HAL
open science

Interactions entre le sol, la biosphère, et l'atmosphère : végétation interactive et analyse de l'eau du sol

Jean-Christophe Calvet

To cite this version:

Jean-Christophe Calvet. Interactions entre le sol, la biosphère, et l'atmosphère : végétation interactive et analyse de l'eau du sol. Sciences de l'environnement. Université Toulouse III-Paul-Sabatier, 2002. tel-03358815

HAL Id: tel-03358815

https://meteofrance.hal.science/tel-03358815v1

Submitted on 1 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE DE RECHERCHE

Présenté par

Jean-Christophe Calvet

Ingénieur de la Météorologie

Météo-France, CNRM/GAME, URA CNRS 1357

Pour obtenir le diplôme
d'**Habilitation à Diriger des Recherches**

de l'**Université Paul Sabatier, Toulouse**

Spécialité : Physique de l'atmosphère

INTERACTIONS ENTRE LE SOL, LA BIOSPHERE, ET L'ATMOSPHERE : VEGETATION INTERACTIVE ET ANALYSE DE L'EAU DU SOL

Présenté le 5 avril 2002 devant le jury composé de :

M. Serge CHAUZY, Professeur de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, Président
Mme. Isabelle BRAUD, LTHE, Grenoble, Rapporteur
M. Bernard SEGUIN, INRA, Avignon, Rapporteur
M. Yves BRUNET, INRA, Bordeaux, Rapporteur
M. Jean-François SOUSSANA, INRA, Clermont-Ferrand, Examinateur
M. Philippe WALDTEUFEL, Laboratoire d'Aéronomie, Verrières-le-Buisson, Examinateur
M. Joël NOILHAN, Météo-France/CNRM, Toulouse, Directeur de Recherche

Curriculum Vitae

Jean-Christophe Calvet (né le 5/2/1966) :
Ingénieur diplômé de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon (1989),
et de l'Ecole Nationale de la Météorologie (1990).

Parcours professionnel :

- Stage IM de l'ENM et de DEA de l'UPS à l'INRA d'Avignon sous la responsabilité de J.-P. Lagouarde : « Adaptation d'un modèle agrométéorologique au cas des couverts hétérogènes », en 1990.
- Mis à disposition du Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection spatiale, Toulouse, de septembre 1990 à mars 1991 : travaux menés avec J.-P. Wigneron et Y. Kerr au LERTS pour la modélisation de l'émission micro-ondes de la végétation et l'analyse des données du satellite SMMR sur la forêt amazonienne.
- Service National de la Coopération à l'Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brésil, d'avril 1991 à juillet 1992 : Finalisation des travaux menés au LERTS complétés par deux autres études concernant la cartographie du rayonnement net en Amazonie à partir des données du satellite GOES, et la modélisation des échanges entre la forêt amazonienne et l'atmosphère à l'aide d'un modèle lagrangien. Participation à la campagne de mesure ABRACOS à Manaus (Brésil).
- Formation complémentaire par la recherche au CNRM/GMME : Participation à HAPEX-Sahel en 1992. Participation à la campagne de terrain menée à l'INRA d'Avignon en 1993 (J.-P. Wigneron, A. Chanzy) avec le radiomètre micro-ondes PORTOS et analyse des hautes fréquences de cet instruments. Analyse des données PORTOS aéroporté durant HAPEX-Sahel et de données SSM/I sur l'Espagne.
- Doctorat de l'Université Paul Sabatier obtenu en 1996 : Radiométrie micro-ondes et estimation des bilans hydrique et énergétique des surfaces continentales.
- Depuis 1994, chercheur dans l'équipe MC2 (dirigée par J. Noilhan) du Groupe de Météorologie à Moyenne Echelle du CNRM dans le domaine de la modélisation des échanges sol-plante-atmosphère et de l'utilisation de la télédétection des surfaces continentales pour la météorologie et l'hydrologie. Participation à la campagne de mesure RBLE-3 en 1994 au Rondônia (Brésil), et travail de

cartographie et de modélisation de surface et de couche limite dans cette zone, dans le cadre du projet européen LBA-CABARE (Kabat et al. 1997). Participation au suivi et à l'analyse du projet MUREX. Développement de la version A-gs du modèle ISBA. Participation au projet de satellite SMOS (coordination du sous-groupe climatologie et météorologie sur les continents).

- Plus de 30 publications dans des revues à comité de lecture (dont plus de 20 en premier ou second auteur).
- Prix Norbert-Gerbier-MUMM 2000 décerné par l'OMM pour l'article "An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites", paru dans Agricultural and Forest Meteorology en 1998.
- Représentant de Météo-France au Comité scientifique du Programme National de Télédétection Spatiale en 2000 et 2001.
- Travaux les plus récents portant sur la végétation interactive et l'analyse du contenu en eau des sols.

1. Introduction

La modélisation des processus de surface a pour but de simuler les flux à l'interface sol-végétation-atmosphère des modèles atmosphériques (prévision du temps, études climatiques) et des modèles hydrologiques (évaluation des ressources en eau du sol et du débit des rivières). Le modèle de transfert entre le sol, la végétation, et l'atmosphère (TSVA) utilisé à Météo-France est le schéma d'« interactions entre le sol, la biosphère et l'atmosphère » (ISBA) développé par Noilhan et Planton (1989). La plupart des modèles TSVA utilisent le *forçage atmosphérique* fourni par des mesures ou des simulations de modèle atmosphérique, pour simuler l'évapotranspiration, le flux de chaleur sensible, de chaleur dans le sol, de quantité de mouvement, la température de surface, le rayonnement solaire réfléchi, et l'évolution de différents stocks d'eau dans le sol. Le forçage atmosphérique est constitué de séries temporelles de vitesse du vent, de hauteur des précipitations liquides et solides, de température et d'humidité spécifique de l'air, de pression de surface, et de rayonnement solaire et infra-rouge incidents. L'adaptation d'un TSVA à un site donné nécessite la connaissance d'un certain nombre de *paramètres* décrivant les caractéristiques du sol (par exemple sa profondeur utile pour l'évapotranspiration, sa teneur en sables et en argiles) et de la végétation (rugosité, indice foliaire, paramètres de la conductance stomatique, albédo). Développés par des météorologistes, les modèles TSVA traitent de manière simplifiée les processus biologiques. Par contre, l'évolution temporelle de l'ensemble des processus physiques est traitée de manière fine (avec un pas de temps de 5 minutes par exemple), de manière à résoudre de manière correcte les variations rapides du bilan d'énergie de surface et le cycle diurne. Les modèles biologiques (comme les modèles de culture utilisés en agronomie ou les modèles écophysiologiques) traitent de manière plus détaillée les aspects biologiques (production de biomasse, de fruits, etc.) mais avec un pas de temps plus long, au mieux journalier. La tendance actuelle est à une certaine convergence des deux approches : les météorologistes, à cause de l'augmentation de résolution spatiale des modèles atmosphériques (une résolution de 2-3 km est attendue dans les 10 ans à venir pour les simulations opérationnelles de prévision du temps à court terme), mais aussi dans le but d'affiner la réponse de la végétation dans les études d'impact climatiques, doivent désormais représenter plus finement les processus biologiques.

Les différents modèles TSVA actuellement utilisés en météorologie opérationnelle ont sensiblement le même niveau de complexité : la végétation est représentée par une seule couche (concept « big leaf »), le sol est soit multicouches (comme par exemple dans le modèle du CEPMMT, Viterbo et Beljaars 1995) soit bi-couches avec un terme de rappel entre couche superficielle et couche profonde (méthode « force-restore » utilisée dans ISBA, Deardorff 1978). La difficulté que l'on rencontre actuellement dans l'utilisation des modèles TSVA en météorologie est l'initialisation des variables du système à variation lente, c'est à dire essentiellement le contenu en eau des sols et l'indice foliaire. Le contenu en eau du sol peut dans certaines conditions être

estimé indirectement (Mahfouf 1991) en minimisant l'erreur de prévision des variables atmosphériques mesurées par le réseau météorologique synoptique (température et humidité de l'air), c'est d'ailleurs cette méthode qui est employée dans le modèle opérationnel français (Giard et Bazille 2000). Cependant, les variables atmosphériques considérées ne contiennent pas toujours l'information permettant de corriger les conditions de surface, ce qui rend très délicat l'emploi de cette méthode.

Les simulations climatiques enfin, nécessitent l'emploi de modèles décrivant l'interaction entre le climat et la végétation. Par exemple, une simulation climatique doit en toute rigueur prendre en compte l'effet de l'augmentation de la concentration en CO_2 de l'air sur la conductance du couvert à la vapeur d'eau, qui dépend à la fois de l'ouverture stomatique et de la production de biomasse foliaire. Une manière de résoudre le problème est d'itérer les simulations climatiques avec celles d'un modèle indépendant de fonctionnement de la végétation. Cela a été réalisé à l'échelle globale par un certain nombre d'auteurs (par exemple Douville et al. 2000). Cependant, l'objectif à atteindre est de simuler une véritable *végétation interactive* en intégrant les mécanismes de réponse au climat (photosynthèse, croissance foliaire, et dilution de l'azote) dans les modèles TSVA.

