

MODÉLISATION DES ÉCHANGES DE SURFACE DANS LES MODÈLES MÉTÉOROLOGIQUES

J.-F. MAHFOUF, J. NOILHAN

RÉSUMÉ

Nous présentons ici une synthèse des développements effectués à Météo-France dans le cadre de la modélisation des échanges de surface pour la prévision du temps et du climat. Nous montrons comment les données des grandes campagnes d'observation (Hapex-Mobilhy 86, Arme 84, Efeda 91, Hapex-Sahel 92) ont été utilisées pour la validation et la calibration d'un schéma de surface, ainsi que pour définir des procédures de moyenne spatiale des propriétés de la surface.

¹Météo-France, CNRM 42, Avenue Coriolis, 31057 Toulouse cedex.

INTRODUCTION

Les champs météorologiques sont fortement influencés par les surfaces continentales car celles-ci freinent le vent, interceptent le rayonnement solaire et les précipitations. Il est donc impérieux de représenter les échanges de quantité de mouvement, d'énergie et de masse à l'interface sol-atmosphère en modélisation météorologique. Un problème spécifique à ces modèles est que l'on considère de grandes mailles horizontales allant de la dizaine de kilomètres (modélisation à mésoéchelle) à la centaine de kilomètres (modélisation globale) alors que les échanges de surface interviennent à des échelles spatiales très inférieures. On a donc recouru à une représentation implicite des processus *sous-maille*, ce que l'on désigne par paramétrisation. Afin de pouvoir être utilisées dans des modèles de climat où les paramètres caractérisant la surface sont à spécifier à l'échelle globale, et dans les modèles de prévision où se pose le problème de l'état initial, ces paramétrisations doivent être d'une complexité réduite.

On décrit dans cet article les différentes étapes conduisant à la mise en œuvre d'un schéma de surface dans un modèle météorologique. La première étape concerne le développement et la validation d'une paramétrisation par confrontation avec des mesures effectuées à l'échelle locale (chapitre suivant). Ensuite, l'interprétation de campagnes de mesures d'échelle régionale de type Hapex permet d'aborder le problème de la variabilité sous-maille (chapitre 3 : représentation des échanges à mésoéchelle et agrégation spatiale des propriétés de surface). Finalement, ces méthodes sont appliquées à la modélisation climatique (chapitre 4 : la modélisation climatique).

Cette présentation s'appuie sur les résultats obtenus avec le schéma de surface Isba (Interactions Sol Biosphère Atmosphère) développé à Météo-France.

VALIDATION À L'ÉCHELLE LOCALE

L'objectif de ce type de validation est de reproduire les flux de surface pour un état hydrique donné à une échelle spatiale où l'ensemble de l'information est mesurable. Comme on souhaite avant tout calibrer la fonction de transfert eau du sol-flux de surface, le modèle doit être initialisé avec un contenu en eau observé sur la tranche de sol qui contribue aux échanges de surface (quelques dizaines de centimètres dans le cas de sol nu, de l'ordre du mètre en présence de végétation). Pour les mêmes raisons, on s'intéresse aux longues séries de mesures (de la semaine jusqu'au cycle annuel) afin de décrire des variations significatives du bilan hydrique. Saturation, drainage, assèchement et recharge du sol sont des phases cruciales du bilan hydrique qu'un schéma de surface doit reproduire. La simulation de l'évapotranspiration réelle est un élément clé de la validation, en particulier la modélisation des différentes composantes du flux de chaleur latente : évaporation à la surface du sol, transpiration, évaporation de l'eau interceptée et

de la rosée sur la végétation. Pour un état hydrique donné, les échanges dépendent du type de sol et de végétation si bien que les schémas utilisés en météorologie doivent être confrontés aux associations type de sol-type de végétation les plus représentatives à l'échelle globale, associations que l'on désigne parfois sous le terme de biome : forêts boréales et tropicales, cultures des zones tempérées, savanes, déserts. Le mode de validation le plus courant et le plus simple est le mode forcé pour lequel le forçage atmosphérique est imposé au modèle (température et humidité de l'air, vent, flux radiatifs incidents) qui en retour simule des flux de surface (rayonnement net, flux de chaleurs sensible et latente, flux dans le sol) devant être comparés aux observations disponibles. Dans le cas d'Isba, la texture du sol et sa profondeur doivent être spécifiées. De plus, il faut prescrire les valeurs de l'albédo (α), de l'émissivité (ϵ), de la rugosité dynamique (Z_0), de l'indice foliaire (LAI), d'une valeur de la résistance de surface minimum de la végétation (R_{min}) et de la fraction de sol recouvert par la végétation (veg). Ces deux derniers paramètres sont souvent utilisés pour ajuster au mieux les sorties du modèle aux données. Isba a été calibré sur de nombreux jeux de données comme indiqué dans le tableau 1.

