

APPORT DES DONNÉES FORMOSAT2 À LA MODÉLISATION DU CONTENU EN EAU DU MANTEAU NEIGEUX DU HAUT ATLAS MAROCAIN

Abdelghani Boudhar¹, Lahoucine Hanich², Ahmed Marchane², Lionel Jarlan³, Abdelghani Chehbouni³

1 : Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques, B.P. 523, Béni-Mellal, Maroc.
ab.boudhar@usms.ma

2 : Laboratoire de Géoressources-Unité associée au CNRST (URAC42), Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques Guéliz, Université Cadi Ayyad, Maroc

3 : CESBIO (Université de Toulouse, CNRS, CNES, IRD), 18 Av. Edouard Belin BPI 280 Toulouse cedex 4, France

Résumé

Le présent travail a pour objectif d'améliorer notre connaissance du cycle de l'eau et en particulier de l'apport du manteau neigeux dans le bilan hydrologique au niveau du bassin versant montagneux du Rheraya au Sud de la ville de Marrakech. Vu la faiblesse du réseau de mesures hydrométéorologiques, nous nous sommes appuyés sur les données issues d'une série d'images FORMOSAT2 de haute résolution spatiale (8 mètres) et temporelle (4 jours). Les données de télédétection, si elles permettent d'obtenir avec une bonne précision la surface occupée par la neige, ne permettent pas seules d'estimer leur équivalent en eau alors que c'est cette quantité qui régit le bilan hydrologique.

La combinaison de ces données spatiales avec les mesures de terrain a permis la validation du modèle de fonte que nous avons calibré à l'échelle locale. Le modèle de fonte utilisé et de type degré jour a été initié à l'aide des données mesurées à une station située à 2600 mètres d'altitude. Les équivalents en eau (SWE) spatialisés sont ensuite validés de deux manières : 1) à l'aide des mesures au niveau d'une station à 3200 m et 2) avec les surfaces enneigées obtenues à partir des données FORMOSAT2. Les résultats obtenus indiquent que les images FORMOSAT2 permettent une meilleure estimation du couvert nival à l'échelle du bassin versant. Les simulations des SWE indiquent une grande cohérence avec les mesures et les surfaces de neige observées.

Mots clés : Modélisation de la neige, Fonte des neiges, FORMOSAT2, Haut-Atlas, Maroc.

Abstract

The present work aims to improve our understanding of the water cycle and especially the contribution of the snowpack in the water balance at a Rheraya catchment in the south of Marrakech city. Given the lack of the hydro-meteorological measurements, we used data from a series of FORMOSAT2 images characterised by a high spatial (8 meters) and temporal (4 days) resolution. If remote sensing data allow obtaining a good accuracy of the snow covered area calculation, they cannot only allow estimate water equivalent, whereas this is the amount which regulates water balance.

The combination of satellite data and in-situ measurements allowed validation of the snowmelt model that we calibrated at a local scale. The degree day snowmelt model used was initiated with the data measured over a station at an altitude of 2600 meters. The spatialised snow water equivalents (SWE) are then validated by two ways : 1) using measurements data at one station located at 3200 m and 2) with snowy surfaces obtained from FORMOSAT2 data. The results indicate that the FORMOSAT2 images give a better estimate of snow cover throughout the watershed. The SWE simulations indicate greater consistency with the in situ measures and observed snow cover area.

Keywords : Snow modelling, Snowmelt, FORMOSAT2, High Atlas, Morocco.

1. Introduction

Les montagnes sont les châteaux d'eau de notre planète : la moitié de l'humanité dépend de leur eau. Dans les zones arides, une part importante, qui peut atteindre 95%, de l'eau consommée provient des montagnes. C'est le cas de la chaîne du Haut Atlas au Maroc qui constitue la principale source d'eau pour les plaines arides avoisinantes telle que les plaines du Souss, du Haouz, du Tadla et du Dades. Les précipitations dans cette chaîne montagneuse tombent sous deux formes,

pluie et neige. L'apport des eaux de fonte des neiges aux débits des principaux oueds atlasique est d'environ 25% (Boudhar et al., 2009). Ce taux peut atteindre 50% au niveau des oueds de certains bassins tels que les bassins versants de Rheraya et d'Ourika.