Fig. 1. Composition et objectifs de l'équipe MC2, du Groupe de Météorologie de Moyenne Echelle du CNRM. Six grands thèmes en lien avec l'hydrométéorologie sont abordés. L'articulation entre les thèmes est réalisée au travers du modèle de surface ISBA, qui est un outil commun à chacun d'entre eux. Le travail présenté dans ce mémoire concerne les thèmes « Végétation interactive » et « Radiométrie et Eau du Sol ».

L'objectif de ce texte est de présenter une synthèse de ma contribution aux travaux entrepris pour répondre à ces questions. Le chapitre 2 présente une application du modèle ISBA dans une étude sur les effets micro-climatiques de la déforestation en Amazonie, qui montre l'importance de l'initialisation des variables « lentes » du système sol-plante que sont la réserve en eau du sol et l'indice foliaire du couvert végétal. Les variations saisonnière et interannuelle de ces variables sont analysées grâce à l'expérience MUREX (Monitoring the Usable soil Reservoir EXperimentally) présentée dans le chapitre 3.

Enfin, les chapitre 4 et 5 décrivent deux développements en grande partie issus de l'analyse des données de MUREX :

- L'assimilation de données de télédétection pour initialiser la réserve en eau du sol (projet de mission spatiale SMOS).
- Une nouvelle version d'ISBA (ISBA-A-gs), qui permet de décrire la végétation de manière plus interactive avec l'atmosphère, grâce à la simulation des flux de CO_2, de l'indice foliaire, et des différents types de réponse au stress hydrique et au changement climatique.

La nature des études présentées ici et l'articulation entre ces différents travaux sont le résultat d'un contexte scientifique national et international :

- Tout d'abord, mon propre cheminement scientifique m'a amené à travailler à la fois sur la modélisation TSVA (dès mon stage de DEA réalisé à l'INRA d'Avignon avec J.-P. Lagouarde) et sur la radiométrie micro-ondes (sujet de ma thèse de doctorat).
- A l'échelle du CNRM, mes travaux s'inscrivent dans le cadre de l'équipe MC2, dirigée par Joël Noilhan. Cette équipe a pour objectif de faire avancer la modélisation des processus de surface (sol, végétation et atmosphère) pour une application opérationnelle en prévision du temps et en hydrologie. La Fig. 1 montre que 6 grands thèmes de recherche sont abordés dans cette équipe. Ces thèmes interagissent entre eux par l'intermédiaire de l'utilisation d'un outil commum : le modèle ISBA. L'aspect « végétation intéractive » par exemple, introduit dans ISBA, interagit avec l'hydrologie car la simulation interactive de l'indice foliaire permet de rendre compte de variations interannuelles de cette variable, et ainsi d'améliorer la simulation du débit des rivières dans le modèle couplé ISBA-MODCOU (Voirin et al. 2001). Les travaux menés à MC2, enfin, sont lié aux travaux menés dans d'autres équipes du CNRM. Par exemple, la végétation interactive est un thème intéressant pour la modélisation du climat (équipe UDC) ; l'assimilation de données de réflectances dans le visible et le proche infra-rouge dans un modèle comme ISBA-A-gs est liée aux activités de l'équipe MATIS ; les travaux réalisés dans l'équipe UDC sur la simulation globale de l'eau du sol, ainsi que la base de données physiographique globale ECOCLIMAP élaborée par les équipes MATIS et MC2 (Masson et al. 2002) ont été utilisés pour réaliser les études de faisabilité de SMOS (Kerr et al. 1998) ; l'assimilation de

données radiométriques en bande L a un intérêt opérationel et concerne le groupe GMAP ; d'une manière générale, les développements effectués sur le modèle ISBA, sont susceptibles d'avoir un impact sur l'évolution du projet AROME de mise en place d'une système de prévision opérationnel à échelle fine.

- Au niveau national, de nombreuses et étroites collaborations se sont mises en place, autour des projets SMOS et ISBA-A-gs. Le modèle ISBA-A-gs a été développé en concertation avec l'INRA (Avignon, Bordeaux, Clermont-Ferrand, Nancy) et est à ce titre le résultat d'un travail collectif inter-organismes. Le projet SMOS, enfin, regroupe une large communauté scientifique en France, allant des hydrologues aux océanographes. Pour le volet « eau du sol », on peut citer, outre le CNRM : le CESBIO, l'INRA, l'IPSL, le LTHE, l'ONERA. Je crois pouvoir dire que les travaux présentés ici sur la possibilité d'estimer le contenu en eau dans la zone racinaire du sol à partir de séries temporelles du contenu en eau de la couche superficielle du sol, à partir des données de l'expérience MUREX, ont joué un rôle dans le succès de ce projet. Le fait qu'un utilisateur potentiel de ces données comme Météo-France participe à la définition du projet a également été déterminant.
- Au niveau international, ces travaux, bien que réalisés avec relativement peu de moyens, ont été rapidement reconnus. Le modèle ISBA-A-gs n'a pas été le premier modèle TSVA à inclure un module de photosynthèse dans le calcul de la conductance stomatique : il a été publié en 1998 (Calvet et al. 1998), 3 ans après le modèle du UK Met-Office (Friends et Cox 1995), et 2 ans après SIB2 (Sellers et al. 1996). Son originalité réside dans le soin qui a été apporté à sa validation, et à la paramétrisation des processus de réponse au stress hydrique, qui sont mal connus et assez mal représentés dans les modèles TSVA. Son développement s'est inscrit dans un mouvement international vers davantage d'interdisciplinarité dans la modélisation des processus du surface : météorologistes, hydrologues et écophysiologistes sont désormais appelés à travailler avec des outils similaires. Le prix NORBERT-GERBIER-MUMM 2000 décerné par l'OMM à ce travail en témoigne. Le développement de ce type de modèles a accompagné la réalisation de grands programmes internationaux de mesure des flux net de CO_2 sur le long terme et sur de nombreux sites : EUROFLUX en Europe (Tenhunena et al. 1998) et AMERIFLUX aux USA, suivis par ASIAFLUX et OZFLUX. Alors que le projet ISBA-A-gs a été développé au travers de collaborations essentiellement françaises, le projet SMOS a pour caractéristique de faire intervenir une large communauté internationale, essentiellement européenne grâce à l'action de l'ESA, mais en lien étroit avec nos collègues américains (T. Jackson et T. Schmugge de l'USDA, etc.). Les 2 projets ISBA-A-gs et SMOS s'inscrivent dans les thèmes abordés par le programme international GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment) visant à observer et modéliser les cycles hydrologique et énergétique dans l'atmosphère et à l'interface avec les surfaces continentales et océaniques.

2. Interactions entre le sol, la biosphère et l'atmosphère : exemple du Rondônia (Brésil)

La déforestation de l'Amazonie représente un exemple particulièrement frappant de l'interaction entre le système sol-plante et l'atmosphère pour plusieurs raisons :

- La déforestation pratiquée au Brésil des années 70 à nos jours a provoqué dans certaines régions de l'Amazonie, une modification rapide du paysage, par la transformation d'immenses zones de forêt primaire en prairies pâturées. Au Rondônia (Fig. 2), la déforestation a souvent suivi un tracé géométrique en bandes de 2 km de largeur environ.
- Depuis le début des années 80, une série d'expériences micrométéorologiques a permis de quantifier les caractéristiques écophysiologiques et hydrométéorologiques de certains sites de l'Amazonie ayant ou non subit la déforestation.
- La déforestation, c'est à dire le remplacement d'un couvert forestier par un couvert herbacé bas, a des conséquences spectaculaires et directement mesurables sur le climat local (réchauffement et assèchement de l'air dans la couche limite atmosphérique).

