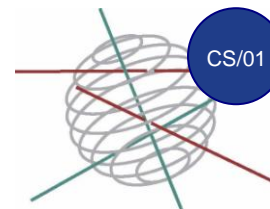


ASTER - Résultats



Evaluation des incertitudes liées aux modèles dans les projections à long terme des changements de climat et du niveau de la mer

DURÉE DU PROJECT
15/12/2005 - 30/06/2010

BUDGET
1.149.995 €

MOTS CLES

Incertitude sur le changement climatique, changement climatique dans le futur, changement du niveau des mers, modélisation des inlandsis, circulation océanique, cycle du carbone.

CONTEXTE

Le changement climatique représente l'une des plus grandes menaces environnementales, sociales et économiques à laquelle la planète est confrontée. Le réchauffement du système climatique est sans équivoque, comme en attestent l'augmentation observée des températures moyennes de l'air et de l'océan, la fonte généralisée de la neige et de la banquise, et une élévation du niveau moyen des mers (GIEC, 2007). Cependant, la gamme des changements climatiques futurs possibles simulés selon différentes projections reste importante, surtout en raison de plusieurs sources d'incertitude. Une grande inconnue est de savoir comment les activités humaines et, par la suite, les émissions de gaz à effet de serre, vont évoluer dans l'avenir. De grandes incertitudes découlent également de la conception des modèles climatiques eux-mêmes, par exemple, dans le choix des approximations et des paramétrisations. Une autre source d'incertitude provient des paramètres physiques, qui sont imparfaitement connus. En conséquence, les décideurs sont confrontés à un large éventail de changements possibles du climat futur. Des efforts sont faits pour réduire cette incertitude ou pour pointer vers la réalisation la plus probable.

OBJECTIFS

Nous avons utilisé LOVECLIM, un modèle de complexité intermédiaire du système Terre, pour effectuer des simulations du climat de l'Holocène, du dernier millénaire et du troisième millénaire, ainsi que des expériences de sensibilité pour identifier la réponse du modèle à une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre et à un flux additionnel d'eau douce. En outre, nous avons identifié plusieurs jeux de paramètres, choisis dans leur fourchette d'incertitude, qui entraînent des réponses différentes du modèle LOVECLIM à un scénario de doublement de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et à un flux d'eau douce dans l'Atlantique Nord, tout en simulant le climat actuel dans la gamme des observations. Il y a neuf jeux de paramètres "climatiques", trois jeux de paramètres "cycle du carbone" et trois de type "inlandsis". Les simulations climatiques passées et futures ont été réalisées avec l'ensemble ou une partie de ces 81 combinaisons de jeux de paramètres. Le modèle a été exécuté soit avec des inlandsis fixes et prescrits, soit avec un modèle d'inlandsis du Groenland et de l'Antarctique couplé de manière interactive.

Les simulations des climats du passé ont été menées afin d'identifier le sous-ensemble de jeux de paramètres qui permettent la meilleure reproduction des observations et des reconstructions du climat. Les simulations de changements climatiques futurs fournissent alors un éventail de réponses du modèle.

CONCLUSIONS

Plusieurs améliorations ont été apportées à LOVECLIM dans le cadre du projet. Le schéma de surface a été adapté afin de mieux représenter l'impact de la végétation sur le changement climatique. La profondeur du réservoir utilisé dans le schéma hydrologique est maintenant dépendante de la végétation, qui a elle-même un impact direct sur l'eau de ruissellement et la disponibilité en eau du sol. La transpiration est calculée séparément pour chaque type de végétation. En outre, un terme de résistance de la canopée a été ajouté. Il dépend du rayonnement solaire incident, de l'humidité atmosphérique et de l'indice de surface foliaire (LAI). Cette amélioration de la paramétrisation induit des changements importants sur la végétation. Par exemple, la superficie forestière augmente sur l'Europe occidentale et la majeure partie de l'Amérique du Nord au détriment de la prairie et du désert en Afrique du Nord et sur l'Europe orientale.