L'objectif principal de cette étude est de prospecter l'importance des données FORMOSAT2 à l'amélioration de nos connaissances sur le manteau neigeux de la région d'étude. Il s'agit de coupler les données de la télédétection spatiale avec un modèle de fonte afin (1) de mieux

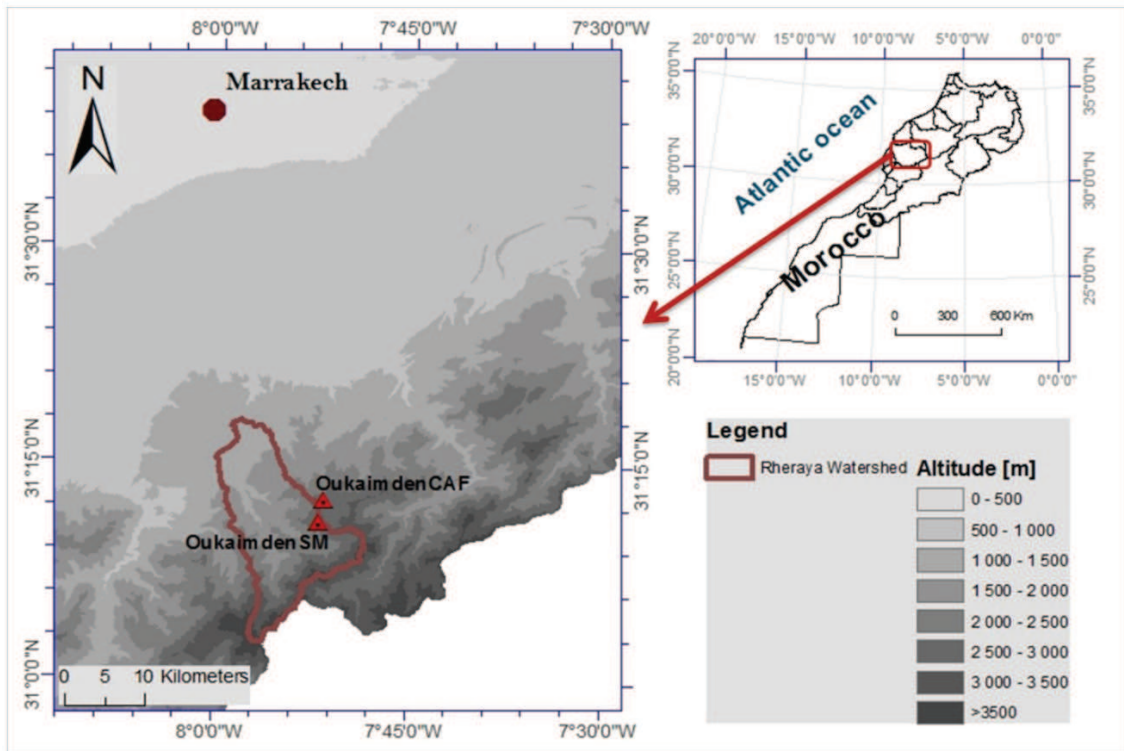


FIGURE 1 : Situation géographique du bassin versant de Rheraya.

comprendre les processus qui la régissent et (2) de caractériser le contenu en eau du couvert nival à l'échelle du bassin versant.

2. Zone d'étude et données utilisées

La zone sélectionnée pour cette étude est le bassin versant de Rheraya. Il se situe à 30 km au Sud de la ville de Marrakech (Figure 1). Il a une superficie de 225 km² et reste parmi les bassins les plus actifs hydrologiquement dans les versants Nord du Haut Atlas Marocain. Du point de vue topographique, la zone se caractérise par des hautes altitudes qui varient entre 1000m et 4167 m avec une altitude moyenne de 2100 mètres.

Dans cette étude, nous avons utilisé des données de températures et des précipitations journalières mesurées à la station du Club Alpin Français (CAF) à l'Oukaimeden située à 2600mètres d'altitude et des données de températures, précipitations et hauteurs de neige journalières collectées à la station automatique OukaimdenSM installée à l'Oukaimden dans le cadre du projet SudMed.