Les données Hapex-Mobilhy 86 ont permis de vérifier la simulation du contenu en eau du sol sur de longues périodes (quelques mois à un an) sur des sites de cultures. Ces simulations de l'évaporation et de l'eau du sol ont servi de base pour développer une méthode d'initialisation de l'eau du sol dans les modèles météorologiques. D'autre part, les données d'Hapex-Mobilhy 86 ont permis d'examiner en détail les cycles diurnes sur la forêt landaise et les cultures et de calibrer Isba afin de reproduire correctement l'interception des précipitations par les cultures, le contrôle de la transpiration de la forêt en présence d'une atmosphère trop sèche, ou la réduction de la transpiration de cultures suite à leur maturation. Les données de sol nu (Avignon 84 et Efeda 91) ont servi à aborder le problème difficile de la paramétrisation de l'évaporation à la surface du sol. Diverses formulations ont été comparées. Dans le cas de sols très secs (Efeda 91), la calibration d'Isba a révélé la nécessité de représenter les échanges d'eau en phase vapeur dans le sol.

Les données d'Hapex-Sahel 92 permettent d'aborder la représentation des échanges de surface dans le cas de couverts épars de type savane, et certainement de cerner les limites d'Isba qui n'utilise qu'un seul bilan d'énergie pour représenter le sol, et les strates herbacée et arbustive. La figure 1 illustre la capacité du schéma Isba à reproduire un cycle diurne des différentes composantes du bilan d'énergie sur le site central est (Banizoumbou) de cette campagne. Enfin, les données collectées sur la forêt amazonienne pendant deux années (Arme 84-85) permettent de calibrer le module d'interception d'Isba sur une région où la réévaporation de l'eau interceptée joue un rôle important sur le cycle de l'eau atmosphérique.

Enfin, indiquons qu'un ensemble d'intégrations annuelles d'Isba ont été réalisées dans le cadre des programmes d'intercomparaison internationaux Slaps et Pilps permettant ainsi d'apprécier la forte dispersion des flux prévus par les paramétrisations les plus courantes, résultat plaçant un peu plus pour l'utilisation de données réelles.

Tableau 1

Synthèse des validations à l'échelle locale du schéma de surface Isba

Référence	Données	Échelle de Temps	Types de sol-végétation
Noilhan-Planton (MWR, 89)	Hapex-Mobilhy 86	Jours clairs	Cultures/Limon-sable
Jacquemin-Noilhan (BLM, 90)	Hapex-Mobilhy 86	Jours clairs	Forêt pin/Sable
Mahfouf-Jacquemin (JAM, 89)	Hapex-Mobilhy 86	Jours pluvieux	Cultures/Limon-sable
Mahfouf (BLM, 90)	Hapex-Mobilhy 86	Mois	Cultures/Limon-sable
Mahfouf-Noilhan (CNRM, 94)	Hapex-Mobilhy 86	Année	Soja/Limon
Mahfouf-Noilhan (JAM, 91)	Avignon 84	Semaine	Sol nu/Limon
Braud et al. (BLM, 93)	Efeda 91	Quinzaine	Sol nu/Limon
Giodani et al. (AFM, 95)	Efeda 91	Mois	Sol nu/Limon
Germain (CNRM, 91)	Fife 87	Jours clairs	Prairie/Limon
Manzi (CNRM, 93)	Arne 84	Année	Forêt Amazonie/Limon
Noilhan et al. (ECMWF, 92)	Arne 84	Deux années	Forêt Amazonie/Limon
Mahfouf (Niamey, 93)	Hapex-Sahel 92	Journée	Savane/Sable
Braud-Noilhan (CNRM, 94)	Hapex-Sahel 92	Mois	Savane/Sable