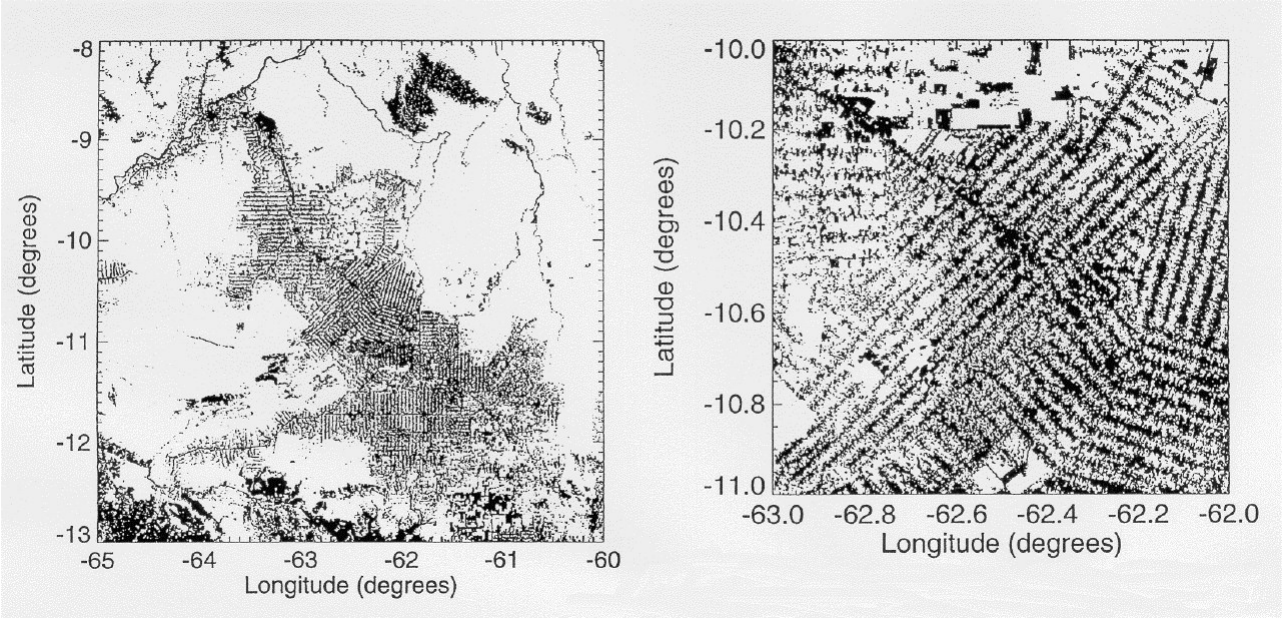

Fig. 2. Classification en forêt/non-forêt avec une résolution de 120 m réalisée à partir d'images Landsat-TM de 1994 pour le domaine 8°-13°S, 65°-60°O, comprenant le Rondônia (à gauche). Les zones sombres correspondent aux pâturages, savanes naturelles, étangs, rivières et lacs. Les zones claires représentent la forêt. Un zoom (à droite) présente la région de Ji-Paraná, particulièrement représentative de la déforestation en peigne (tiré de Calvet et al. 1997).

2.1. Données de terrain

Parmi les expériences qui ont permis de caractériser in situ l'environnement des paysages amazoniens, le programme anglo-brésilien ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observational Study) décrit dans Gash et al. (1996) est sans doute celui qui a donné accès au plus grand nombre de paramètres (climat local, flux d'eau, de chaleur, de CO_2, caractéristiques des sols et de la végétation), sur le plus grand nombre de sites (3 sites de forêt, 3 sites de pâturages, un site de savane).

Dans le cadre d'ABRACOS, un certain nombre de campagnes de mesure concernant la météorologie de méso-échelle ont permis de caractériser la couche limite atmosphérique et la troposphère à l'aide de radiosondages. En particulier, l'expérience RBLE-3 (Rondônia Boundary Layer Experiment ; Fisch 1995), a laquelle j'ai participé, a fourni les radiosondages nécessaires à l'initialisation et la validation de modèle atmosphériques sur deux sites du Rondônia, durant la saison sèche de 1994. Les deux sites ABRACOS du Rondônia sont la réserve naturelle de la forêt de Jaru (« JRF », 61°50'O, 10°01'S) et la ferme Nossa Senhora (« NSP », 62°22'O,10°45'S), située près de Ji-Paraná (Fig. 2).

2.2. Réglage du modèle ISBA

Le modèle ISBA a été confronté aux données ABRACOS par Delire et al. (1997). Une première étape de ce travail est l'adaptation des coefficients de transfert hydriques et thermiques dans le sol au cas des sols tropicaux. Les données récoltées dans le cadre d'ABRACOS concernant le sol ont montré en effet que l'action de la texture sur les propriétés hydriques du sol est en contradiction avec le paramétrage utilisé dans ISBA, fondé sur la classification des sols de l'USDA et les fonctions de pédotransfert de Clapp et Hornberger (1978). En particulier, les sols tropicaux très argileux (proportion d'argiles supérieure à 50 %) présentent des valeurs plus grandes de la conductivité hydraulique à saturation, alors que le comportement inverse est observé pour les sols non-tropicaux. Ce comportement paradoxal serait dû à la présence de macro pores associés à l'activité biologique intense de ces sols : termites, fourmis, et vers de terre accroissent la porosité. De nouvelles relations de pédotransfert adaptées aux sols tropicaux, ont donc été introduites dans ISBA.

Le réglage d'ISBA a été réalisé par Christine Delire sur les deux sites du Rondônia (forêt et prairie) pour une période d'environ deux ans (1992 et 1993). Les résultats sont rassemblés dans le Tableau 1. La différence entre les deux types de couvert réside essentiellement dans les paramètres décrivant les propriétés du couvert végétal :

- Les mesures de flux montrent que la forêt JRF ne présente pas de signe de stress hydrique, ce qui conduit à prescrire une profondeur du sol contributive à l'évapotranspiration de 8 m, contrairement à 2 m pour NSP. L'amenuisement de l'épaisseur de la couche de sol active du point de vue de l'hydrologie de surface est l'une des conséquences majeures de la déforestation.

- Un autre effet important sur la transpiration du couvert est la réduction de l'indice foliaire (« Leaf Area Index », ou *LAI*) durant la saison sèche : 1,5 à NSP au lieu de 4,6 à JRF. Ceci a pour conséquence de réduire fortement la conductance du couvert à la vapeur d'eau sur les zones de pâturages.

Tableau 1

Paramètres estimés pour le modèle ISBA par Delire et al. (1997) pour les deux sites du Rondônia du programme ABRACOS, le 18 août 1994 : forêt amazonienne primaire (« Jaru Reserve Forest », JRF) et pâturage sur zone défrichée (« Nossa Senhora Pasture », NSP).

Paramètres	Définition	JRF	NSP	Unité
du sol :				
d_2	Profondeur de sol explorée par les racines	8	2	m
CLAY	Teneur moyenne du sol en argiles	24	30	%
SAND	Teneur moyenne du sol en sables	63	60	%
w_{wilt}	Contenu en eau du sol au point de flétrissement	0,16	0,18	m^3m^{-3}
w_{fc}	Contenu en eau du sol à la capacité au champ	0,28	0,30	m^3m^{-3}
w_{sat}	Contenu en eau du sol à saturation	0,39	0,40	m^3m^{-3}
de la végétation :				
LAI	Indice foliaire	4,6	1,5	m^2m^{-2}
Veg	Taux de couverture de la végétation	99	85	%
A	Albédo	0,14	0,20	-
ε_s	Emissivité	0,95	0,95	-
C_v	Coefficient thermique	$1,2\ 10^{-5}$	$5,0\ 10^{-3}$	$K\ m^2\ J^{-1}$
r_{smin}	Résistance stomatique minimale	175	132	$s\ m^{-1}$
γ	Sensibilité stomatique à l'humidité de l'air	0,04	0	$kg\ kg^{-1}$
R_{GL}	Rayonnement solaire limite	30	100	$W\ m^{-2}$
z_0	Rugosité mécanique	2,6	0,06	m
z_0/z_{0h}	Rapport des rugosités mécanique et thermique	10	10	$m\ m^{-1}$

2.3. Utilisation de Méso-NH pour quantifier l'effet local de la déforestation sur l'atmosphère

L'analyse des radiosondages de l'expérience RBLE-3 a été réalisée à l'aide de plusieurs modèles atmosphériques (Fisch 1995, Dolman et al. 1999). L'étude que j'ai menée à Météo-France a consisté à réaliser des simulations unidimensionnelles représentatives des sites JRF et NSP pour le 18 août 1994. Pour le site JRF, bien représentatif d'une zone de forêt préservée, les paramètres du Tableau 1 ont été employés tels quels. Pour le site NSP en revanche, les règles d'agrégation des paramètres d'ISBA proposées par Noilhan et Lacarrère (1995) ont été appliquées avec un taux de déforestation de 60 %, déterminé sur une zone de 10 km × 10 km autour de NSP, à partir de la carte présentée dans la Fig. 2. Les principaux résultats de cette étude, décrits par Dolman et al. (1999) sont les suivants :

- Les simulations 1-D de Méso-NH montrent un très bon accord avec les observations des flux de surface et de hauteur de couche limite atmosphérique (« HCL » d'environ 1000 m au maximum) sur le site de forêt.
- Les simulations agrégées ne peuvent être validées que par l'intermédiaire de la HCL sur le site partiellement déboisé car on ne dispose pas de mesures de flux spatialisées, et il y a un désaccord frappant entre les simulations et les observations : le modèle prévoit une HCL maximale de 1600 m alors que les radiosondages donnent une valeur atteignant 2200 m.

Une explication du désaccord entre simulations et observations est que l'hypothèse que les 40 % de forêt de la zone partiellement déboisée peuvent être décrits avec les paramètres et les conditions initiales de la forêt naturelle JRF (notamment de stock d'eau dans le sol) est probablement erronée. D'autres explications ont été avancées, comme l'effet de circulations atmosphériques liées à la structure particulière de la déforestation en peigne du Rondônia, mais les essais de modélisation 3D réalisés par diverses équipes dans le cadre de LBA n'ont pas permis de confirmer cette hypothèse. Le Tableau 2 montre que l'écart observé de HCL entre les deux sites JRF et NSP (de l'ordre de 1000 m) est assez bien décrit par le modèle 1D si l'on prescrit 100 % de prairie, ce qui correspond à une déforestation totale. L'étude de sensibilité du Tableau 2 montre également que le stress hydrique, représenté par la proportion de la réserve en eau utilisable par la plante (θ_2) est le facteur prépondérant de la réponse de l'atmosphère aux conditions de surface.

