Les modèles de biosphère, hydrosphère et cryosphère

Auteur :
BALSAMO Gianpaolo, Chef de l'équipe Processus Couplés, section Modélisation du Système Terre, au Centre Européen pour la Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT), Reading, Angleterre.

10-07-2018

Cet article présente l'importance de la prise en compte des surfaces terrestres dans la Prévision Numérique du Temps, une étape vers la représentation plus complète du « Système Terre », avec sa composante vivante (la biosphère), les échanges d'eau entre les surfaces et l'atmosphère (l'hydrosphère), et les surfaces glacées (la cryosphère). Ce système varié et complexe est en évolution continue, incluant les modifications des surfaces dues à l'influence de l'homme et les effets du changement climatique.

1. Introduction

L'importance d'une description précise des surfaces terrestres pour la prévision numérique du temps est bien établie dans la communauté scientifique. Bien que la complexité du Système-Terre impose des simplifications conceptuelles et pratiques, les éléments fondamentaux sont paramétrés pour simuler les réservoirs et les flux (décrivant les échanges entre réservoirs) à l'interface entre surface et atmosphère. L'amélioration des prévisions et leur fiabilité aux échelles spatiales et temporelles plus fines et aux longues échéances (mensuelles et saisonnières) ont en effet motivé l'inclusion progressive des processus de surface dans les modèles de prévision numérique du temps, ainsi que pour les simulations climatiques et les applications environnementales.

Les surfaces océaniques, et plus généralement toutes les surfaces d'eau libre, représentent un stockage d'énergie qui détermine la température de l'eau en surface et les échanges de quantité de mouvement entre les vents, les vagues, et les courants [1]. Ceci est important, surtout dans la bande tropicale car ce mécanisme est capable de moduler l'évolution du temps et du climat à grande-échelle. Des impacts à l'échelle locale sont également visibles à toutes latitudes, notamment pour la prévision des brises, le développement de la couche limite atmosphérique, la formation de brouillard, les précipitations intenses et localisées et l'interaction avec les vagues et la glace de mer.

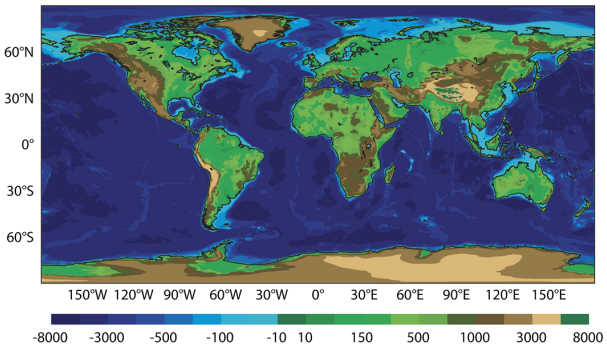

Figure 1. Les reliefs terrestres des surfaces continentales et des océans (en mètres depuis la surface de la mer) dans le modèle de prévision du CEPMMT.

Les surfaces continentales sont caractérisées par une grande variabilité des cycles diurne et saisonnier, un fort **couplage surface-atmosphère**, et l'effet mémoire des stocks d'eau et d'énergie [2]. Les surfaces terrestres dans les modèles de prévisions ont pour rôle de permettre une description cohérente des cycles de l'eau et de l'énergie à des échelles temporelles allant de quelques minutes à plusieurs décennies. La modélisation des surfaces continentales [3],[4] est donc un sujet d'étude nécessaire, pour mieux représenter les différents processus physiques dans le but d'étendre la fiabilité des prévisions météorologiques. Elle s'appuie d'abord sur une connaissance de plus en plus précise des caractéristiques physiographiques telles que le relief terrestre, la nature du sol et de la végétation, ou la bathymétrie [5] océanique (illustration du relief dans le modèle du CEPMMT, Figure 1).

Aux moyennes latitudes, le mécanisme de couplage entre la surface terrestre et l'atmosphère est représenté par la rétroaction évaporation-précipitations [6], qui influe sur les paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité de la basse troposphère, et les nuages. Aux latitudes élevées et dans les zones montagneuses, la présence de neige affecte l'évolution des températures atmosphériques à cause de son albédo [7] élevé et de son pouvoir d'isolation thermique permettant un découplage entre la surface et l'atmosphère, à l'origine de fortes inversions de température observées près de la surface en hiver.