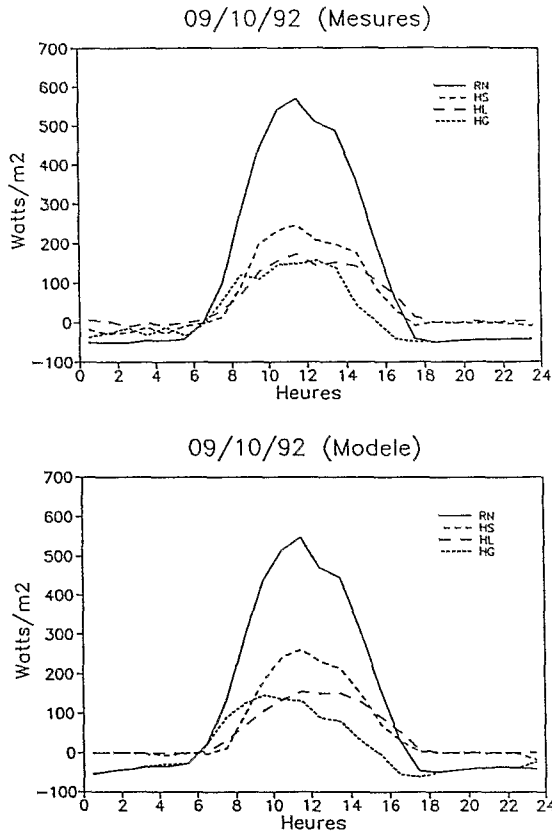


Figure 1:

Bilan d'énergie observé (station de mesure de flux CNRM/AM) et modélisé par le schéma Isba pour la journée du 9 octobre 1992 sur une jachère à Guiéra durant la campagne Hapex-Sahel 92.

REPRÉSENTATION DES ÉCHANGES À MESOÉCHELLE ET AGRÉGATION SPATIALE DES PROPRIÉTÉS DE SURFACE

L'objectif principal des programmes Hapex (Hapex-Mobilhy, Hapex-Sahel, Efeda) est de tester une paramétrisation de surface qui soit représentative des échanges à l'échelle de la taille de maille des modèles globaux, soit au moins 100 km. La validation *agrégée* d'Isba a pu être réalisée par rapport aux données de Hapex-Mobilhy et de Efeda (réseau de surface, données aéroportées, radiosondages), en utilisant les propriétés effectives de la surface. Elles sont définies comme moyennes arithmétiques pour la fraction de végétation et l'indice foliaire, moyenne logarithmique pour la longueur de rugosité, et moyenne harmonique pour la résistance stomatique. Une représentation agrégée de la

texture du sol basée sur la moyenne des pourcentages d'argile et de sable a pu être examinée. La figure 2 montre la qualité des résultats du schéma Isba *agrégé* par rapport à celle de l'approche classique où ne sont considérées que les propriétés *dominantes* de la végétation et du sol. Sur cette figure, on compare la simulation d'un flux d'évaporation agrégé (courbe 1) au cumul d'évaporation observé pendant 25 jours au cours d'Hapex-Mobilhy. L'observation représente une moyenne pondérée de l'évaporation observée sur la forêt landaise et sur une zone de cultures environnantes (12 stations de flux). Le flux agrégé est simulé par le schéma Isba utilisant des paramètres représentatifs de la variabilité spatiale de la végétation (forêt landaise et cultures) et du sol (sable et limon) dans le carré Hapex-Mobilhy. Si la variabilité sous-maille n'est pas décrite au profit d'un type dominant (ici, la forêt), alors le flux d'évaporation est sous-estimé sur la période considérée (courbe 2). La courbe 3 donne le cumul de l'évaporation potentielle simulée par Isba si les sols étaient saturés.