L'étude que j'ai réalisée avec ISBA et Méso-NH montre que, selon toute vraisemblance, les bandes de forêt résiduelles ne se comportent pas comme la forêt naturelle. Cela peut être expliqué par plusieurs facteurs qui ont été identifiés dans des études récentes :

- La réduction de l'indice foliaire et de l'épaisseur de sol explorée par les racines dans les zones pâturées, par rapport à la forêt, a pour conséquence une réduction de la transpiration foliaire qui se traduit par une modification du climat local. Le réchauffement et l'assèchement de l'air consécutif à la déforestation conduit à l'augmentation de la demande évaporatoire, qui peut affecter les forêts résiduelles en épuisant plus rapidement la réserve en eau du sol.
- La déforestation en bandes de 2 km pratiquée au Rondônia (Fig. 2) renforce les effets de bord, qui sont particulièrement sensibles sur une distance de 300 m (Laurance et al. 2000).
- Les effets de bords accroissent la sensibilité à la sécheresse, mais également, à cause d'une turbulence accrue, le déracinement des arbres les plus grands, et une plus grande vulnérabilité aux parasites (les plantes épiphytes notamment).

- Progressivement, l'effet de bord se propage dans les forêts résiduelles et augmente la mortalité des arbres les plus grands (Gascon et al. 2000), ce qui provoque le remplacement du couvert primaire par une forêt plus « jeune », composée d'espèces pionnières. Il est probable que cette modification de la nature du couvert forestier a des conséquences négatives sur son aptitude à exploiter la réserve en eau du sol, ce qui accroît encore la modification du microclimat.

Tableau 2

Effet simulé d'une déforestation totale avec Méso-NH 1-D et ISBA pour le Rondônia, le 18 août 1994. Les paramètres employés pour la forêt amazonienne primaire sont remplacés par ceux des pâturages, soit simultanément soit individuellement, et l'effet sur cinq variables atmosphériques est indiqué : la hauteur de la couche limite (*HCL*), l'humidité spécifique de l'air (q_a), les flux de chaleur sensible (*H*) et latente (*LE*), et la température de surface (T_s).

Paramètres modifiés	*HCL* à 1600 h locale (m)	q_a à 350 m, 1600 h locale (g kg^{-1})	*H* à 1200 h locale (W m^{-2})	*LE* à 1200 h locale (W m^{-2})	T_s à 1200 h locale (°C)
Tous :	+1015	-3,1	+90,9	-36,8	+8,5
θ_2 *initial*	+980	-3,8	+128,6	-185,1	+3,2
LAI	+840	-3,3	+98,8	-149,5	+2,6
C_v	+700	-1,8	+39,7	+78,4	+1,9
R_{GL}	+280	-1,1	+22,8	-37,0	+0,7
γ	-210	+1,3	-21,9	+43,8	-0,6
r_{smin}	-140	+0,9	-18	+30,7	-0,6
A_{vis}	-35	+0,1	-5,3	-9,0	-0,2
A_{nir}	-35	+0,1	-6,1	-10,5	-0,2
z_{0h}	+35	-0,2	-1,7	-8,9	+2,2
z_0	0	0	-2,9	-10,1	+0,9

2.4. Conclusion

L'exemple du Rondônia montre que le modèle ISBA (qui peut être associé à des simulations de couche limite réalisées par Méso-NH) est un outil robuste d'analyse de l'interaction entre les paysages et le climat local. Il apparaît que l'indice foliaire et la proportion de la réserve en eau du sol disponible pour le couvert végétal ont une influence déterminante sur les flux de surface et la météorologie de la couche limite atmosphérique.

Ces variables ont une dynamique saisonnière et interannuelle qui peut être très marquée dans le cas de nombreux types de climats et de couverts végétaux. Seules des expériences de terrain menées sur plusieurs années permettent donc d'analyser et de valider la représentation des phénomènes par les modèles TSVA.

3. L'expérience MUREX

La campagne de mesures MUREX (Monitoring the Usable soil Reservoir Experimentally) a débuté en 1994, à la suite d'une série d'expériences internationales visant à étudier les échanges entre les surfaces continentales et l'atmosphère à méso-échelle (HAPEX-MOBILHY, FIFE, EFEDA, HAPEX-Sahel, etc.). Ce programme a été initié et mis en oeuvre par Joël Noilhan et Pierre Bessemoulin. L'équipe 4M du CNRM a pris en charge l'aspect logistique, en collaboration avec le CESBIO et le LTHE. Ma contribution aux mesures elles-mêmes a consisté à mettre en place au CNRM un protocole de mesure pour l'estimation de l'indice foliaire et du contenu en eau du sol superficiel, avec Nour-Ed-Dine Fritz. J'ai également contribué à la construction d'un forçage atmosphérique continu avec Geneviève Jaubert, et à l'analyse du bilan hydrique de la parcelle. Enfin, j'ai dirigé l'exercice d'intercomparaison de modèles TSVA réalisé à partir des données de 1995 (il en est question plus bas), et utilisé l'ensemble des données pour mettre au point les différentes paramétrisations du stress et de la croissance de la végétation présentées dans les chapitres suivants. J'ai également exploité, avec Joël Noilhan et François Bouyssel, l'énorme potentiel constitué par la combinaison de mesures continues sur une longue période du bilan hydrique, de flux, de caractéristiques du couvert végétal, et de mesures du contenu en eau superficiel du sol, pour démontrer la possibilité d'analyser le stock d'eau dans la zone racinaire à partir de variables mesurables à la surface.

3.1. Objectifs

A la différence des expériences à méso-échelle, l'objectif de MUREX était de produire un jeu de données suffisamment étendu dans le temps pour permettre une validation saisonnière et interannuelle des modèles TSVA utilisés dans les modèles météorologiques et hydrologiques (Fig. 3). Il convenait de vérifier à l'échelle locale, en particulier, que ces modèles sont capables de reproduire les échanges turbulents et radiatifs, ainsi que l'extraction d'eau dans le sol. Dans le cadre du Programme National de Recherche en Hydrologie, plusieurs équipes françaises (CNRM, LTHE, CESBIO) ont donc proposé de réaliser l'expérience MUREX, comportant des mesures de toutes les composantes des bilans hydrique et énergétique, les variations saisonnières des caractéristiques de la végétation, du profil d'humidité et de température dans le sol, et des variations du climat local, sur au moins trois cycles annuels.

L'expérience a été réalisée sur une jachère du sud-ouest de la France (près de Toulouse) et s'est terminée en mai 1998. La base de données obtenue est très riche, et l'analyse de ces données a déjà donné lieu à un grand nombre de communications et de publications (25 au total dont 2 thèses et 7 publications dans des revues à comité de lecture).

L'objectif initial de validation des TSVA a été traité par un exercice d'intercomparaison de quatre modèles développés en France par plusieurs équipes (Calvet et al. 1999a). D'autres applications de ce jeux de données sont rapidement apparues :

- Etudes de faisabilité de l'assimilation de données de télédétection (Calvet et al. 1998a, Calvet et Noilhan 2000) ;
- Introduction d'un module de végétation interactive simplifié dans un TSVA (Calvet et al. 1998b) ;
- Amélioration de la prise en compte du stress hydrique sur les paramètres de la photosynthèse et la conductance stomatique (Calvet 2000) ;
- Prise en compte d'une couche de mulch dans le calcul du flux de chaleur dans le sol et de l'évaporation (Gonzalez-Sosa 1999, Gonzalez-Sosa et al. 1999, Gonzalez-Sosa et al. 2001) ;
- Estimation des flux de CO_2 (Mordelet et al. 1998).

3.2. Matériels et méthodes

Le site de MUREX (43°24'N, 1°10'E, 240 m) est une jachère herbacée relativement dense. Le sol est une boulbène hydromorphe profonde : la texture moyenne sur le premier mètre est limono-argileuse (14% d'argiles pour 28% de sables). Cependant, la proportion d'argiles augmente sensiblement en profondeur.

Les variables météorologiques (précipitations, température et humidité de l'air à 2 m, vent à 10 m) sur le site ont été mesurées toutes les 30 minutes. C'est également le cas de la température de surface (infra-rouge et thermomètres dans le sol), du rayonnement incident (solaire et atmosphérique), et des flux de surface estimés par la méthode SAMER : rayonnement net (*Rn*), flux de chaleur sensible (*H*), flux de chaleur dans le sol (*G*), et par différence le flux de chaleur latente $LE = Rn–H–G$. La méthode des corrélations a également été employée pour estimer les flux en début et en fin de campagne. Les autres mesures de routine sont des profils hebdomadaire d'humidité volumique du sol par sondages neutroniques (par intervalles régulier de 10 cm, jusqu'à 1.3 m), l'estimation de l'indice foliaire (*LAI*) par planimétrie, de la biomasse et de la nécromasse (Fig. 4).

