. Les concentrations en COP et NOP sont contrôlées par la mort du phytoplancton en début de printemps et début d'automne. Ces particules sont ensuite reminéralisées en carbone organique dissous (COD) et en azote organique dissous (NOD). Le COD est alors de suite reconsommé tandis que le NOD s'accumule surtout en fin d'année quand les rapports N:C sont faible et que l'exsudation des organismes est fort. Comme pour le phytoplancton, le zooplancton et les bactéries se développent principalement dans la couche de surface.

L'observation du profil vertical du métabolisme net montre que le système est autotrophe jusqu'à une trentaine de mètre après le système deviens hétérotrophe jusqu'à 75 mètres.

d) Le système des carbonates.

L'observation du carbone totale montre une diminution au cours du temps dans la couche de surface, cette diminution s'explique par l'implication du carbone dans l'activité biologique. L'examen du DCT qui représente la valeur absolu de la variation de carbone totale montre que les plus fortes variations ont lieux durant la saison estivale.

La quantité de CO_2 dans l'eau augmente au cours du temps, cette augmentation s'explique par la reminéralisation de la matière organique par les bactéries. Cette augmentation de CO_2 a pour conséquence de diminuer le PH au fil du temps.

3) Impact de la variation du coefficient de mélange sur les distributions.

Le coefficient de mélange joue un rôle dans la diffusion des éléments nutritifs. C'est un paramètre difficile à mesurer in situ et son estimation implique généralement un biais par rapport à la réalité. Le choix de la valeur du coefficient vertical est donc important.

a) Augmentation du coefficient de mélange (Simulation 2).

L'augmentation du coefficient de mélange permet une remontée plus importante des éléments nutritifs vers la surface. La conséquence est une augmentation des concentrations en diatomée et en picophytoplancton dans la couche de surface. Cette couche de mélange est quand à elle réduite engendrant alors une remontée de la profondeur du maximum de chlorophylle pour les deux types d'organismes phytoplanctonique. Cela s'observe clairement sur l'évolution de la chlorophylle totale au cours du temps qui est supérieure aux valeurs de la simulation de référence et qui montre un maximum de profondeur plus proche de la surface. L'effet est similaire sur le zooplancton et les bactéries qui voient augmenter leur biomasse. De plus la concentration en bactéries est plus importante en profondeur car il y a une augmentation des quantités de COD et NOD du à l'augmentation des concentrations en COP et NOP en provenance de la surface favorisé par l'augmentation du coefficient de mélange.

En observant le nitrate on note un mélange plus efficace des nutriments en direction de la surface car il y a une diminution des concentrations marqué plus profondément. Cette meilleure diffusion explique l'augmentation de l'activité biologique de surface qui peut alors utilisé les nutriments advectés de plus profondément que dans la simulation de référence. Si on observe l'ammonium on remarque une meilleure répartition au dessus et au dessous de la zone de production principale, l'ammonium semble donc être plus réactif quand le coefficient de mélange augmente. Les limites de concentrations sont moins marquées qu'avec le coefficient standard.

L'impact sur le système des carbonates et du PH est linéaire avec l'augmentation de l'activité biologique (même processus que dans la simulation de référence).

b) Diminution du coefficient de mélange (Simulation 3).

Dans le cas d'une diminution du coefficient de mélange nous observons exactement l'inverse de ce qu'il se passe lors de l'augmentation du coefficient. La faible diffusion des éléments nutritifs en direction de la zone de mélange limite l'activité biologique. On distingue par contre une augmentation du stock d'ammonium en profondeur qui reste piégé en profondeur faute de diffusion. La couche de mélange est aussi plus importante dans ce cas. L'observation des limites entre les différentes couches de concentration est nettement plus marquée que dans les deux cas précédents.

c) Devenir du coefficient de mélange dans l'océan futur.