Lors du couplage de LOCH¹ à CLIO², il est apparu que l'absorption du CO₂ anthropique était beaucoup trop importante. Le schéma semi implicite pour le calcul du terme de Coriolis dans l'équation du mouvement a dès lors été remplacé par un schéma totalement implicite dans le but de résoudre ce problème.

Le module biologique de LOCH a été modifié pour incorporer une représentation de dissolution de la silice dont le taux et la profondeur de contrôle dépendent de la température. En outre, l'équation gouvernant le réservoir de la biomasse, dont dépend la production exportée, comprend maintenant un terme de transport tridimensionnel et permet d'envisager un maximum de trois groupes de phytoplancton, caractérisés par leurs propres taux de croissance et de broutage. Enfin, le module atmosphérique de LOCH permet maintenant un calcul pronostique des isotopes du carbone dans l'atmosphère et le fractionnement lors de la formation des tissus mous est paramétrisé pour être inversement proportionnel à la concentration en CO₂ dissous. Le modèle représentant les inlandsis de l'hémisphère Nord (NHISM) a été couplé à LOVECLIM de manière interactive. NHISM est un modèle tridimensionnel thermomécanique de l'inlandsis.

¹ LOCH est la composante de LOVECLIM représentant le cycle du carbone dans l'océan.

² CLIO est la composante de LOVECLIM représentant l'océan et la banquise.



ASTER - Résultats

Evaluation des incertitudes liées aux modèles dans les projections à long terme des changements de climat et du niveau de la mer

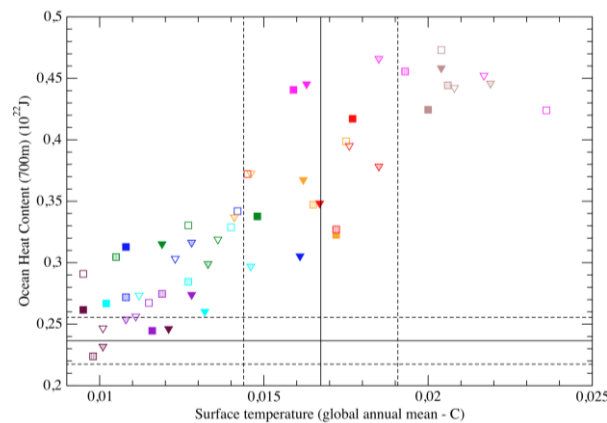
Il comprend un schéma amélioré pour le vèlage d'icebergs en mer afin de mieux simuler l'expansion et la contraction de la calotte glaciaire autour des mers peu profondes entourant l'océan Arctique. En outre, un nouveau modèle de ruissellement a été conçu pour acheminer l'eau de fonte des calottes glaciaires vers les points de grille océaniques appropriés de CLIO.

Le schéma transporte les eaux de fonte à travers le système de lacs et rivières contemporains, en tenant compte des changements isostatiques de la topographie de surface, des lacs formés par un barrage de glace et des modifications dans le stockage des lacs. Ce nouveau modèle a permis de simuler les calottes glaciaires mondiales et le climat au cours de la dernière déglaciation, entre le Dernier Maximum Glaciaire (LGM) à 21 ka BP et le début de l'Holocène à 10 ka BP. Pour cette expérience, la configuration des inlandsis et le flux d'eau douce étaient prescrits à partir des résultats d'une expérience off-line avec NHISM forcé par ECBilt -CLIO³. On a constaté que des pics de flux d'eau douce continentale relâchée dans l'Arctique et l'Atlantique Nord à environ 17 ka BP et 14 ka BP pouvaient entraîner des réductions importantes de la circulation océanique méridienne, ce qui avait pour conséquence un refroidissement local et global du climat.

Ces améliorations ont conduit à la mise à disposition, à la fois pour le projet et la communauté scientifique, d'une nouvelle version du modèle (LOVECLIM1.2, <http://www.climate.be/loveclim>).