Outre ce rôle de condition à la limite inférieure de l'atmosphère pour la prévision du temps, les surfaces continentales abritent également les ressources dont dépendent les populations locales (l'agriculture, les transports, la production d'énergie renouvelable). Dans le cas d'évènements extrêmes un danger direct existe pour la vie et les biens et cela augmente l'impact et l'importance d'une prévision localisée et fiable pour la prévention des risques.

C'est ce double rôle qui a poussé récemment les centres météorologiques à développer des plateformes numériques dédiées à la modélisation et à l'assimilation des données d'observations pour la surface. Elles ont pour objectif, non seulement d'apporter une meilleure caractérisation des surfaces dans les modèles de prévision du temps et de climat, mais aussi de diffuser directement une information utile sur les états présents et futurs de ces ressources, au même titre que ce qui est fait en prévision du temps.

Dans ces plateformes, les processus physiques et biologiques aussi réalistes que possible sont paramétrés par des schémas décrivant les flux de matière, d'énergie et de quantité de mouvement entre les composantes de la surface (**biosphère, hydrosphère** et **cryosphère**) et l'atmosphère.

2. La biosphère

La biosphère comprend les processus bio-géo-physiques des surfaces terrestres incluant les espèces vivantes, et notamment l'écosystème végétation. De nombreuses études de sensibilité ont montré que la description des processus biophysiques des surfaces continentales peut affecter de manière significative la prévision de variables météorologiques, telles que les précipitations, le vent des basses couches ou la température sous abri.

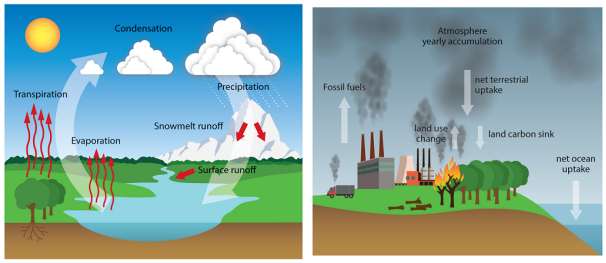

Figure 2. Le cycle de l'eau (gauche) et le cycle du carbone (droite) entre la surface et l'atmosphère.

Les schémas de surface adoptés sont représentatifs de diverses échelles spatiales comme celle de la plante, du champ, du bassin versant dans le cas continental, ou d'un bassin océanique disposant d'observations ponctuelles. Elles sont des représentations simplifiées des processus physiques qui permettent de décrire les principaux mécanismes de rétroactions, qui peuvent donc être entachées d'erreurs systématiques parfois importantes.

L'objectif principal des schémas de surface utilisés en prévision numérique du temps consiste à calculer la température et l'humidité spécifique à la limite inférieure des modèles atmosphériques. Ces variables sont nécessaires dans l'estimation des flux, de chaleur, d'eau, de quantité de mouvement, échangés avec l'atmosphère.

Récemment, le concept d'échelle temporelle a été introduit dans les schémas de surface. Il permet de distinguer les couches superficielles qui réagissent directement au forçage en surface, des couches plus profondes moins réactives qui jouent un rôle tampon pour la surface et qui sont plus importantes pour simuler les anomalies du cycle de l'eau (Lire Risquons-nous d'avoir une pénurie d'eau ?) et différentes températures dans le sol par exemple pour représenter l'évolution du permafrost (Lire Le permafrost).

Le cycle du carbone, auquel participent toutes les espèces vivantes de la planète (Lire Un cycle du carbone perturbé par les activités humaines), se réduit essentiellement au cycle de la végétation dans les modèles de prévision numérique du temps. Il joue un rôle important dans le bilan d'énergie et de quantité de mouvement en surface. En modélisation climatique, la représentation des processus bio-géo-chimiques de la végétation, des sols et des océans, est fondamentale car elle permet de réguler la teneur en dioxyde de carbone atmosphérique, par exemple par le processus de photosynthèse qui constitue un puissant mécanisme d'absorption du CO_2 atmosphérique.