Le réchauffement climatique causé par l'augmentation des apports de CO_2 anthropiques dans l'atmosphère engendre un réchauffement des couches supérieures de l'océan. Ce réchauffement des eaux a pour conséquence d'augmenter la stratification de la colonne d'eau ce qui va avoir pour résultat de diminuer le coefficient de mélange dans les années futures.

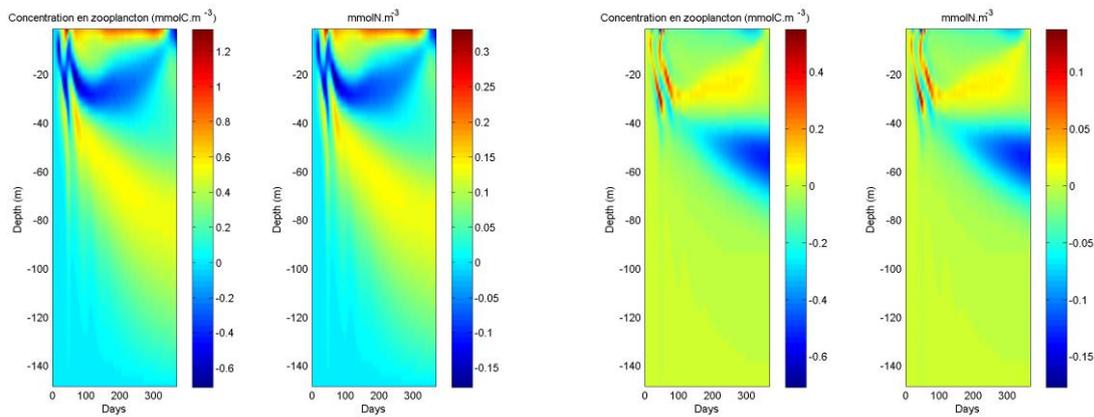


Figure 3 : (Gauche) Variation des concentrations en zooplancton et en azote entre la simulation 2 et la simulation 1. (Droite) Variation des concentrations en zooplancton et en azote entre la simulation 3 et la simulation 1. Variation en $mmolC.m^{-3}$ pour la concentration en zooplancton et en $mmolN.m^{-3}$.

d) Evolution de l'écosystème en fonction des variations du coefficient de mélange.

L'observation des bilans de carbones dans chaque simulation permet de savoir quel processus entre la photosynthèse et la respiration est le plus important. Cette information permet ainsi de savoir si le système est un puits de carbone (autotrophe = valeur négative) ou une source de carbone (hétérotrophe = valeur positive).

	Métabolisme net en $gC.m^{-3}$	Type d'écosystème
Simulation1 (référence)	- 3043,9	Autotrophe
Simulation2 (augmente)	- 26758	Autotrophe
Simulation 3 (diminue)	+ 227	Hétérotrophe

Tableau 1 : Résumé des métabolismes net des simulations 1, 2 et 3.

L'observation du métabolisme net nous indique qu'une augmentation du coefficient de mélange ne change pas l'autotrophie globale du système, il reste autotrophe est continue donc à être un puits de carbone. A l'inverse de l'augmentation du coefficient de mélange qui rend le système hétérotrophe et deviens donc une source de carbone.

Dans les années futures le coefficient de diffusion risque de diminuer, ce qui va transformer l'écosystème. Actuellement majoritairement autotrophe, il risque de devenir une source de carbone et ainsi empêcher la séquestration du CO_2 anthropique atmosphérique aggravant alors le réchauffement climatique et les conséquences citées plus haut. C'est un cercle vicieux où seules les modifications des communautés planctoniques pourraient inverser la tendance. Aujourd'hui ce type de prévision est impossible.

4) Impacte de la vitesse de chute (Simulation 4).

Initialement la vitesse de chute est considérée comme égale à zéro dans le modèle de référence, ici nous avons appliqué une vitesse de chute de l'ordre de 20 cm par jour.