Afin d'étudier l'incertitude sur les paramètres dans LOVECLIM, nous avons fait varier les valeurs des principaux paramètres physiques afin d'estimer la plage de réponses du modèle pour des expériences de sensibilité standard, d'évaluer la capacité du modèle à simuler les climats du passé en fonction des jeux de paramètres et de calculer la gamme de réponses pour les projections climatiques.

Plus précisément, nous avons sélectionné neuf jeux de paramètres "climatiques", trois jeux de paramètres "cycle du carbone" et trois de type "inlandsis". Tous produisent des simulations climatiques du présent cohérentes avec les observations. Pour les 81 combinaisons de jeux de paramètres, nous avons mesuré l'augmentation de la température de surface mondiale moyenne annuelle après 1000 ans d'une expérience de sensibilité dans laquelle la concentration en CO₂ atmosphérique a augmenté de 1% par an à partir de la valeur pré-industrielle jusqu'à ce qu'une valeur double soit atteinte et a ensuite été maintenue constante. Cette augmentation de température est utilisée comme estimation de la sensibilité climatique. Nous avons également calculé le pourcentage de diminution de la valeur maximale de la fonction de courant méridienne en dessous de la couche d'Ekman dans l'océan Atlantique (MOC), après 1000 ans d'une expérience pour laquelle de l'eau douce est ajoutée dans l'Atlantique Nord (20°-50° N). Ce flux d'eau douce augmente linéairement de 2×10^{-4} Sv par an. Le pourcentage de réduction de la MOC est utilisé comme estimation de sa sensibilité à une perturbation d'eau douce. La sensibilité à un doublement de la concentration en CO₂ varie de 1,6 à 3,8 °C et le pourcentage de réduction de la MOC est compris entre 15 et 75% dans les expériences de flux d'eau douce réalisées avec ECBilt-Clío-VECODE⁴ seul (ECV). Pour la plupart des jeux de paramètres, les sensibilités ne présentent pas de changements significatifs après le couplage avec le modèle du cycle du carbone. Toutefois, certains écarts aux valeurs obtenues pour les expériences avec ECV apparaissent pour la sensibilité climatique la plus grande. Cela peut être dû à des conditions initiales différentes. En effet, les expériences avec le cycle du carbone interactif s'écartent de l'état d'équilibre de l'expérience correspondante sans cycle du carbone. Ces différences dans les états initiaux expliquent probablement la grande différence dans la réduction de la fonction de courant (MOC) avec le jeu de paramètres 51. En outre, dans le modèle entièrement couplés (LOVECLIM), les expériences qui simulent un doublement de la concentrations en CO₂ et/ou un flux d'eau douce additionnel de 0.1 à 0.2 Sv montrent une réduction significative de la sensibilité climatique à l'échelle de temps millénaire en raison de l'effet des flux d'eau douce supplémentaires issus des calottes glaciaires. L'eau de fonte induit l'affaiblissement de la MOC dans l'hémisphère Nord et, par la suite, un refroidissement local relatif, amplifié par les rétroactions liées à la glace de mer. Un mécanisme similaire opère dans l'hémisphère Sud, avec une ampleur moindre. Cet effet d'atténuation augmente avec la sensibilité de la calotte glaciaire et avec la sensibilité climatique initiale de LOVECLIM. Il est donc important d'inclure la dynamique des inlandsis dans les modèles globaux du système terrestre.



11 12 21 22 31 32 41 51 52

Figure 1: Tendence du contenu en chaleur de l'océan dans la partie supérieure (jusqu'à 700 m de profondeur) (1022 J.yr⁻¹) (1950 à 2003 AD) par rapport à la tendance de la température de surface mondiale en moyenne annuelle (°C.yr⁻¹) (1979 à 2005 AD). Chaque point représente une simulation. Les tendances sont calculées comme étant la pente de la droite de régression parmi les valeurs annuelles. Chaque couleur correspond à un jeu de paramètres climatiques. Les carrés (triangles vers le bas) correspondent aux simulations Efor (Conc) et le remplissage des symboles correspond aux jeux de paramètres du cycle du carbone (1: plein; 2: demi vide; 3: vide) (voir la description des ensembles de paramètres et des expériences dans la partie principale du rapport). La droite en trait plein représente la tendance calculée à partir des observations (Levitius et al. (2009) pour le contenu en chaleur et Brohan et al. (2006) pour la température de surface). Les droites en pointillé représentent l'incertitude liée à la variabilité dans les données (un écart-type).