L'analyse du bilan hydrique de la jachère, c'est à dire des valeurs mesurées d'évapotranspiration, de contenu en eau du sol, et de précipitations, a montré que le bilan n'est pas fermé et qu'il existe une autre source d'eau que les précipitations sur la parcelle. Les mesures potentiométriques ont montré qu'il existe une nappe perchée susceptible d'agir sur le bilan hydrique. Les apports d'eau par nappe perchée (*Xs*) ont été estimés sur une base hebdomadaire en utilisant les variations mesurées du contenu en eau du sol ($\Delta\theta$) et les cumuls hebdomadaires des précipitations (ΣP) et de l'évapotranspiration (ΣLE) : $Xs = \Delta\theta + \Sigma LE - \Sigma P$. La somme des apports (valeurs positives de *Xs*) est très significative (180 mm pendant 1995 par exemple). Cette source supplémentaire d'eau doit être prise en compte dans l'équation d'évolution du stock d'eau du sol dans les TSVA utilisés sur ce jeux de données.

En 1995, les profils de contenu en eau du sol sur les 5 cm de surface (w_g) ont été mesurés deux fois par jour pendant deux périodes d'observation intensive (POI) de 30 jours chacune, au

printemps (jour julien 114 à 143) et en automne 1995 (jour 269 à 298). Les données obtenues dans le cadre de MUREX en 1997 et 1998 comprennent des mesures continues de w_g pendant une période beaucoup plus longue qu'en 1995 (17 mois au lieu de 2). Le système automatique de mesure de w_g a été mis en place fin 1996 en installant verticalement quatre sondes FDR (ML1 ThetaProbe, Delta-T Devices) à la surface du sol. L'humidité donnée par les sondes représente une valeur intégrée sur une couche de 6 cm. Après étalonnage, l'erreur moyenne entre les données ThetaProbe et des mesures gravimétriques de contrôle est 0.01 m^3m^{-3}. Le système ThetaProbe a été très fiable, avec seulement 1.2 % de données manquantes.

Enfin, des mesures de flux de CO_2 ont été réalisées durant l'été 1997, et en 1998. Deux méthodes ont été employées : mesures de surface en chambre ventilée, et mesures aérodynamiques par la méthode des corrélations.

3.3. Résultats

La base de données issue de MUREX a tout d'abord permis de réaliser une intercomparaison de modèles. Les données de 1995 ont été utilisées pour comparer les résultats de plusieurs TSVA : ISBA, MAGRET, SiSPAT et AliBi. Il apparaît que tous les modèles sont capables de reproduire l'évolution générale des variables d'état du système mais des différences notables entre modèles apparaissent dans le détail (Tableau 3). Elles sont dues en particulier à des formulations différentes des coefficients d'échange au niveau du sol (comme l'ont montré Gonzalez-Sosa et al. 1999 pour l'effet du mulch) et de l'effet du stress hydrique sur la conductance stomatique. Dans Calvet et al. 1999, le modèle le plus complexe (SiSPAT) n'est pas le meilleur en terme de scores. A la suite de cette intercomparaison, une représentation explicite de la litière (ou mulch) a été introduite dans SiSPAT par Enrique Gonzalez-Sosa, en thèse au LTHE, et a permis d'améliorer notablement les résultats de ce modèle. Le flux de chaleur dans le sol mesuré sur la jachère de MUREX, en particulier, est décrit correctement par cette nouvelle version de SiSPAT, ce qui n'était pas le cas avec l'ancienne version, ni avec aucun des autres modèles testés. Dans ISBA, la litière n'est pas représentée explicitement, mais les principaux termes du bilan d'énergie sont décrits correctement.

Dans un second temps, différentes versions du modèle ISBA ont été confrontées aux mesures afin de répondre à trois questions fondamentales en modélisation de surface :

- Assimilation de l'eau du sol : le stock d'eau du sol accessible aux racines conditionne le taux de transpiration des plantes et constitue donc un facteur fondamental des flux et de la température de surface. Une étude de faisabilité de l'assimilation de données de télédétection en radiométrie en bande L a été réalisée à partir des données de MUREX (Calvet et al. 1998a). Cette étude a été utilisée par Kerr et al. (1998) pour la définition du projet spatial SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) du CNES et de l'ESA.
- Photosynthèse et végétation interactive : un module de végétation interactive simplifié a été introduit dans ISBA et appliqué à MUREX et à d'autres jeux de données.

- Stress hydrique : la prise en compte du stress hydrique sur les paramètres de la photosynthèse et la conductance stomatique est nécessaire à l'utilisation d'un modèle de photosynthèse. Cet aspect a été étudié en détail sur MUREX, sur d'autres jeux de données, et à l'aide d'une méta-analyse d'articles rendant compte de valeurs observées de conductance stomatique dans différentes conditions de stress.

Ces aspects sont présentés dans les chapitres suivants.

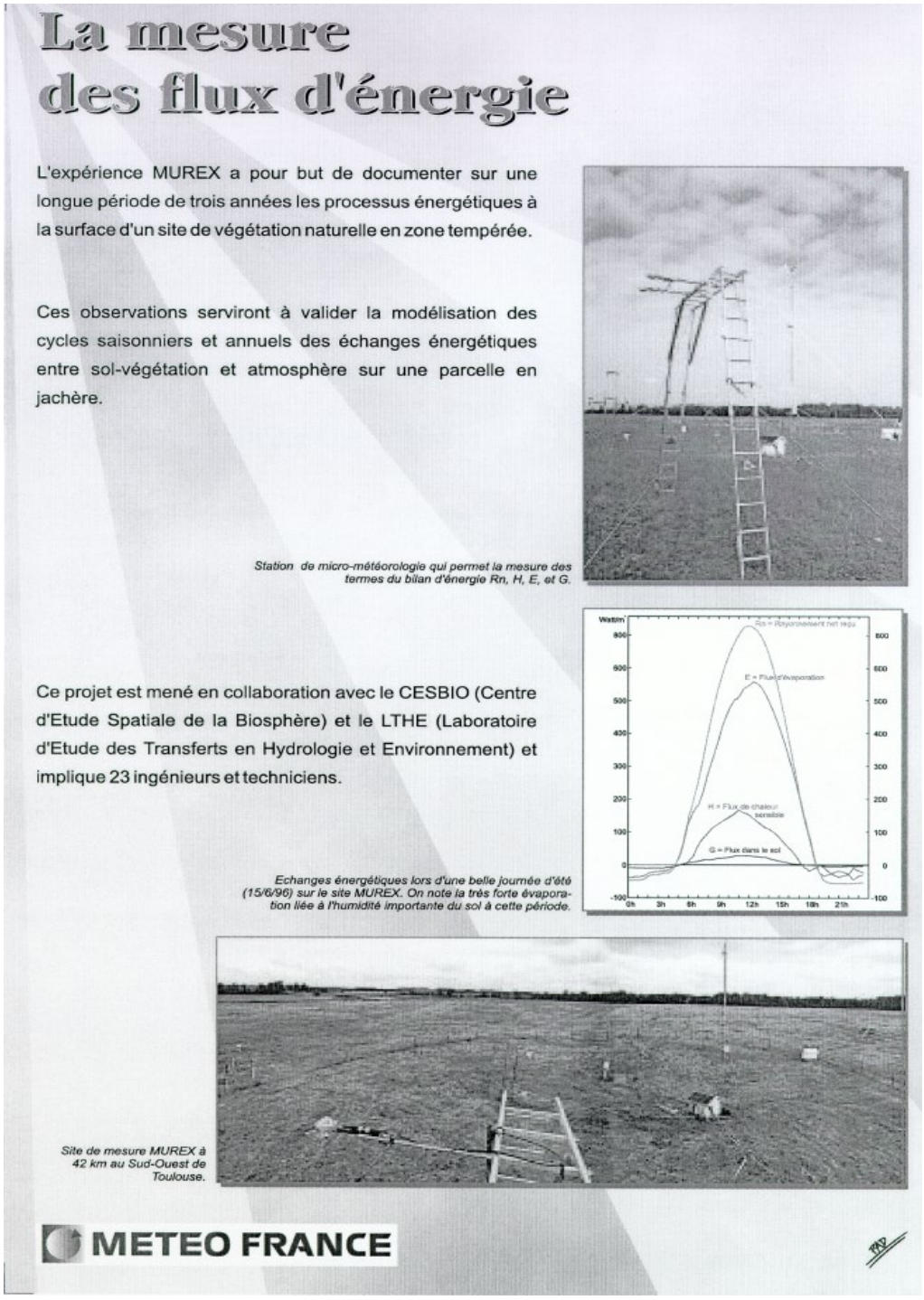

Fig. 3. Présentation « grand public » de l'expérience MUREX.