Dans le cadre du programme Européen Copernicus [8] un service opérationnel de suivi des échanges de CO_2 en surface a été mis en place au CEPMMT. Son but consiste à fournir des informations objectives complémentaires aux inventaires forestiers qui actuellement permettent le suivi des changements des flux de CO_2 par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) (lien vers article sur le GIEC).

La description de la végétation et d'autres aspects liés à la biologie, comme la réponse aux conditions de stress hydrique et les aspects bio-géo-chimiques (stock et variations de la biomasse), sont donc importants pour faciliter les activités de suivi et favoriser la qualité des prévisions. Plusieurs travaux ont démontré l'impact d'une description du cycle saisonnier de la végétation sur l'évaporation. L'indice foliaire [9], qui change selon la saison et les conditions de stress hydrique, est souvent spécifié à partir des données satellitaires (par exemple ceux fournis par le capteur MODIS). Ces données permettent de construire une climatologie mensuelle de l'état de la végétation plus réaliste et d'améliorer la simulation des échanges d'eau et de CO_2 avec l'atmosphère.

3. L'hydrosphère

Les principaux flux naturels d'eau sont les précipitations, l'évaporation, et le ruissellement. Les principaux réservoirs d'eau dans les surfaces continentales peuvent être séparés en quatre catégories :

le sol (contenant l'eau dans la zone racinaire et souvent plus bas dans la nappe phréatique, sous forme liquide ou glace)

la végétation (qui a un contenu en eau important)

la neige (avec un contenu en eau liquide variant de 10% à 50% en volume) et les glaciers

les réservoirs d'eau tels que les lacs et les rivières.

Les schémas hydrologiques de surface décrivent les échanges d'eau entre les surfaces, la basse atmosphère et l'infiltration de

l'eau dans les sols. Manabe [10] a introduit le premier schéma de surface dans un modèle de circulation générale pour l'étude du climat, dans le but de représenter le réservoir d'eau dans le sol. Ce modèle simple considère un seul réservoir d'eau, permettant de réguler l'évaporation des surfaces continentales en fonction de leur contenu en eau. Ces schémas ont ensuite évolué vers des modèles à deux couches [11] ou plusieurs avec une discrétisation verticale plus fine. L'infiltration est souvent représentée selon la loi de Darcy [12] généralisée pour les sols non-saturés par Richards [13] avec plusieurs développements provenant de l'étude d'hydrologie du bassin versant. Cela permet d'utiliser les modèles de sols, comme dans le cas du CEPMMT [14], couplés avec des modèles du routage de rivières dans la prévision des inondations, comme dans le projet du *Global Flood Awareness System* [15].

Les océans (Lire Le milieu marin) échangent chaleur

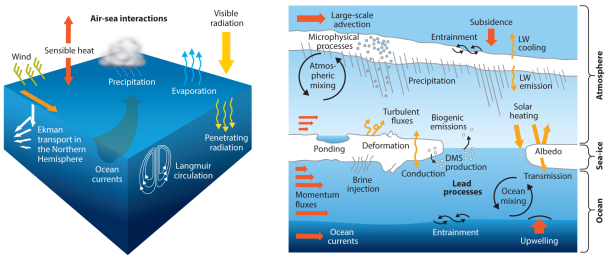

Figure 3. Les interactions océan-atmosphère et les processus de la cryosphère océanique

et quantité de mouvement avec l'atmosphère. Ils influencent la prévision numérique du temps à toutes les échéances. L'échange de chaleur avec l'atmosphère dépend de la température superficielle de la mer qui est elle-même influencée par les conditions météorologiques mais aussi par les courants océaniques (par exemple le *Gulf Stream* et le *Kuroshio* dans l'hémisphère Nord), et par des phénomènes climatiques comme l'ENSO (*El Niño Southern Oscillation*), avec de fortes conséquences sur la circulation atmosphérique aux échelles régionales et continentales.