³ ECBilt est la composante atmosphérique de LOVECLIM

⁴ VECODE est la composante de LOVECLIM représentant la végétation et le cycle du carbone continental



ASTER - Résultats

Evaluation des incertitudes liées aux modèles dans les projections à long terme des changements de climat et du niveau de la mer

L'analyse des variables globales représentatives du climat du dernier millénaire affiche des résultats relativement similaires pour tous les jeux de paramètres et n'a donc pas pu nous permettre de choisir parmi eux le plus approprié pour simuler le climat sur cet intervalle de temps. Par conséquent, nous avons plutôt porté notre intérêt sur le siècle dernier. En outre, nous nous sommes concentrés sur les caractéristiques globales du modèle et sur sa capacité à reproduire la tendance des variables sélectionnées au cours des dernières décennies. Les simulations effectuées avec la valeur 3 du paramètre de cycle du carbone ne permettent pas de reproduire correctement l'augmentation du CO₂ atmosphérique observée même si elles n'empêchent pas une augmentation raisonnable de la température. En outre, aucun jeu de paramètres ne permet au modèle de simuler simultanément une évolution temporelle correcte de la quantité de chaleur dans les 700 premiers mètres de l'océan et de l'étendue de la banquise dans l'hémisphère Nord ou de la température de surface moyenne annuelle (figure 1). Ce problème devrait être étudié ultérieurement. De manière générale, les simulations avec la sensibilité climatique élevée ont un meilleur score⁵ global que les simulations avec la sensibilité climatique faible. Parmi les meilleures simulations, le jeu paramètres⁶ 321 se comporte bien à la fois pour les deux configurations expérimentales (concentration en CO₂ pronostique ou diagnostique) et les deux scénarios de forçage en aérosols sulfatés considérés dans notre étude. Par ailleurs, d'autres jeux de paramètres (322, 511, 512) affichent également de bonnes performances pour les deux configurations (Efor, Conc) et pour au moins l'un des scénarios de forçage en aérosols sulfatés.

Cinq jeux de paramètres (112, 212, 312, 412 et 512) ont été utilisés dans les simulations transitoires du climat de l'Holocène (de 8 ka BP à 2000 AD). Par rapport aux observations couvrant la seconde moitié du 20^e siècle, les jeux de paramètres 112 et 212 conduisent à une grave sous-estimation de la baisse de l'étendue de banquise arctique durant l'été, tandis que le jeu de paramètres 312 provoque seulement une légère sous-estimation. En outre, les résultats du modèle pour le jeu de paramètres 512 sont en désaccord avec les quelques reconstructions de l'étendue estivale de la banquise arctique au début de l'Holocène. Toutefois, l'accord avec les températures globales estivales simulées dans le cadre du projet PMIP2 pour l'Holocène moyen (Braconnot et al., 2007) semble être le meilleur avec le jeu de paramètres climatiques 21. Des simulations d'équilibre pour le climat au LGM ont également été réalisées. Seuls les jeux de paramètres conduisant à une sensibilité climatique faible (c'est-à-dire 11, 12, 21, 22) donnent des résultats raisonnables. Le refroidissement des hautes latitudes au LGM est trop fort pour les jeux de paramètres de grande sensibilité climatique. Ceci est une conséquence directe de l'amplification polaire relativement élevée simulée par LOVECLIM. Ces résultats illustrent clairement la difficulté d'identifier un ensemble de paramètres qui simulerait correctement des climats fortement différents, tels que le LGM ou l'Holocène, ainsi que le réchauffement climatique du siècle dernier.