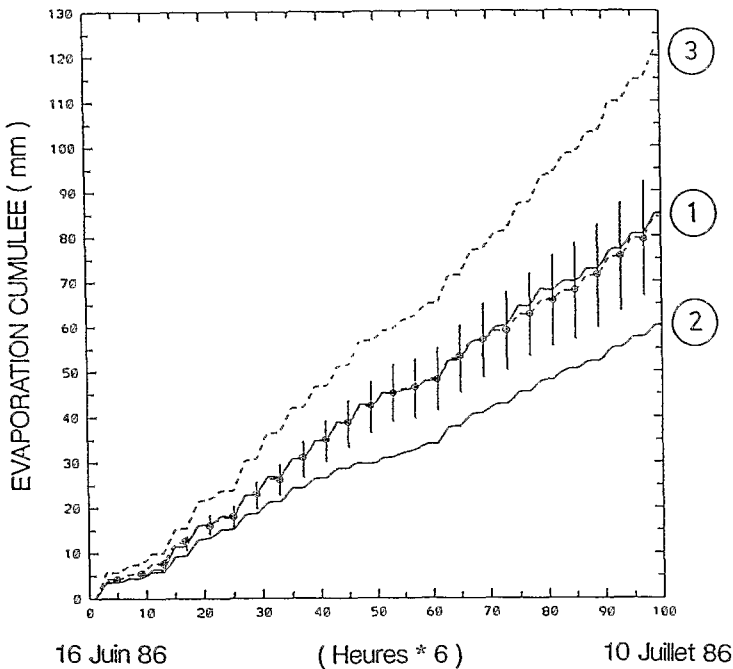


Figure 2 :

Évaporation cumulée pour le carré Hapex-Mobilhy : moyenne des observations (barres verticales), simulation utilisant les propriétés agrégées de la zone Hapex (courbe 1), simulation utilisant les propriétés du type dominant de surface (courbe 2), simulation supposant la surface saturée (évaporation potentielle) (courbe 3).

LA MODÉLISATION CLIMATIQUE

Le schéma de surface Isba a été introduit dans les modèles circulation générale de l'atmosphère de Météo-France (d'abord dans le modèle Emeraude et à présent dans le modèle Arpege) pour simuler le climat présent et d'éventuels changements climatiques (augmentation des gaz à effet de serre, déforestations tropicales...).

La méthodologie retenue pour coupler le modèle atmosphérique au schéma de sol-végétation, s'est largement appuyée sur les développements réalisés à mésoéchelle et à l'échelle locale. Ce couplage nécessite dans un premier temps la spécification à l'échelle globale sur la grille du modèle des divers paramètres dont le schéma a besoin pour caractériser la surface. Actuellement la taille de maille des modèles de climat est comprise entre 300 et 600 km. Il existe diverses climatologies caractérisant les types de sol et de végétation sur l'ensemble du globe : la résolution de ces bases de données (issues d'atlas pédologiques et géographiques) est d'environ 100 km. Dans le modèle Arpege nous avons utilisé la classification de la végétation proposée par WILSON et HENDERSON-SELLERS (1985) dans laquelle les 53 types initiaux sont regroupés en 15 classes.

Dans un premier temps une table de correspondance permet de passer de ces types aux divers paramètres du schéma (veg, LAI, α , Z_0 , R_{min}) à la résolution d'un degré carré. Elle est établie en utilisant au maximum les mesures et les calibrations locales du schéma effectuées dans le cadre des expériences de type Hapex sur des écosystèmes contrastés.

Dans un second temps on passe de cette résolution *fine* à la résolution plus grossière du modèle en utilisant les définitions de paramètres effectifs issues de la modélisation à mésoéchelle (NOILHAN et LACCARÈRE, 1995). Pour l'estimation de la texture des sols la classification de WILSON et HENDERSON-SELLERS (1985), qui ne fournissait que des informations qualitatives, a été abandonnée au profit de celle, plus récente, de WEBB *et al.* (1991) qui définit directement les pourcentages de sable et d'argile nécessaires pour estimer les coefficients thermohydriques du schéma.

L'information satellitale est également utilisée pour cartographier l'albédo du sol nu à partir des données Météosat (DEDIEU *et al.* 1987) et NOAA 4 (GELEYN et PREUSS, 1983) ainsi que pour saisonnaliser (affecter une valeur différente mois par mois) l'indice foliaire et la fraction de végétation en utilisant les indices globaux de végétation (GVI) élaborés à partir des données NOAA/AVHRR.