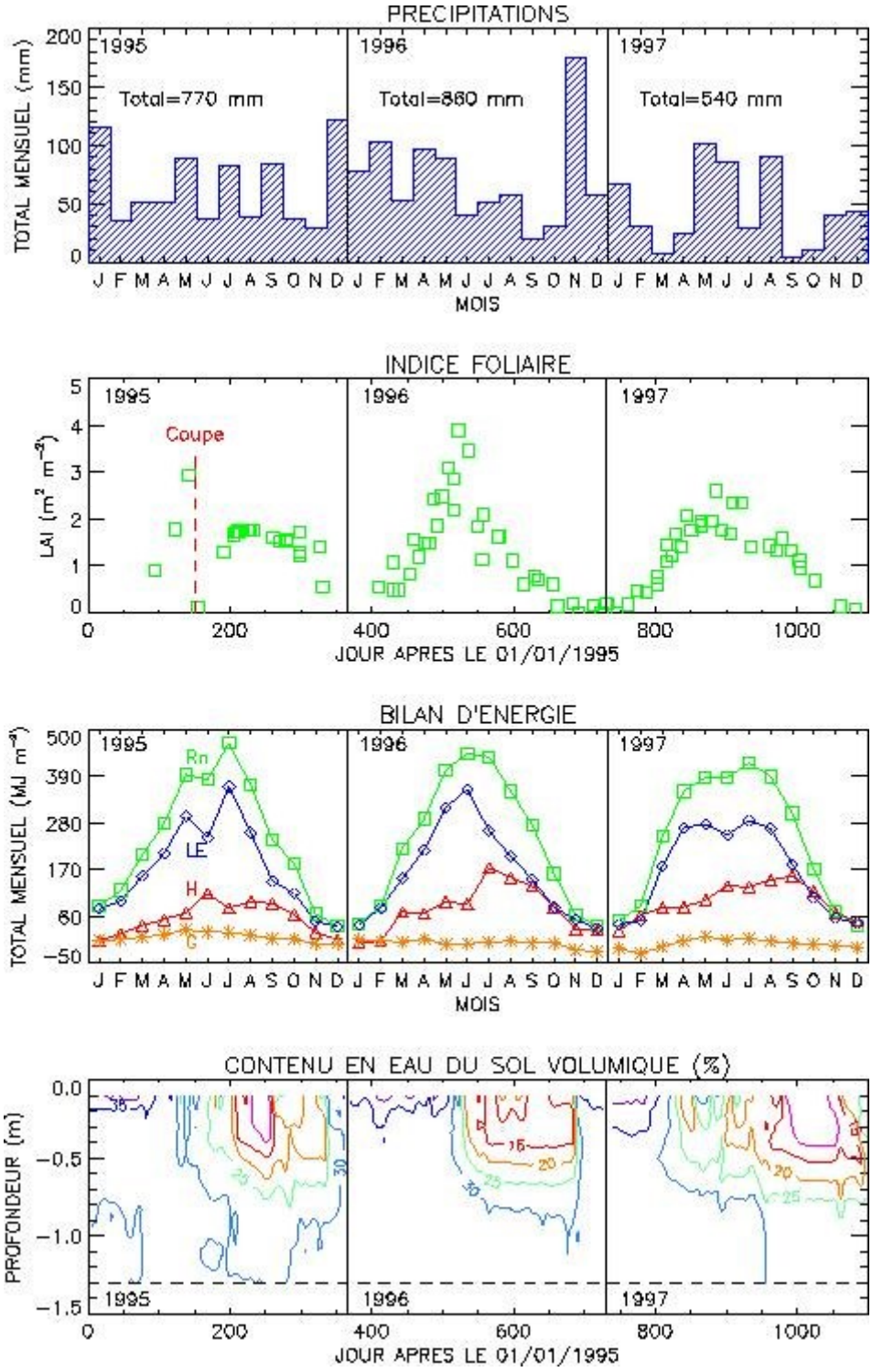

Fig. 4. Présentation synthétique des éléments du bilan hydrique (de haut en bas : précipitations, indice foliaire, flux de surface, et profils de contenu en eau du sol) mesurés lors des années 1995, 1996 et 1997 de l'expérience MUREX.

Tableau 3

Ecart entre simulations et observations sur l'année 1995 de MUREX pour les modèles ISBA, MAGRET, ALiBi, et SiSPAT en termes d'erreur quadratique moyenne (rms), biais moyen (simulé moins observé), et efficacité du modèle (critère de Nash) sur les quantités suivantes: évapotranspiration (*LE*), flux de chaleur (*H*), rayonnement net (*Rn*), flux de chaleur dans le sol (*G*), température de surface (T_s), et stock d'eau dans le sol ($w_2 \times d_2$). Noter que les simulations d'AliBi ne couvrent pas toute la période et que les scores d'ISBA sur la durée d'AliBi sont indiqués entre parenthèses.

Modèle		LE	H	Rn	G	Ts	$w_2 \times d_2$
ISBA	Erreur rms	35 W m^{-2}	24 W m^{-2}	19 W m^{-2}	30 W m^{-2}	2.8 °C	17 mm
	Biais moyen	4 W m^{-2}	11 W m^{-2}	13 W m^{-2}	–3 W m^{-2}	–2.2 °C	10 mm
	Efficacité	91 %	79 %	99 %	négative	87 %	90 %
MAGRET	Erreur rms	43 W m^{-2}	31 W m^{-2}	32 W m^{-2}	24 W m^{-2}	2.9 °C	21 mm
	Biais moyen	6 W m^{-2}	8 W m^{-2}	10 W m^{-2}	–4 W m^{-2}	–1.6 °C	–1 mm
	Efficacité	87 %	66 %	97 %	négative	87 %	85 %
AliBi	Erreur rms	33 W m^{-2}	31 W m^{-2}	23 W m^{-2}	31 W m^{-2}	-	-
(ISBA)		(38 W m^{-2})	(24 W m^{-2})	(20 W m^{-2})	(33 W m^{-2})		
	Biais moyen	9 W m^{-2}	–6 W m^{-2}	–6 W m^{-2}	–9 W m^{-2}	-	-
		(6 W m^{-2})	(10 W m^{-2})	(14 W m^{-2})	(–2 W m^{-2})		
	Efficacité	94 %	73 %	99 %	négative	-	-
		(93 %)	(84 %)	(99 %)			
SiSPAT	Erreur rms	41 W m^{-2}	23 W m^{-2}	25 W m^{-2}	33 W m^{-2}	3.9 °C	24 mm
	Biais moyen	3 W m^{-2}	1 W m^{-2}	4 W m^{-2}	0 W m^{-2}	–0.4 °C	–15 mm
	Efficacité	89 %	79 %	98 %	négative	75 %	79 %
SiSPAT-mulch	Erreur rms	31 W m^{-2}	24 W m^{-2}	25 W m^{-2}	18 W m^{-2}	3.7 °C	-
(Gonzalez-Sosa	Biais moyen	1 W m^{-2}	2 W m^{-2}	3 W m^{-2}	0 W m^{-2}	–1.0 °C	-
et al. 2001)	Efficacité	91 %	79 %	98 %	**77 %**	78 %	-

3.4. Conclusion

L'expérience MUREX est un jeu de données unique qui a déjà permis de tester divers schémas de surface. Grâce à un effort particulier qui a porté sur le suivi biologique de la végétation et sur le contenu en eau du sol, elle a contribué à ouvrir de nouvelles voies de recherche (assimilation de données, végétation interactive, étude des stress, etc.). En effet, l'indice foliaire et le contenu en eau du sol répondent à la variabilité interannuelle du climat et leur cycle annuel est susceptible de varier de manière très importante d'une année à l'autre. Ces deux variables représentent la trace du climat sur le système sol-plante et doivent donc être simulées au mieux dans les études d'impact décrivant les effets d'un changement climatique. De même, l'indice foliaire et l'eau du sol conditionnent les flux de surface et doivent donc être connus pour la météorologie opérationnelle. De plus, des problèmes métrologiques liés à la mesure du flux de vapeur d'eau par la méthode des corrélations sur couverts bas ont été confirmés par cette expérience. L'exploitation de ces données se poursuit, notamment des mesures de flux de CO_2 et de paramètres biologiques comme la teneur en azote des plantes.

4. Analyse du contenu en eau du sol par télédétection

Une bonne représentation des processus de surface sur les continents dans les modèles météorologiques (de prévision du temps et de climat) est un facteur important de la qualité des simulations. En particulier, comme cela a été montré dans le chapitre 2, l'état initial de la réserve hydrique du sol dans la zone racinaire, w_2, a des conséquences importantes sur la valeur calculée des flux de surface (chaleur et évapotranspiration). Dans le modèle de prévision opérationnel ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle – Grande Echelle) de Météo-France, la réserve en eau du sol est initialisée par assimilation dans ISBA de la température et de l'humidité de l'air observées par le réseau météorologique de surface (Mahfouf 1991, Giard et Bazile 2000). En effet, dans certaines conditions météorologiques, il est possible d'ajuster la valeur de w_2 de façon à minimiser l'erreur de prévision sur les paramètres atmosphériques de surface. Cependant, un point faible de cette méthode est la nature indirecte de la relation entre les paramètres atmosphériques et w_2, qui peut amener à modifier la réserve en eau de manière erronée. Une alternative est d'utiliser la télédétection dans l'infrarouge thermique ou dans les micro-ondes pour assimiler des variables de surface comme la température de surface ou le contenu en eau superficiel des sols. En particulier, la radiométrie en bande L est une technique prometteuse.