Le besoin de modéliser l'océan est particulièrement évident aux échelles temporelles étendues et en interaction avec le réchauffement climatique [16], mais aussi dans la prévision à quelques jours pour les phénomènes météorologiques extrêmes comme les cyclones tropicaux [17] (Lire Les cyclones tropicaux : développement et organisation). Souvent les études météorologiques sont focalisées sur les échanges superficiels en interaction avec le vent, les vagues et la couche limite océanique. Ces développements visent l'amélioration de la prévision marine, notamment la hauteur des vagues qui conditionne toutes les activités de transport et d'extraction des ressources océaniques.

La plupart des centres météorologiques ne considèrent pas encore l'utilisation des modèles d'océan en évolution couplée avec l'atmosphère dans leur chaines opérationnelles. Toutefois leur introduction dans la prévision météorologique représente une perspective de développement importante qui répondrait aux défis de la prévision saisonnière couplée, pour laquelle l'océan est l'une des sources principales de prévisibilité.

4. La cryosphère

La neige et la glace (marine et continentale) sont des réservoirs d'énergie importants qui peuvent retarder le réchauffement ou le refroidissement de l'atmosphère et du sol par libération ou absorption de chaleur latente. Le manteau neigeux constitue un isolant thermique très efficace, car il peut contenir jusqu'à 90% d'air (pour une densité d'environ 100 kg/m3 dans le cas de neige fraîchement déposée). Les processus qui gouvernent l'évolution de la couche de neige sont complexes et les schémas utilisés dans les modèles numériques pour la prévision du temps décrivent seulement les effets de température et de compaction liés à la masse, conduisant à une augmentation de la densité, ainsi que les modifications de l'albédo. La neige constitue aussi un réservoir très important d'eau douce qui module les débits de rivières, surtout aux latitudes élevées.

La couverture neigeuse et la glace ont un fort impact sur la qualité des prévisions météorologiques et climatiques. En effet, l'absorption du rayonnement solaire à l'interface terre-atmosphère peut être modifiée d'un facteur pouvant atteindre quatre par la présence de neige suite à une variation d'albédo (Lire L'atmosphère et l'enveloppe gazeuse de la Terre). Cet albédo qui rétroagit d'ailleurs avec la température de surface contribue à accélérer les changements saisonniers et climatiques.

Aux hautes latitudes et dans les régions montagneuses, la neige agit également comme un important réservoir d'énergie et d'eau. Par conséquent, une représentation précise de la masse de neige est cruciale à toutes échéances de prévisions, avec des conséquences directes pour l'hydrologie et la température des surfaces sous-jacentes.

De nombreux modèles de neige ont été développés pour des applications variées, telles que les études de processus de neige, le

ruissellement, et la prévision des avalanches, et pour les modèles atmosphériques. Brun *et al* [18] ont fait une analyse détaillée des modèles existants et de leurs applications, qui a permis d'aboutir à des schémas pour les modèles atmosphériques (globaux et régionaux). Le but de ces schémas est de fournir des conditions à la limite inférieure de l'atmosphère pour le couplage au-dessus des régions enneigées. Le contenu en eau de la neige et les flux d'énergie entre la couche de neige et le sol sont également importants pour atteindre ce but. Une attention particulière doit aussi être accordée au rôle d'isolation thermique de la neige dans le contrôle du couplage sol-glace-atmosphère.

Une meilleure représentation du couplage neige-atmosphère [19],[20] a conduit à des améliorations de la prévision des flux de surface aux échelles temporelles allant de la journée à la saison. De même, la modélisation de la glace marine s'est révélée importante pour bien représenter l'évolution interannuelle [21] et la forte réduction de l'extension et de l'épaisseur de la glace due au réchauffement climatique.

5. Le système Terre

La représentation des processus d'échanges entre les surfaces et l'atmosphère pour ce qui concerne l'énergie, l'eau et le carbone (parmi d'autres constituants), est essentielle pour modéliser, et donc prévoir, l'évolution dans le temps de l'état du Système-Terre.

L'étude des écosystèmes terrestres est une priorité dans la recherche scientifique ainsi que son suivi opérationnel car le développement durable et l'économie des sociétés en dépendent fortement. L'homme lui-même en fait partie en occupant majoritairement l'écosystème urbain, qui est souvent mal représenté dans les modèles météo-hydrologiques, car les zones urbanisées occupent une fraction des surfaces continentales inférieure à 1%.