Une série de 19 images acquises sur le bassin versant de Rheraya à l'aide du capteur FORMOSAT2 ont été utilisées. Les dates d'acquisition de ces images sont étalées sur l'hiver de l'année 2009. Elles ont une haute résolution spatiale (8×8m), et une répétitivité temporelle de quatre jours. Le capteur FORMOSAT2 offre des images dans les quatre bandes : bleu, vert, rouge et proche infrarouge. Ces longueurs d'onde sont utilisables en cartographie du couvert nival.

3. Méthodologie

3.1. Cartographie des surfaces enneigées

Pour identifier les surfaces enneigées à partir des données FORMOSAT2 nous avons utilisé la méthode de classification supervisée. Cela est justifié d'une part par la discrimination aisée de la neige aux autres types de surfaces grâce à sa grande réflectance et d'autre part par la haute résolution des images FORMOSAT2. Vu l'importance des reliefs dans la zone étudiée, le problème que nous avons rencontré en utilisant une classification simple est que les cartes de neige obtenues sont erronées par l'effet de l'ombre. Pour résoudre ce problème, nous avons appliqué pour chaque image un masque des zones ombrées et sans ombre. Ces dernières ont été extraites à partir des cartes d'ombre calculées via le MNT et les angles zénithales pour chaque date FORMOSAT2. Ensuite, nous avons classé les pixels neige/non neige pour les zones avec ombre et les zones sans ombre. Cette séparation a permis une amélioration nette de la classification des surfaces de neige sous l'ombre.

3.2. Modélisation de l'accumulation et de la fonte des neiges

Pour estimer la quantité d'eau issue de la fonte des neiges, nous avons construit un modèle simple qui simule les hauteurs et les équivalents en eau du manteau neigeux au pas de temps journalier. Ce modèle est basé essentiellement sur les variations de la température de

l'air par la méthode des degrés-jour et l'apport de chaleur apporté par la pluie.

A partir des précipitations enregistrées (pluies et/ou neiges), Deux cas sont possibles selon la température de l'air.

Si la température de l'air est supérieure à 0°C :

La fonte "M" est calculée selon l'équation (1). S'il tombe une hauteur de pluie P sur la neige, une quantité d'eau de fonte égale à FP est produite par l'apport de chaleur par la pluie.

$$M = \begin{cases} FDF(T_a - T_0), & T_a > T_0 \\ 0, & T_a \leq T_0 \end{cases} \quad (1)$$

M est la quantité de l'eau libérée par le manteau neigeux (mm/unité temps) et englobe tout les processus d'ablation. T_a est la température moyenne de l'air au pas de temps choisi en °C. T_0 est la température de référence, fréquemment égale à 0°C. Le coefficient "FDF" est le facteur degré jour (mm/°C/jour). Dans la littérature ce facteur prend des valeurs variant de 2 à 8 mm/°C/jour dans un contexte sans forêt (Anderson, 1968).

$$FP = X \times P. \quad (2)$$

Avec :

- X un coefficient estimé à 0,3 selon (Makhlouf, 1994) ;
- P est la hauteur de pluie en mm.

La fonte totale sera donc la somme des deux types de fonte :

$$\Delta H_{\text{fonte}} = M + FP. \quad (3)$$

Si la température de l'air est inférieure à 0°C :

Et si les précipitations tombent sous forme neigeuse, la quantité tombée (ΔH_{prec}) s'additionne au manteau neigeux.

La hauteur du manteau neigeux à l'instant $t+1$ ($H(t+1)$) est reliée à la hauteur à l'instant (t) $H(t)$ par les variations des chutes de neige entre les deux pas de temps ΔH_{prec} et la quantité de la fonte ΔH_{fonte} calculée par l'équation 4.

$$H_{(t+1)} = H_{(t)} + \Delta H_{\text{prec}} - \Delta H_{\text{fonte}}. \quad (4)$$

Estimation du contenu en eau de la neige

Les équivalents en eau du manteau neigeux sont calculés comme le produit des hauteurs et des densités (Équation 5). Ces dernières sont simulées à l'aide du modèle empirique de Versegny (1991) (Équation 6). Ce modèle a été validé dans notre zone à l'aide des mesures de terrains en 2007/2008 (Boudhar, 2009).

$$SWE(mm) = \rho_s(kg/mm^3) \times Hauteur(m). \quad (5)$$

$$\rho_s(t + \Delta t) = (\rho_s(t) - \rho_{max}) \times \exp(\tau_f \Delta t / \tau) + \rho_{max} \quad (6)$$

Où ρ_s est la densité, ρ_{max} est la valeur asymptotique de la densité due au vieillissement, et τ/τ_f le temps caractéristique (0,24/4800 s⁻¹). La densité moyenne maximale utilisée par Versegny ne peut pas excéder ρ_{max} , elle est fixée originellement à 300 kg.m³. Cette densité est appropriée pour la plupart des types de terrain et de végétation.