La mise en place de la vitesse de chute permet à la matière particulaire en suspension dans la couche de surface de chuter rapidement vers les profondeurs, ainsi on observe clairement une augmentation du COP et du NOP en dessous de la couche de mélange. Les bactéries, consommatrices de matière particulaire sont donc plus importantes en profondeur (au même niveau où l'on retrouve les plus importantes variations de COP et NOP). La reminéralisation est donc importante et marquée par une augmentation du stock d'ammonium. Cette reminéralisation en profondeur cause une augmentation des biomasses planctonique car ils sont ainsi moins limités par les nutriments pour le phytoplancton et par la présence de nourriture pour le zooplancton. Cependant on remarque qu'à la fin de la simulation les différents stocks de nutriments et d'organismes sont inférieures à la simulation de référence probablement du au fait que le système est plus actif dès le bloom printanier. Cela rend les profils verticaux plus réaliste.

Cependant, les bilans de carbones diminuent clairement. Notre système passe d'un système autotrophe à un système hétérotrophe (de puits à source de carbone). En se rappelant que dans le future l'océan risque de devenir majoritairement hétérotrophe (diminution du coefficient de diffusion), la mise en place de la vitesse de chute à une incidence importante sur les conclusions à prendre sur l'évolution du système. Malgré cela, les vitesses de chute sont très variables à l'échelle globale, ainsi dans certaines régions la vitesse est tellement importante qu'une faible reminéralisation à lieux, alors que dans d'autres régions la vitesse de chute est plus lente donc il s'y déroule une minéralisation plus efficace. A l'échelle globale on peut imaginer une annulation de l'effet de la chute des particules. Au final si l'objectif est de comprendre le fonctionnement à l'échelle globale il est possible de négliger la chute des particules sans trop commettre d'erreur et si l'on observe une reminéralisation trop importante, il est aussi possible d'annuler la reminéralisation en surface. Par contre si l'on se concentre sur une zone particulière il sera alors préférable d'utiliser la vitesse de chute des particules connue pour cette zone.

De plus, dans le future l'océan devenant de plus en plus oligotrophe la taille des organismes et donc des particules va diminuer, l'agrégation sera plus faible et la vitesse de chute se verra donc ralentir.

5) Variation entre condition Préindustrielle et future.

Période / Année	ΔT (°C)	pCO_2 (ppm)
<1820 (Préindustrielle)	- 0,60	280
2012 (Référence)	0,00	393
2100 (Scénario IPCC A1 - Future)	+ 5,50	720

Tableau 2 : Détails des variations de température et de pCO_2 atmosphérique en fonction des hypothèses.

a) Condition Préindustrielle (Simulation 5).

L'observation des résultats de la simulation avec les conditions préindustrielles montrent de forte similitude avec les données de la simulation de référence. Les variations de biomasses du plancton au cours du temps sont similaires, comme pour les variations des sels nutritifs et de la matière particulaire et dissoute. Ceci s'explique par le fait que les conditions préindustrielles abaissent la température de 0,60°C ce qui ne modifie pas beaucoup les conditions de croissance des organismes et le cycle respiration/minéralisation qui en découle. La diminution de la pCO_2 atmosphérique n'a pas d'influence sur la croissance du plancton.

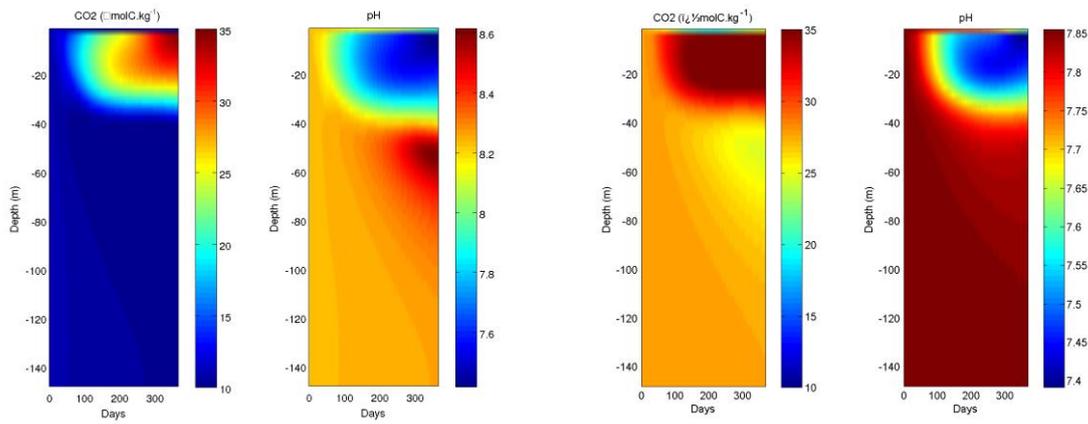
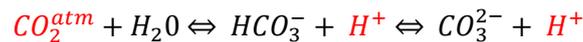