Par conséquent, pour les simulations du climat futur, nous avons continué d'utiliser plusieurs jeux de paramètres (ou tous), même si certains doivent être rejetés pour leur faible capacité à simuler le climat sur l'une des périodes passées considérées dans cette étude. Plusieurs simulations couvrant le troisième millénaire ont été réalisées avec LOVECLIM, avec des jeux de paramètres différents, en utilisant les scénarios SRES de gaz à effet de serre (B1, A2, A1B) jusqu'en 2100 AD et des concentrations en gaz à effet de serre maintenues au niveau de 2100 AD jusqu'en l'an 3000 AD. Selon ces simulations, la température moyenne mondiale augmenterait de 1,7 à 3,2 °C après 1000 ans pour le scénario A1B pour une sensibilité moyenne au cycle du carbone et aux inlandsis, selon la sensibilité climatique (Figure 2).

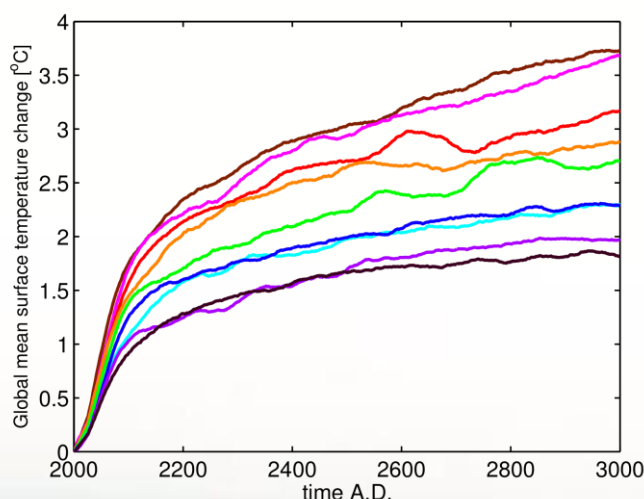


Figure 2: Changements de température moyenne au cours du troisième millénaire pour le scénario A1B. Chaque couleur correspond à un jeu de paramètres climatiques. Les résultats sont présentés pour une sensibilité moyenne au cycle du carbone et à l'inlandsis.

⁵ Voir la partie principale du rapport pour une description du calcul du score

⁶ Voir la partie principale du rapport pour une description détaillée du jeu de paramètre.

ASTER - Résultats

Evaluation des incertitudes liées aux modèles dans les projections à long terme des changements de climat et du niveau de la mer

Une large gamme de projections des calottes glaciaires, des glaciers et du niveau des mers a ensuite été réalisée en mettant l'accent sur le 21^e siècle et le troisième millénaire. Des simulations d'ensemble ont été menées afin d'échantillonner la gamme des incertitudes inhérentes à la paramétrisation du glissement basal, l'augmentation du débit, l'ablation de surface et la fusion basale sous les plates-formes de glace de l'Antarctique. Ce dispositif est complémentaire à l'approche habituelle consistant à réaliser des simulations pour un éventail de scénarios de forçage, en l'occurrence les scénarios SRES (prolongés) B1, A1B et A2. Dans ces expériences, la calotte glaciaire du Groenland perd entre 15% (scénario B1, faible sensibilité climatique et des inlandsis) et 95% (scénario A2, forte sensibilité climatique et des inlandsis) de sa masse après 1000 ans de réchauffement climatique (Figure 3). La quasi-totalité de la fusion se produit par ablation en surface, tandis que le vêlage d'icebergs diminue rapidement lorsque la calotte de glace s'éloigne de la côte. Pour l'Antarctique, les changements de volume après 1000 ans varient entre une légère croissance pour un scénario bas de concentrations en gaz à effet de serre et une faible sensibilité climatique et des inlandsis et une diminution correspondant à une augmentation de 6 m du niveau marin pour un scénario haut de concentrations en gaz à effet de serre et une forte sensibilité climatique et des inlandsis (Figure 3). A l'échelle de temps millénaire, les changements de la calotte glaciaire antarctique sont principalement provoqués par des changements d'accumulation et de fonte de l'inlandsis, avec une contribution significative de l'ablation en périphérie de la calotte pour les expériences qui produisent le plus grand réchauffement. Pour tous les scénarios et toutes les sensibilités du modèle, la quasi-totalité de la glace contenue dans les glaciers de montagne et les petites calottes glaciaires a disparu après 1000 ans de réchauffement climatique (Figure 3). Pour la même gamme d'expériences, l'élévation du niveau de la mer à cause de la dilatation thermique océanique varie entre 0,6 et 4 m (Figure 3). Nous concluons de ces expériences qu'une élévation eustatique globale du niveau des mers d'au moins 2 m est très susceptible de se produire avant la fin du troisième millénaire. Pour le scénario A1B et une sensibilité moyenne des inlandsis et du climat, la valeur est d'environ 9 m (Figure 3). La limite supérieure de plus de 20 m est toutefois considérée comme très improbable, en partie en raison de la grande amplification polaire dans LOVECLIM.