3.3. Spatialisation de la fonte et simulation des surfaces enneigées

Le modèle détaillé ci-dessus au niveau local a été appliqué à l'échelle du bassin versant. Pour ce faire, les températures et les précipitations ont été spatialisées en utilisant un gradient altitudinale. A cette fin, nous avons utilisé un modèle numérique de terrain (MNT) de 90m de résolution. Tous les calculs menés dans cette étape ont été effectués sur des cartes de même résolution que le MNT. Les valeurs des gradients appliqués par 100mètres d'altitude sont de 0,03 mm et -0,56°C pour les précipitations et les températures respectivement (Boudhar et al., 2011). Les cartes obtenues à l'aide du modèle de fonte sont des équivalents en eau (SWE). Afin de pouvoir quantifier l'efficacité des modèles de fonte à l'échelle du bassin versant, deux types d'informations sont disponibles. Les mesures effectuées au niveau de la station nivale non utilisée au modèle et les cartes de surface de neige (SCA) obtenues à partir de la télédétection (carte FORMOSAT2). A cet effet, il faut transformer les cartes des équivalents en eau en cartes des surfaces de neige. Pour cela, les fractions des surfaces de neige (SCA) dans cette étude sont calculées, après la vérification d'autre formule, selon une approche asymptotique au SWE donnée par l'Équation 7 d'après Anderson (1976). SCA_{MAX} est la fraction maximale de SCA, fixée à 0,95.

$$SCA = SCA_{MAX} \times \tanh(100 \times SWE). \quad (7)$$

4. Résultats et discussion

Après la classification des pixels neige/non neige sous et sans ombre, nous avons calculé les surfaces enneigées au niveau du bassin versant de Rheraya. Les courbes de la figure 2 illustrent la variation des pourcentages des surfaces neigeuses ayant couvert les différentes tranches d'altitude du bassin en l'hiver 2009. On remarque que les chutes de neige les plus significatives tombent au niveau des altitudes supérieures à 1700 mètres. A partir de ces altitudes, les surfaces enneigées dépassent 70% de la surface totale de chaque tranche d'altitude. Parfois ces taux peuvent atteindre un seuil de 90%, c'est le cas des altitudes supérieurs à 2500 mètres le 03 février 2009. On note également un grand changement du couvert nival dans le temps et l'espace, exemple de l'intervalle du temps entre le 03 et le 26 février 2009 : les surfaces diminuent de 5 à 30% pour les altitudes supérieurs à 2500 mètres, tandis qu'elles s'annulent pour les altitudes moins de

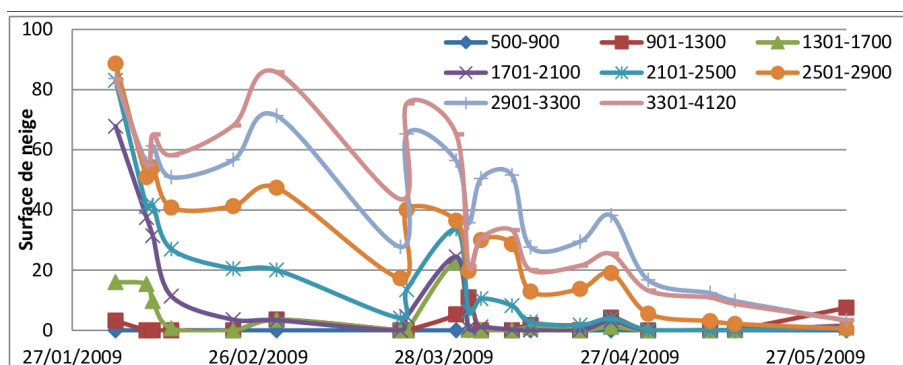


FIGURE 2 : Variation des pourcentages des surfaces enneigées en fonction des altitudes.