Figure 4 : (Gauche) Variation de la pCO_2 océanique en molC.kg^{-1} et du pH pour la simulation 5. (Droite) Variation de la pCO_2 océanique en molC.kg^{-1} et du pH pour la simulation 6.

Les modifications les plus marquées ont lieu au niveau du système des carbonates qui est principalement affecté par la pCO_2 atmosphérique. La diminution de la pCO_2 dans l'atmosphère réduit l'entrée de CO_2 dans l'océan ce qui a pour conséquence d'augmenter le pH des eaux. L'océan passé est donc moins acide qu'actuellement.



Equation de l'équilibre des carbonates dans l'eau de mer

En ce qui concerne les autres paramètres du système des carbonates, étant fortement influencé par la biologie, et celle-ci variant peu, les profils sont très proche de ceux avec les conditions de références.

b) Conditions futures en 2100 (Simulation 6).

L'augmentation de la température et de la pCO_2 atmosphérique a un effet bénéfique sur la croissance du phytoplancton qui bloom très rapidement en début d'année. Cela a un impact sur les quotas N:C qui sont diminués en milieu d'hiver et début printemps. Cette augmentation du phytoplancton tend à augmenter les concentrations en zooplancton. Produisant alors plus de matière particulaire les bactéries voient aussi leur concentration augmentée. L'important bloom du début d'année tend à épuiser rapidement les nitrates en surface limitant ainsi la production de diatomée sur le reste de l'année. Par contre la picophytoplancton reprend son développement après la période estival, certainement du au fait que l'augmentation de 5,5°C devient limitant pour sa croissance. Cette variation des croissances du plancton permet ainsi une variation du stock d'ammonium régulé par la reminéralisation de la matière organique par les bactéries. Ainsi en été on constate une augmentation du stock dans la couche de surface. Le reste de l'année la reminéralisation plus intense s'effectue sous la couche de mélange. L'augmentation de la reminéralisation a tendance à rendre l'écosystème plus hétérotrophe.

L'observation du système des carbonates montre clairement une pCO_2 océanique importante sur toute la colonne d'eau avec des valeurs très supérieures dans la couche de surfaces après les premiers blooms phytoplanctonique passés. L'ajout de CO_2 dans l'océan diminue fortement le pH sur toute la colonne d'eau et augmente le carbone total.

c) Comparaison avec la simulation de référence.

Les différences entre la simulation de référence et la simulation préindustrielle sont faibles au niveau de la biologie. Cependant on observe un bloom de diatomée légèrement plus intense et un bloom de phytoplancton moins intense en début de printemps. Au cours du temps les concentrations en diatomée varie peu, par contre il y a une augmentation du phytoplancton durant la période estivale. Concernant le zooplancton et les bactéries les variations sont très minimales malgré une légère diminution de la biomasse zooplanctonique durant le premier bloom printanier. Les sels nutritifs varient très peu, par contre la matière particulaire est modifiée légèrement avec des stocks plus importants à des périodes différentes. Malgré cela, toutes ces variations sont très faibles, les conditions préindustrielles influencent donc que très légèrement les valeurs biologiques.