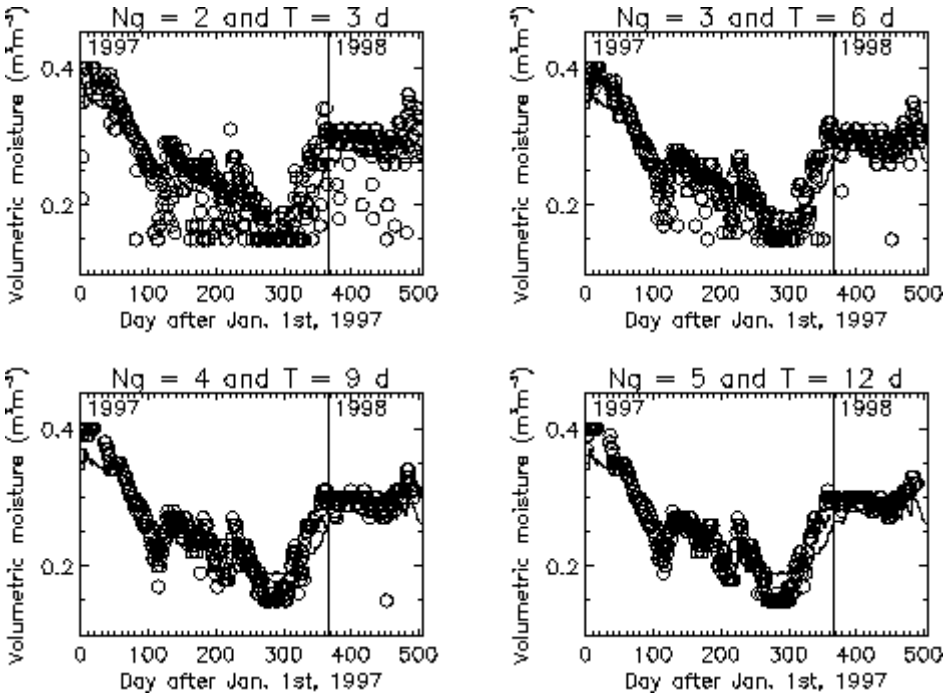

Fig. 5. Comparaison des contenus en eau de la zone racinaire obtenus par assimilation avec un temps de revisite t_L = 3 j (cercles) avec la simulation ISBA de référence en 1997-1998 sur MUREX (Calvet et Noilhan 2000). Les quatre figures correspondent à un nombre d'observations de w_g variant de 2 à 5. La longueur de la période d'assimilation (T) est indiquée.

4.1. Du contenu en eau du sol superficiel à la réserve en eau totale

Mes travaux portant sur les observations de MUREX ont montré que la donnée du contenu en eau superficiel du sol (w_g) pouvait être utilisée pour diagnostiquer w_2 dans toutes les conditions de stress hydrique (Calvet et al. 1998a ; Calvet et Noilhan 2000). Ces mêmes données ont confirmé les conclusions d'études précédentes menées par d'autres auteurs : la température de surface est un bon indicateur de l'état hydrique des sols couverts de végétation, mais en conditions sèches seulement.

Dans le modèle ISBA, les processus de diffusion de l'eau liquide sont décrits et la valeur de w_g est reliée à w_2 par la méthode force-restore. On montre que la sensibilité de w_g à la valeur initiale de w_2 est suffisante pour que l'on puisse estimer w_2 à partir de séries temporelles *observées* de w_g. Des algorithmes d'assimilation de w_g pour estimer la valeur initiale de w_2 ont été proposés, fondés sur l'utilisation du schéma ISBA. La méthode a été appliquée avec succès par Wigneron et al. 1999 à un autre jeu de données comportant également des mesures directes, in situ, de w_g.

Lorsque les flux de surface sont faibles, la valeur à l'équilibre de w_g est reliée à w_2 par la diffusion entre les deux réservoirs. Cependant, la valeur de w_g peut dans certains cas s'éloigner de celle de w_2 : lors de périodes de forte évaporation ou après une pluie. Dans le premier cas, w_g est plus petit que sa valeur à l'équilibre car l'évaporation directe du sol est plus élevée que la diffusion verticale, et dans le second cas le taux d'humidification de la couche de surface est plus grand que la diffusion. Il a été montré que la sensibilité de la valeur *simulée* de w_g à la valeur initiale de w_2 est suffisante pour que l'on puisse estimer w_2 à partir de séries temporelles *observées* suffisamment longues de w_g. Des algorithmes d'assimilation de w_g pour estimer la valeur initiale de w_2 ont été proposés, fondés sur l'utilisation du schéma ISBA, en supposant connus les paramètres du sol et de la végétation, et en utilisant un forçage atmosphérique mesuré. L'impact des pluies sur la qualité des inversions a également été décrit (Calvet et Noilhan 2000). La méthode d'assimilation utilisée consiste à comparer une série temporelle observée de w_g, comprise entre les dates t et $t+T$, aux valeurs simulées, de façon à estimer par optimisation la valeur initiale de w_2. La période d'assimilation T est reliée au temps de revisite (t_L) et au nombre d'observations utilisées (N_g) par $T = t_L\left(N_g - 1\right)$. Il apparaît que le temps de revisite t_L entre deux observations de w_g a peu d'influence sur la qualité des estimations pourvu qu'il soit plus court que 4j. Alors que 4 observations de w_g sont nécessaires dans le cas général (ce qui correspond à T = 9j pour un temps de revisite de 3j), 2 seulement permettent d'estimer w_2 s'il n'y a pas de pluie pendant la période d'assimilation. Ce dernier résultat implique qu'une période d'assimilation très courte peut être employée lors de périodes sans pluies. La Fig. 5 montre les valeurs de w_2 obtenues par la procédure d'assimilation en 1997 et 1998 avec t_L = 3 j, pour des valeurs de N_g variant de 2 à 5, pour toutes les périodes (avec ou sans pluies). En général, les estimations de w_2 sont proches des observations et de la simulation de référence. Cependant, le biais atteint parfois

0.10 m^3m^{-3}. Cela est dû à une mauvaise représentation de w_g qui est mesuré sur une épaisseur de 6 cm alors que les simulations du modèle concernent une couche moins épaisse. Le fait que les gradients de texture et de structure ne soient pas pris en compte comme dans des modèles plus complexes (Gonzalez-Sosa 1999, Boone 2000) est également une limitation de la méthode. La Fig. 6 montre que les valeurs de w_g simulées par ISBA sont fortement biaisées et qu'une correction empirique doit être appliquée pour rendre l'assimilation possible. En dépit de cette correction, un biais saisonnier sur w_g subsiste (Fig. 7). Il est directement responsable des écarts systématiques que l'on peut observer dans la Fig. 5 entre les valeurs observées de w_2 et celles obtenues par assimilation. En pratique, il est probable que la mise en place d'un algorithme d'assimilation de températures de brillances en bande L devra s'accompagner de l'élimination empirique des biais systématiques (comme cela est souvent le cas pour l'assimilation de données satellitaires).

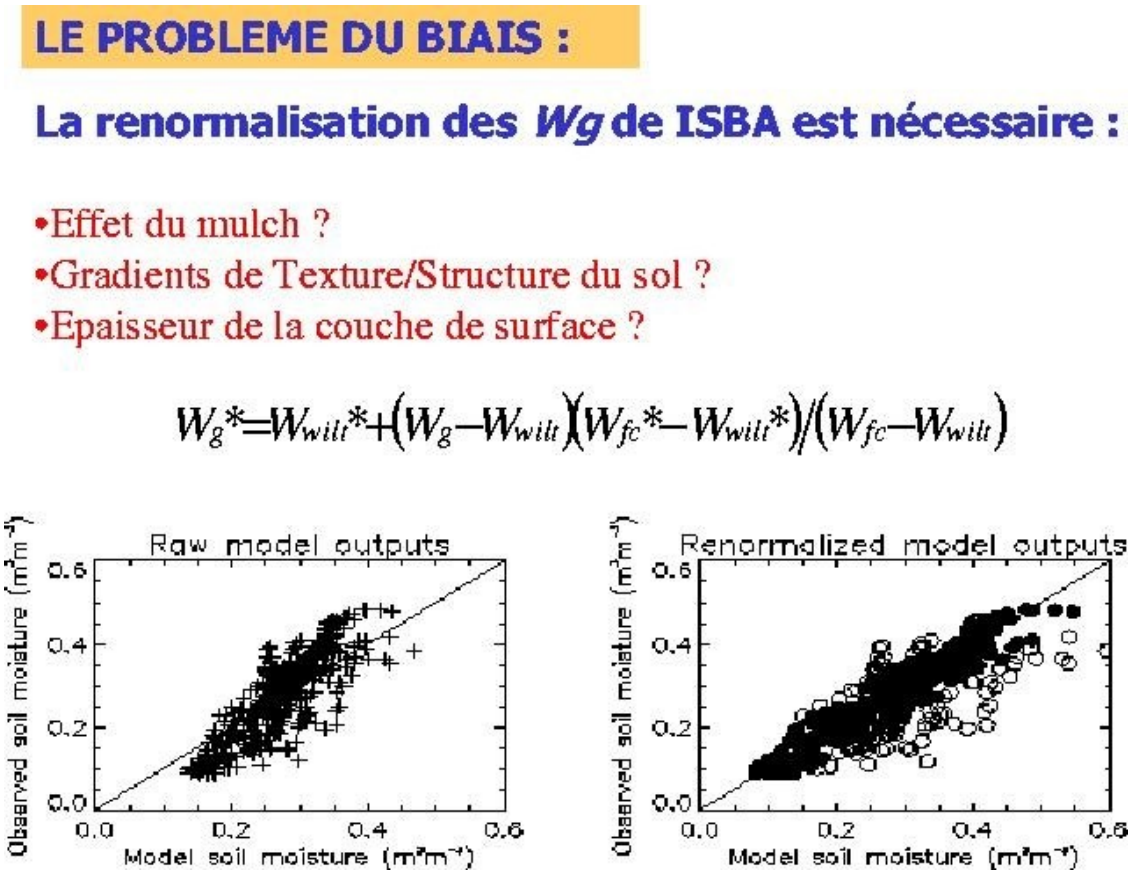

Fig. 6. Biais de ISBA en contenu en eau de surface, *Wg* (d'après Calvet et Noilhan 2000). La comparaison entre les simulations et les observations de Wg dans le cadre de MUREX montre que le modèle sur-estime les faibles valeurs de Wg et sous-estime les fortes valeurs. Un tel biais rend impossible l'assimilation des série temporelles de Wg pour estimer le contenu en eau de la zone racinaire. Une méthode pragmatique pour corriger ce biais consiste à renormaliser les

valeurs de Wg produites par ISBA en remplaçant les valeurs de contenu en eau du sol au point de flétrissement (Wwilt) et à capacité au champ (Wfc) par de nouvelles valeurs (Wwilt*, et Wfc*).