2500 mètres. Les caractéristiques citées ci-dessus marquent souvent les montagnes arides comme le Haut Atlas marocain.

Les surfaces issues des images FORMOSAT2 permettent aussi de détecter facilement les dates de chute des neiges. Ces dates sont marquées par des pics de surfaces enneigées. Pour vérifier cela, nous avons comparé les hauteurs de neige mesurées au niveau de la station d'oukaimdenSM, située à 3200 mètres d'altitude, avec les surfaces de neige issues des images FORMOSAT2 à l'altitude de la station de mesure (Figure 3). On note une bonne corrélation entre les pourcentages des surfaces enneigées et les hauteurs de neige mesurées sur le terrain. Cela affirme que les surfaces enneigées peuvent être utilisées pour estimer les équivalents en eau de la neige à l'échelle du bassin versant. C'est l'étape que l'on va aborder ci-dessous.

Les simulations de l'équivalent en eau (SWE) à l'échelle local en utilisant un simple modèle degré jour dans la zone ont été validées dans des études antérieures (Boudhar, 2009). Lors de ces études, les données d'entrées et celles de vérification sont issues de la même station de mesure. Dans le but de valider le modèle à l'échelle spatiale, on a fait appel aux données enregistrées au niveau d'une deuxième station. C'est la station du CAF (Club Alpin Français), située à 2600 mètres d'altitude. Les précipitations (neige et pluie) mesurées dans cette station sont utilisées comme point de référence pour simuler les SWE à l'échelle du bassin versant. Deux types de vérification des résultats des SWE calculés sont effectués. La première vérification concerne la comparaison entre les SWE observés et simulés au niveau de la station OukaimdenSM (3200 mètres d'altitude) (voir Figure 4). A partir de cette figure, on note que les SWE mesurés et observés sont plus proches et très homogènes et que le modèle reproduit bien les SWE à l'échelle spatiale.

La seconde manière de vérification est l'utilisation des surfaces enneigées obtenues à partir des images FORMOSAT2. Ces dernières ont été confrontées avec les surfaces simulées en utilisant les SWE calculés

comme montré dans la partie méthodologie. Sur la figure 5, les deux surfaces enneigées mesurées et observées sont illustrées. Les simulations sont bien ajustées avec les observations et montrent un résultat très acceptable avec une corrélation de 0,5 et une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 12%. Ces résultats affirment que le modèle spatialisé peut être utilisé à l'échelle du bassin dans un modèle hydrologique pour simuler les débits à l'exutoire.

5. Conclusion

Lors de cette étude, nous avons utilisé les données issues du capteur FORMOSAT2 en combinaison avec les données de terrain relatives au climat et manteau neigeux. Les résultats obtenus montrent qu'avec la méthode de classification supervisée on aura une bonne estimation des surfaces enneigées sous et sans ombre. Ces surfaces issues des données spatiales ont été validées avec des mesures de terrain. Elles permettent l'identification des dates de chutes des neiges. A cet effet, les cartes de neige obtenues peuvent combler l'absence des mesures de terrain dans les hautes altitudes. Ces chroniques des neiges spatialisées nous ont permis aussi de calibrer et valiser le modèle de fonte à l'échelle du bassin versant. Pour cela, et en plus des mesures de terrain, on conclut que les produits neige FORMOSAT2 peuvent constituer une référence pour spatialiser le contenu en eau. De ce fait, elles permettent une amélioration de l'estimation de l'apport des eaux de la fonte des neiges aux débits.

Références

- Anderson, E.A., 1968. Development and testing of snow pack energy equations. *Water Resources Research* 4(1) : 19-37.
- Anderson, E.A., 1976. A point energy and mass balance model of a snow cover. Silver Spring, MD US. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Technical Report NWS 19.
- Boudhar, A., Hanich, L., Boulet, G., Duchemin, B. and