Dans des conditions plus chaudes avec plus de CO_2 les diatomées et le picophytoplancton ont une tendance à avoir des concentrations plus importantes plus tôt dans le temps. Dès le début de la simulation, à cause de l'augmentation de température qui rend la croissance possible plus tôt. Cela a la même incidence sur le zooplancton qui est majoritairement supérieure tout au long de la simulation et notamment juste après le bloom du phytoplancton. Quant aux bactéries elles subissent une légère augmentation comme le zooplancton. La comparaison de la matière particulaire montre logiquement des valeurs de COP et NOP supérieures en début d'année après les blooms et nettement inférieures le reste de l'année dans la couche de surface. La reminéralisation est alors importante en début d'année pour la simulation future et devient ensuite inférieure aux valeurs de la simulation de référence.

Avec les conditions futures les simulations montrent une augmentation très importante de la pCO_2 océanique dans toute la colonne d'eau. Cette augmentation a des conséquences sur le pH qui diminue, l'océan devient donc plus acide et de moins en moins favorable aux organismes, notamment les organismes calcifiant qui voient leur test se fragiliser au fur à mesure de l'augmentation. Le carbone total varie lui aussi mais beaucoup moins que les variations de pCO_2 océanique. Alors que le CT est contrôlé par la quantité de CO_2 cela signifie qu'un processus limite l'incorporation du CO_2 dans le système du carbone total. Le seul processus capable de limiter l'augmentation du CT dans ces simulations est l'activité biologique. L'augmentation des biomasses limite donc les effets sur le CT.

Au final il semblerait que les espèces phytoplanctoniques soient désavantagées face aux zooplanctons et aux bactéries. Ce qui tend à conclure que l'augmentation de CO_2 et de température a tendance à rendre l'écosystème de moins en moins puits de carbone. La tendance de cette simulation future semble allée dans la même direction que l'évolution du système observé actuellement malgré le fait que les processus physiques tels que le mélange hivernal, la convection, les différentes advections ne soient pas considérées dans ce modèle.

6) Modèle future plus réaliste (Simulation 7)

Une des façons de rendre le modèle futur plus réaliste est de diminuer le coefficient de mélange du à l'augmentation de la stratification à cause de la hausse de température des eaux.

Un des premiers points à remarquer est le faible développement des organismes photosynthétiques qui en plus d'être limités par les fortes températures sont aussi limités par le non renouvellement des éléments nutritifs encore plus rapidement que dans le cas avec un coefficient de diffusion standard. Par contre le zooplancton et les bactéries semblent peu affectés par cette modification physique. Cela a donc un effet capital sur les bilans de carbone.

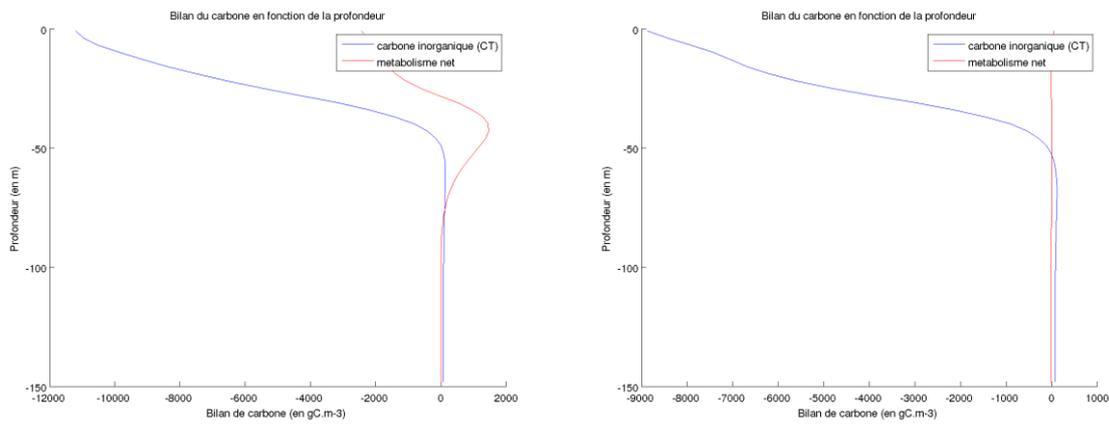


Figure 5 : (Gauche) Evolution du métabolisme net (courbe rouge) et du CT (courbe bleue) en $gC.m^{-3}$ en fonction de la profondeur pour la simulation 1. (Droite) Evolution du métabolisme net (courbe rouge) et du CT (courbe bleue) en $gC.m^{-3}$ en fonction de la profondeur pour la simulation 7.