Le gain apporté par une représentation plus détaillée des surfaces continentales peut être apprécié en comparant la simulation, pour le climat présent, des composantes des bilans hydrique et énergétique en surface à des climatologies observées. On se heurte actuellement à un manque de données à l'échelle globale pour ces quantités. En dehors des précipitations et des températures à 2 mètres qui sont des paramètres directement mesurés, des quantités telles que l'eau du sol ou le rayonnement net font appel à des modèles ou à des formules empiriques.

Les analyses des grands centres de prévision météorologique (CEPMMT, NMC) fournissent tous les termes des bilans énergétique et hydrique en surface, mais le rapport observation sur modèle est faible. Si on accepte une information plus régionale ou locale, on se heurte à un problème de représentativité spatiale. À l'échelle d'un grand bassin relativement homogène comme l'Amazonie les mesures ponctuelles sont supposées représentatives d'une échelle spatiale plus grande. C'est ainsi que les résultats de la campagne de mesure Arme 84 sont souvent utilisés pour évaluer les performances des modèles de climat sur la forêt tropicale d'Amazonie. Le schéma de surface Isba est dans cette zone capable de maintenir un taux d'évaporation à peu près constant durant toute l'année en accord avec les estimations de SHUTTLEWORTH (1988) alors que la plus faible réserve utile du schéma de surface opérationnel de Météo-France conduit à une forte réduction de l'évaporation en période sèche (figure 3).

Cette étape franchie, on peut étudier la réponse du cycle de l'eau à une modification des conditions de surface à l'échelle continentale (déforestation, désertification). Les résultats produits par les divers modèles sont loin de converger et un examen approfondi des diverses boucles de rétroactions doit être fait. Il semble notamment que les interactions de la surface avec la convection soient au cœur des divergences entre les modèles.

EVAPORATION DE SURFACE Forêt d'Amazonie

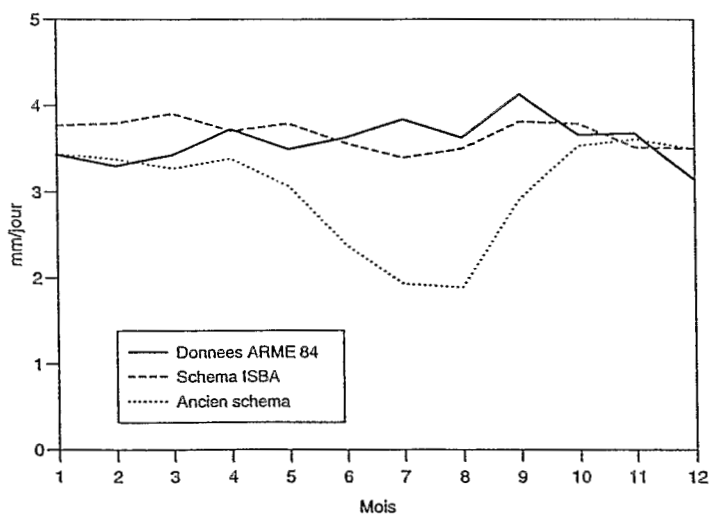


Figure 3 :

Modélisation du cycle annuel de l'évaporation de surface sur la forêt d'Amazonie avec le modèle de circulation générale de Météo-France incluant ou non le schéma de sol-végétation Isba. L'estimation de ce terme par SHUTTLEWORTH (1988) à partir des données de la campagne Arme 84 est également reportée.