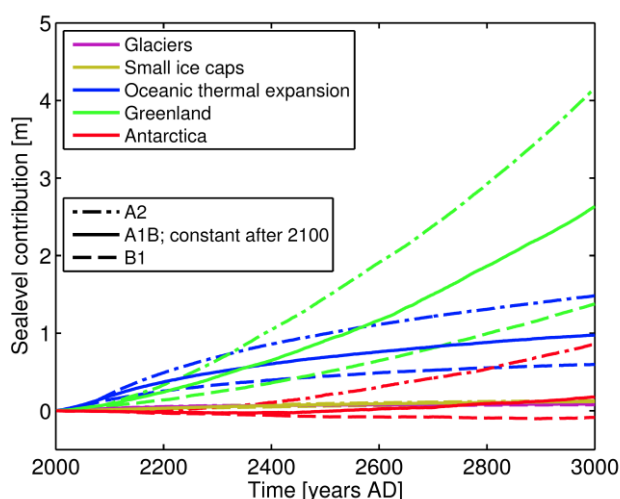


Figure 3: Contributions globales à la variation du niveau des mers de ses différentes composantes pour les scénarios SRES B1, A1B et A2 prolongés. Ces expériences considèrent une sensibilité moyenne des inlandsis et une faible sensibilité climatique.

⁵ Voir la partie principale du rapport pour une description du calcul du score

ASTER - Résultats

Evaluation des incertitudes liées aux modèles dans les projections à long terme des changements de climat et du niveau de la mer

CONTRIBUTION OF THE PROJECT TO A SUSTAINABLE DEVELOPMENT POLICY

Le travail accompli sous ASTER est une contribution à l'effort scientifique international continu visant à mieux comprendre le changement climatique et à quantifier plus précisément les incertitudes liées aux simulations climatiques. Ceci est nécessaire afin de fournir une base solide pour des politiques visant à relever le défi du changement climatique. Identifier et réduire les incertitudes est profondément en accord avec la recommandation de la communauté scientifique pour les années à venir, en particulier pour le prochain rapport d'évaluation du GIEC. Par conséquent, le travail effectué dans le cadre d'ASTER sera très vraisemblablement inclus dans le rapport IPCC-AR5.

COORDONNEES

Website du projet:

www.climate.be/ASTER/

Coordinateur

Thierry Fichet

Université catholique de Louvain (UCL)
Institut d'astronomie et de géophysique
Georges Lemaître (ASTR)
Chemin du Cyclotron 2
B-1348 Louvain-la-Neuve
Tel: +32 (0)10 47 32 95
Fax: +32 (0)10 47 47 22
fichet@astr.ucl.ac.be

Partenaires

Philippe Huybrechts

Vrije Universiteit Brussel (VUB)
Departement Geografie (DGGF)
Pleinlaan 2
B-1050 Brussels
Tel: +32 (0) 2 629 35 93
Fax: +32 (0) 2 629 33 78
phuybrec@vub.ac.be

Anne Mouchet

Université de Liège (ULg)
Laboratoire de Physique Atmosphérique
et Planétaire (ULg-LPAP)
Allée du 6 Août 17
Bâtiment B5c
B-4000 Liège
Tel: +32 (0)4 366 97 82
Fax: +32 (0)4 366 97 11
a.mouchet@ulg.ac.be