Dans le cas d'une diminution du coefficient de diffusion le système devient hétérotrophe et passe d'un écosystème puits de carbone à source de carbone. C'est un important changement car il aura des répercussions sur l'ensemble des réservoirs de la planète car l'océan ne sera plus capable de stocker le CO_2 anthropique aggravant ainsi les problèmes de réchauffements et augmentant d'autant plus la stratification. Il s'agit d'un scénario dans lequel on ne considère pas l'influence de l'augmentation de températures et de pCO_2 atmosphérique vont aussi pouvoir modifier les courants océaniques, les vents ou bien encore la couverture nuageuse qui vont avoir un effet cumulatif et aggravant.

7) Effet de la température et de la pCO_2 sur l'évolution de l'écosystème.

Deux nouvelles simulations (simulation 8 et simulation 9) sont réalisées avec respectivement comme conditions pCO_2 future et température actuelle et pCO_2 actuelle et température future. En comparant ces simulations avec la simulation 6 (pCO_2 future, température future) il est possible de déconvoluer les effets de chaque paramètre sur l'évolution de l'écosystème.

a) Effet de la température (Simulation 8 VS Simulation 6).

Dans les simulations 6 et 8 les conditions de températures sont plus propices au développement des organismes phytoplanctonique. La répercussion agit sur le bilan de carbone qui redevient alors autotrophe. L'océan à donc récupéré sa capacité à piéger le pCO_2 anthropique en présence de température plus douce et malgré les fortes concentrations de CO_2 .

b) Effet de la pCO_2 atmosphérique (Simulation 9 VS simulation 6).

La comparaison des simulations 6 et 9 où on applique uniquement une modification de la pCO_2 atmosphérique montre que le métabolisme de l'écosystème ne change pas.

	Métabolisme net ($gC.m^{-3}$)
Simulation 6 (Temperature et pCO_2 future)	-1793
Simulation 8 (Temperature act. et pCO_2 future)	-3044
Simulation 9 (Temperature future et pCO_2 act.)	-1793

Tableau 3 : Evolution des métabolismes net pour les simulations 6, 8 et 9.

En résumé, seule la température a un effet sur l'efficacité de l'écosystème à devenir source ou puits de carbone. Principalement du fait que les organismes photosynthétiques planctoniques, qui fournissent plus de 99 % de la matière organique utilisée dans les réseaux trophiques marins, ne sont que faiblement influencés par la pCO_2 atmosphérique comparé à la température.

Dans le futur, l'augmentation de la pCO_2 atmosphérique aura un effet indirect sur la capacité de l'océan à stocker l'excès de carbone anthropique. En effet c'est l'augmentation de température par effet de serre et non l'augmentation de la pCO_2 océanique qui est influencera l'écosystème à être autotrophe ou hétérotrophe. Cependant, le modèle biogéochimique Eco3M est à prendre avec des pincettes car sans couplage avec les processus physiques océaniques et atmosphériques et les effets des différents compartiments terrestres (biosphère et cryosphère) il est impossible de dire avec certitude que seul la température joue un rôle dans la capacité de l'océan à stocker le carbone. De plus ici sont représentés uniquement des organismes photosynthétiques, alors que l'on sait aujourd'hui que les organismes diazotrophes ont aussi un rôle important dans le cycle du carbone. Une des évolutions possible du modèle serait d'intégrer la diazotrophie.