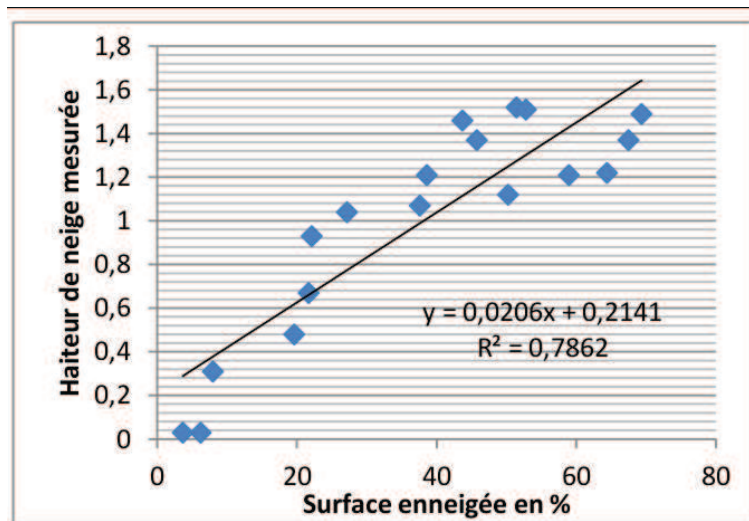


FIGURE 3 : Corrélation entre les surfaces enneigées obtenues à l'aide du capteur FORMOSAT2 et les hauteurs de neige mesurées au niveau de la station nival d'OukaimdenSM à 3200 m.

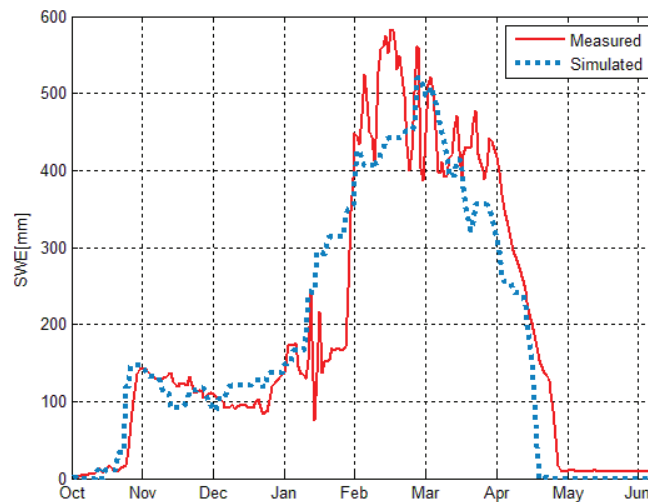


FIGURE 4 : Contenu en eau (SWE) du manteau neigeux simulé et observé au niveau de la station d'Oukaimden.

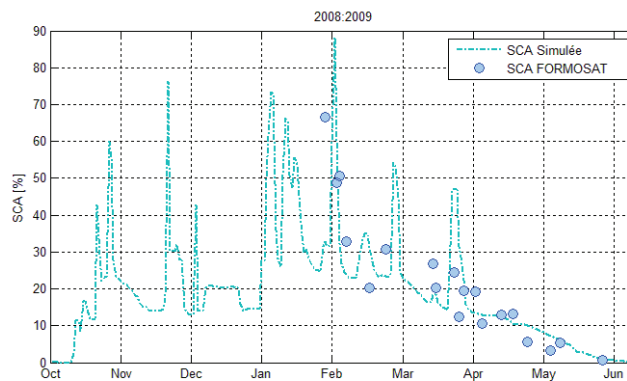


FIGURE 5 : Variation des surfaces de neige (SCA) observées par FORMOSAT et calculées.

Chehbouni, A. 2009. Evaluation of the Snowmelt Runoff Model in the Moroccan High Atlas Mountains using two snow-cover estimates, *Hydrological Sciences Journal* 54(6).

Boudhar A., 2009. Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des Oueds du Haut Atlas de Marrakech, PhD thesis, Cadi Ayyad University, Morocco.

Boudhar, A., Duchemin, B., Hanich, L., Boulet G. and Chehbouni, A., 2011. Spatial distribution of air temper-

ature in mountainous area using satellite thermal Infra Red data. *Comptes rendus Géoscience* 343 (2011) :32-42.

Makhlouf Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et Essai d'estimation de ses paramètres. PhD thesis, Université Paris XI Orsay, Cemagref, Grenoble, France 426 pages.

Verseghy, D.L., 1991. Class - a Canadian land surface scheme for GCMS. Part I : Soil model. *International Journal of Climatology* 11 :111-133.