La modélisation du Système-Terre devra bientôt considérer les diverses modifications anthropiques affectant les cycles naturels, pas seulement à l'échelle du climat où l'effet serre est déjà pris en compte de façon simplifiée, mais à toutes les échelles spatio-temporelles. Dans ce contexte, la modélisation des cycles globaux de l'eau, de l'énergie et de la biomasse en surface, à des résolutions spatiales suffisamment élevées pour représenter les principaux processus physiques, est un sujet prioritaire pour la recherche en modélisation numérique du Système-Terre (*Earth-System-Modelling*).

L'agro-écosystème est particulièrement sollicité, car il est en interaction la plus directe avec la société, à travers la production alimentaire qui est fortement influencée par la variabilité météorologique et climatique. Les terrains agricoles et forestiers, pour la plupart gérés par l'homme en vue de la production de ressources, doivent être modélisés et suivis régulièrement pour reproduire les processus d'irrigation et d'exploitation forestière. Ceux-ci sont en effet capables de provoquer une rétroaction atmosphérique importante dans la prévision locale et régionale en changeant la disponibilité en eau pour l'évapotranspiration et en changeant la rugosité de la surface en interaction avec les vents.

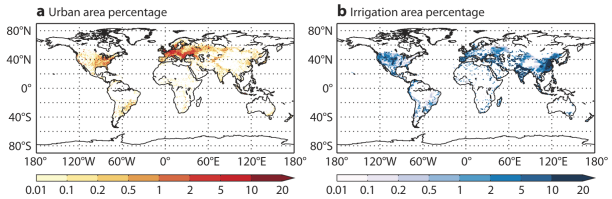

Figure 4 . L'action humaine dans les modifications de sols urbanisés (a) et irrigués (b).

Les progrès de la recherche sur ces composantes de la surface du Système-Terre reposent sur la disponibilité des données d'observation et en particulier de la télédétection satellitaire, qui est le moyen le plus adapté pour obtenir une couverture globale et homogène avec une fréquence suffisante pour décrire les processus. Les données de télédétection disponibles pour le suivi global des surfaces continentales en temps-réel vont augmenter grâce au programme *Copernicus Sentinels* et à la mission d'exploration de la terre BIOMASS de l'agence spatiale Européenne ESA. Ceci permettra d'identifier les faiblesses des modèles de prévisions et de corriger les erreurs aléatoires et systématiques des analyses dans le cadre de l'assimilation des données (Lire Assimilation des données météorologiques).

Malgré la mise à disposition de ces jeux de données, chacun d'eux ne pourra pas suffire à caractériser complètement l'état de la surface. Ceci nécessite en effet de considérer une approche intégrée pour l'évaluation hydrométéorologique et climatique des surfaces, comme cela a été proposé pour documenter la qualité des ré-analyses climatiques [22].

Dans les années à venir les plateformes de modélisation de la surface telle que SURFEX [23], vont permettre à la communauté scientifique d'avancer de façon plus fédérée dans le domaine de la représentation de la complexité naturelle et anthropogénique

de la surface terrestre. Il s'agit d'efforts très importants entrepris par les services météorologiques pour répondre aux besoins croissants de la prévision environnementale.

Références et notes

Image de couverture : Chutes de Niagara en hiver, côté USA

[1] Belcher SE, Hewitt HT, Beljaars A, Brun E, Fox-Kemper B, Lemieux JF, Smith G, Valcke S. 2015: Ocean-waves-sea-ice-atmosphere interactions. In: Seamless Prediction of the Earth System: from Minutes to Months, WMO-No. 1156. World Meteorological Organization.

[2] Dirmeyer, P., C. Peters-Lidar, G. Balsamo, 2015: Land Atmosphere Interactions and the Water Cycle, In: Seamless Prediction of the Earth System: from Minutes to Months, WMO-No. 1156 2015. World Meteorological Organization.

[3] Balsamo, G., S. Boussetta, E. Dutra, A. Beljaars, P. Viterbo, and B. Van den Hurk, 2011: Evolution of land surface processes in the IFS, ECMWF Newsletter, 127, 17-22.