8) Etudes complémentaires et conclusion.

Une simulation 10 avec diminution du DOC initialement présent au lancement du modèle montre clairement que l'écosystème est rapidement limité par les sels nutritifs, les biomasses phytoplanctonique et en zooplancton sont donc limitées. Par comparaison avec la simulation 1 de référence (Température actuelle et pCO_2 actuelle) il y a une légère augmentation de l'activité microbienne ce qui a tendance à rendre le système plus hétérotrophe lorsque le DOC est plus faible initialement.

Une autre simulation (11) où l'on choisit les conditions de référence avec les paramètres actuelles mais avec une vitesse de chute de 1,2 cm par jour montre clairement que les particules produites par les organismes photosynthétiques et le zooplancton sédimentent rapidement vers le fond ne laissant ainsi pas le temps aux bactéries de procéder à une reminéralisation complète. Une augmentation de la vitesse de chute des particules augmente donc la capacité de l'océan à piéger du carbone.

En conclusion générale on peut dire avec certitude que tous les processus qui impactent la production primaire et les flux particulaires ont un intérêt capital dans la modélisation des flux biogéochimiques à travers les couches de l'océan. Il semble donc primordial de déterminer tous les processus et tous les organismes rentrant en jeu dans la production afin de les intégrer dans le modèle Eco3M et d'obtenir des simulations les plus réalistes possible.

9) Annexes

	Coefficient de diffusion	Vitesse de chute ($cm.j^{-1}$)	Températures (°C)	pCO_2	Stock initial de DOC	Métabolisme net ($gC.m^{-3}$)
Simulation 1	10^{-5}	0	Actuelle	393 ppm	STD	- 3044 (A)
Simulation 2	10^{-6}	0	Actuelle	393 ppm	STD	- 2676 (A)
Simulation 3	10^{-4}	0	Actuelle	393 ppm	STD	+ 227 (H)
Simulation 5	10^{-5}	0.2	Actuelle	393 ppm	STD	+ 3576 (H)
Simulation 6	10^{-5}	0	- 0.6 °C	280 ppm	STD	- 3155 (A)
Simulation 7	10^{-6}	0	+ 5.5 °C	720 ppm	STD	- 1793 (A)
Simulation 8	10^{-5}	0	Actuelle	720 ppm	STD	- 3044 (A)
Simulation 9	10^{-5}	0	+ 5.5 °C	393 ppm	STD	- 1793 (A)
Simulation 10	10^{-5}	0	Actuelle	393 ppm	STD/2	- 2837 (A)
Simulation 11	10^{-5}	1.2	Actuelle	393 ppm	STD	- 7108 (A)

Tableau 5 : Récapitulatif des différents paramètres pour chaque simulation. Les variations de températures sont par rapport à la température actuelle. Le stock de DOC initial STD est le stock standard établi dans le modèle (=55). Le (A) signifie Autotrophe et le (H) Hétérotrophe.

Liste des figures disponible sur demande pour chaque simulation :

- ✓ Concentration en Diatomées annuelle, moyenne mensuelle, chlorophylle diatomée,
- ✓ Concentration en picophytoplancton, moyenne mensuelle, chlorophylle en picophytoplancton,
- ✓ Chlorophylle totale,
- ✓ Sels nutritifs (nitrate et ammonium),
- ✓ Concentration en zooplancton, concentration en azote du au zooplancton,
- ✓ Concentration en bactérie annuelle, concentration en azote du au bactérie,
- ✓ Concentration en COP, NOP, COD, NOD
- ✓ Temperature et salinité en fonction de la profondeur,
- ✓ Temperature et irradiance en surface,
- ✓ Bilan de carbone en fonction de la profondeur,
- ✓ Système carbonate (pH, CO₂, carbone total et DCT) en fonction de la profondeur,
- ✓ Système carbonate (pH, CO₂, carbone total et DCT) en surface.

Possibilité de figure montrant la différence entre deux simulations (sebastien.leclech@gmail.com).