CONCLUSION

Les campagnes de type Hapex ont permis de faire progresser de manière importante la paramétrisation des transferts hydriques et énergétiques entre le sol et l'atmosphère dans les modèles météorologiques. Le cycle diurne du bilan d'énergie a ainsi pu être documenté de façon détaillée sur des écosystèmes variés. La spatialisation des flux a été abordée en utilisant la modélisation à mésoéchelle préalablement validée, grâce notamment aux mesures aéroportées. Il semble possible de définir des paramètres agrégés pour les propriétés de la végétation et le sol (malgré la présence de plus fortes non-linéarités), afin d'estimer le flux d'évaporation moyen d'une maille de 100 km de côté. Par contre, l'évaluation du cycle annuel des divers termes du bilan hydrique est plus difficile. En effet, les périodes de mesure des flux de surface ont été limitées à 2 mois au cours des campagnes Hapex. Pour le climat, on manque actuellement de données de validation à l'échelle d'intérêt pour mieux quantifier les faiblesses des modèles de circulation générale. Il apparaît nécessaire de s'orienter vers l'utilisation de paramètres agrégés comme le ruissellement, déduit de la mesure du débit des grands fleuves, ou des flux moyens intégrés des mesures Hapex. Ces constatations plaident donc en faveur de la mise en place de campagnes de mesures à long terme visant à mieux documenter l'hydrologie de surface. C'est l'objectif que se proposent d'atteindre le programme GCIP à l'échelle du bassin du Mississipi et le programme Gewex France au niveau du bassin rhodanien.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRÉ JC., GOUTORBE JP., PERRIER A., 1986. Hapex-Mobilhy : A hydrologic atmospheric experiment for the study of water budget and evaporation flux at the climatic scale. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 67, 138-144.
- BRAUD I., NOILHAN J., BESSEMOULIN P., MASCART P., HAVERKAMP R., VAUCLIN M., 1993. Bare ground surface heat and water exchanges under dry conditions : Observations and parameterization. *Bound. Layer Meteor.*, 66, 173-200.
- DEDIEU G., DESCHAMPS P. Y., KERR Y.H., 1987. Satellite estimation of solar irradiance at the surface of the earth and of surface albedo using a physical model applied to Meteosat data. *J. Climate Appl. Meteor.*, 26, 79-87.
- GELEYN JF., PREUSS H.J., 1983 : A new data set of satellite derived surface albedo values for operational use at ECMWF *Arch. Met. Geoph. Biocl. Ser A*, 32, 353-359.
- GERMAIN MJ., 1990. Validation d'une paramétrisation des échanges de surface sur différents types de végétation. Technical report, CNRM/EERM.
- GIORDANI H., 1991. Représentation des échanges de surface dans les modèles météorologiques. Technical report, CNRM, 31057, Toulouse, France. 72 p.
- GOUTORBE JP., LEBEL T., TINGA A., BESSEMOULIN P., BROUWER J., DOLMAN AJ., ENGMAN ET., GASH JHC., HOPFFNER M., KABAT P., KERR YH., MONTENY B., PRINCE S., SAID F., SELLERS P., WALLACE JS., 1994 : Hapex-Sahel : a large-scale study of land-atmosphere interactions in semi-arid tropics. *Ann. Geophysicae*, 12, 53-64.
- JACQUEMIN B., NOILHAN J., 1990. Sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the Hapex-Mobilhy data set. *Bound. Layer Meteor.*, 52, 93-134.

- MAHFOUF JF., 1990 : A numerical simulation of the surface moisture budget during Hapex-Mobilhy. *Bound. Layer Meteor.*, 53, 201-222.
- MAHFOUF JF., JACQUEMIN B., 1989 : A study of rainfall interception using a land surface parameterization for mesoscale meteorological models. *J. Appl. Meteor.*, 28, 1282-1302.
- MAHFOUF JF., NOILHAN J., 1991. Comparative study of various formulations of evaporation from bare soil using in-situ data. *J. Appl. Meteor.*, 30, (9), 1354-1365.
- MANZI A.O., 1993. Introduction d'un schéma des transferts sol-végétation-atmosphère dans un modèle de circulation générale et application à la déforestation amazonienne. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France. 229 p.
- NOILHAN J., LACARRÈRE P., 1995. GCM Gridscale evaporation from mesoscale modelling. *J. Climate.*, (accepted).
- NOILHAN J., MAHFOUF JF., MANZI A., PLANTON S., 1993. Validation of land-surface parameterizations. Developments and experiments at the French Weather Service. In *Validation of the models over Europe*, 125-158, Shinfield Park, Reading (UK). ECMWF.
- NOILHAN J., PLANTON S., 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536-549.
- SHUTTLEWORTH WJ., 1988. Evaporation from Amazonian rainforest. *Proc. Roy. Soc. London*, B233, 321-346.
- WEBB RS., ROSENZWEIG CE., LEVINE ER., 1991. A global data set of soil particle size properties. Technical Report 4286, Nasa, GISS, New-York. 34 p.
- WILSON MF., HENDERSON-SELLERS A., 1985. A global archive of land cover and soils data sets for use in General Circulation Climate Models. *J. Climatol.*, 5, 119-143.