[4] Balsamo, G., A. Agusti-Panareda, C. Albergel, A. Beljaars, S. Boussetta, E. Dutra, T. Komori, S. Lang, J. Munoz-Sabater, F. Pappenberger, P. de Rosnay, I. Sandu, N. Wedi, A. Weisheimer, F. Wetterhall, E. Zsoter, 2014: Representing the Earth surfaces in the Integrated Forecasting System: Recent advances and future challenges, ECMWF Tech. Memo. 729 October 2014. http://doi.org/10.13140/2.1.4248.0324

[5] La bathymétrie détermine à la fois le relief des océans et leur profondeur locale.

[6] Beljaars A., Viterbo P., Miller M. and Betts A. 1996. The anomalous rainfall over the United States during July 1993: Sensitivity to land surface parameterization and soil anomalies. Mon. Weather Rev., 124, 362-383.

[7] On désigne par albédo la fraction du rayonnement solaire réfléchi et non absorbé par la surface terrestre.

[8] http://www.copernicus.eu/

[9] L'indice foliaire représente la surface des feuilles vertes par unité de surface de sol.

[10] Manabe S., 1969: Climate and ocean circulation: 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. Mon. Wea. Rev., 97, 739– 774.

[11] Noilhan J. and Planton S., 1989: A simple parametrization of land surface processes for meteorological models. Mon. Wea. Rev. 117, 536-549.

[12] Darcy H.,1856: Les fontaines publiques de la ville de Dijon, V. Dalmont, Paris.

[13] Richards, L. A., 1931: "Capillary conduction of liquids through porous mediums". Physics. 1 (5): 318–333.

[14] Balsamo, G., P. Viterbo, A. Beljaars, B. van den Hurk, M. Hirschi, A.K. Betts, and K. Scipal, 2009: A Revised Hydrology for the ECMWF Model: Verification from Field Site to Terrestrial Water Storage and Impact in the Integrated Forecast System. J. Hydrometeor., 10, 623-643.

[15] GloFAS, http://globalfloods.jrc.ec.europa.eu/

[16] Balmaseda, M.A., K.E. Trenberth, and E. Källén, 2013: Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content, Geophys. Res. Lett., vol. 40, pp. 1754-1759. http://dx.doi.org/10.1002/grl.50382

[17] Glenn, S. M., Miles, T. N., Seroka, G. N., Xu, Y., Forney, R. K., Yu, F., et al. 2016 : Stratified coastal ocean interactions with tropical cyclones, 7 SP. http://doi.org/10.1038/ncomms10887

[18] Brun, E., Z. Yang, R. Essery, and J. Cohen, 2008: Snow-cover parameterization and modeling. Snow and Climate, R. L.

Armstrong and E. Brun, Eds., Cambridge University Press, 125–180.

[19] Boone, A., and P. Etchevers, 2001: An intercomparison of three snow schemes of varying complexity coupled to the same land-surface model: Local scale evaluation at an Alpine site. J. Hydrometeor., 2, 374-394.

[20] Dutra, E., P. Viterbo, P. M. A. Miranda, G. Balsamo, 2012: Complexity of snow schemes in a climate model and its impact on surface energy and hydrology. J. Hydrometeor, 13, 521-538. doi:10.1175/JHM-D-11-072.1.

[21] Vihma, T., 2014 : Effects of Arctic Sea Ice Decline on Weather and Climate: A Review. Surv Geophys. 35: 1175. doi:10.1007/s10712-014-9284-0.

[22] Balsamo, G., Albergel, C., Beljaars, A., Boussetta, S., Brun, E., Cloke, H., Dee, D., Dutra, E., Muñoz-Sabater, J., Pappenberger, F., de Rosnay, P., Stockdale, T., and Vitart, F.: ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set, Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 389-407, doi:10.5194/hess-19-389-2015. 2015. http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/389/2015/hess-19-389-2015.html

[23] Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., and Voldoire, A.: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, Geosci. Model Dev., 6, 929-960, doi:10.5194/gmd-6-929-2013, 2013.

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** BALSAMO Gianpaolo (2018), Les modèles de biosphère, hydrosphère et cryosphère, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=2481

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.