Biais saisonnier :

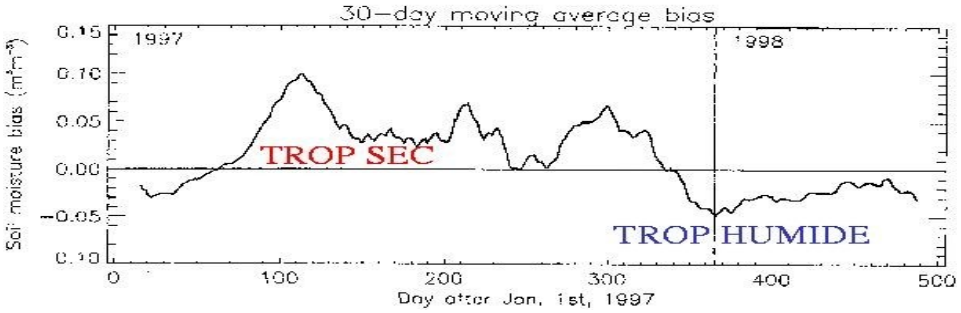

Fig. 7. Malgré la renormalisation de Wg (voir Fig. 6), des biais saisonniers subsistent sur cette variable et sont mis en évidence ici (d'après Calvet et Noilhan 2000). On voit que le biais sur Wg correspond exactement au biais affectant le contenu en eau de la zone racinaire obtenu par l'assimilation (Fig. 5).

4.2. Utilisation de températures de brillance en bande L : le projet SMOS

Le projet de mission spatiale SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) est le fruit de travaux entrepris dès 1990 par plusieurs groupes Toulousains, Matra Marconi Space, L'Observatoire Midi-Pyrénées, le CERFACS et le CESBIO auxquels se sont ensuite joints l'INRA et le CNRM. En 1997 ces travaux se sont concrétisés dans une réponse à l'Appel à Idées du CNES qui s'est ensuite étoffée pour devenir la Mission SMOS proposée à l'ESA fin 1998. J'ai beaucoup œuvré pour que le CNRM soit associé à ce projet, qui est susceptible d'améliorer grandement notre connaissance du fonctionnement de l'interface sol-végétation-atmosphère à l'échelle globale, et in fine d'améliorer la qualité des prévisions météorologiques grâce à une description améliorée du contenu en eau des sols. En mai 1999, l'ESA a sélectionné SMOS pour une phase A étendue, le lancement étant prévu pour 2005. Le Projet SMOS est donc maintenant un projet européen dans lequel la France joue un rôle prédominant.

La mission SMOS est un mini-satellite comportant un radiomètre micro-ondes fonctionnant en bande L (21 cm - 1,4 GHz). L'objectif de cette mission est de fournir une cartographie de l'humidité des sols et de la salinité des océans pendant au moins 3 ans, sur l'ensemble du globe, à une résolution de l'ordre de 50 km. Si les possibilités d'inverser l'humidité de surface et la salinité à partir de la température de brillance en bande L (*Tb*) sont bien établies depuis plusieurs années, la mise en œuvre de cette technique se heurtait à l'impossibilité d'installer sur un satellite une antenne de taille adaptée aux résolutions spatiales nécessaires. A partir des travaux effectués en radioastronomie, un nouveau concept de radiomètre a été mis au point. C'est un système reposant sur la synthèse d'ouverture réalisée au moyen d'antennes élémentaires réparties sur trois bras déployables.

a- Campagne de mesure SMOS-PIRRENE :

La contribution du CNRM à SMOS a consisté à mettre en avant l'intérêt que constitue pour la météorologie le suivi régulier de l'humidité superficielle du sol, suite à mes travaux montrant le lien entre cette quantité et le contenu en eau dans la zone racinaire (chapitre 4.1). La Fig. 8 montre quels sont les modèles et les flux de données nécessaires à l'assimilation des *Tb*. Alors que l'assimilation de séries temporelles de w_g est réalisée à partir d'un modèle TSVA, l'assimilation des *Tb* nécessite l'emploi d'un modèle d'émission du sol et de la végétation en bande L, couplé au modèle TSVA. Le modèle d'émission est susceptible d'introduire dans le processus d'assimilation une erreur liée aux hypothèses simplificatrices du modèle lui-même et à l'incertitude liée à l'estimation des paramètres du sol (rugosité, texture,…) et de la végétation (biomasse, contenu en eau,…).

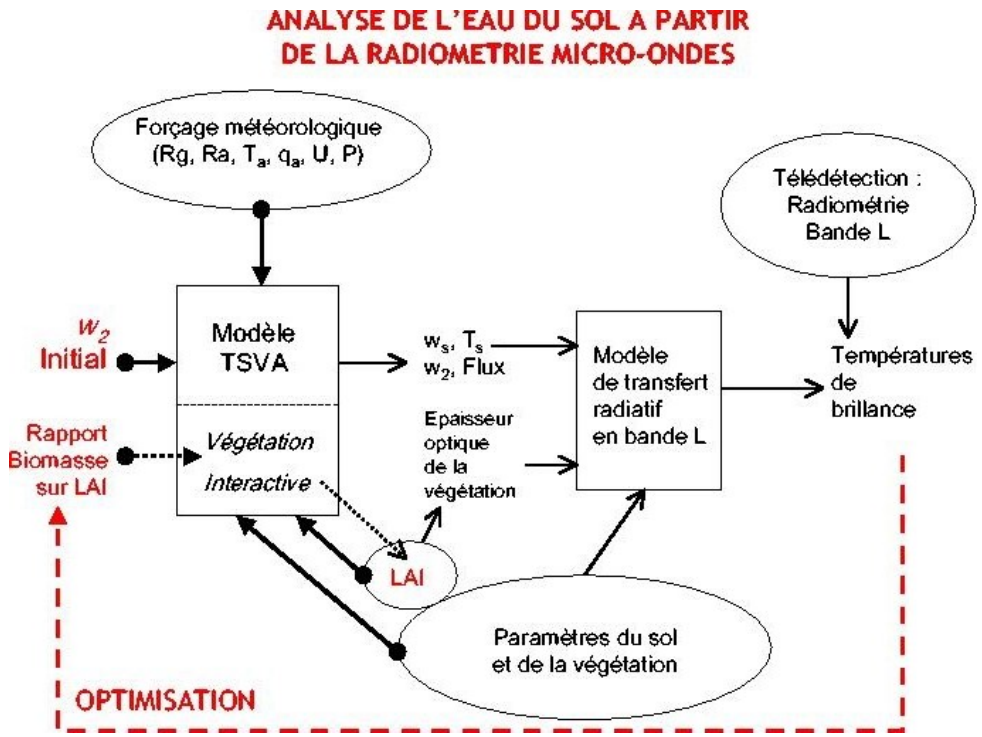

Fig. 8- Principe de la simulation de températures de brillance en bande L. Un modèle de Transfert entre le Sol, la Végétation et l'Atmosphère (TSVA) permet de calculer le contenu en eau du sol superficiel (w_g) et la température de surface (T_S). Ces deux variables permettent à un modèle d'émission de calculer les températures de brillance associées. Pour des applications en hydrométéorologie, l'assimilation des températures de brillance est susceptible de donner accès à une estimation du contenu en eau initial de la zone racinaire (w_2). De manière optionnelle (traits pointillés), on peut utiliser un modèle TSVA ayant la capacité de décrire la croissance de la végétation. Dans ce cas, l'indice foliaire Leaf Area Index (LAI) n'est plus prescrit mais calculé par le modèle. Dans cette configuration, l'assimilation des températures de brillance peut fournir une estimation d'un paramètre de la végétation variant selon les conditions climatiques et nutritionnelles (disponibilité en azote par exemple) : le rapport biomasse active sur LAI.

L'extension de la technique d'assimilation de w_g aux températures de brillance en bande L n'est donc pas triviale. Pour la réaliser, une campagne de mesure est en cours sur le site PIRRENE (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur la Radiométrie en Environnement Extérieur) de l'ONERA, en région toulousaine (Fig. 9). Il s'agira plus particulièrement de valider les algorithmes d'assimilation des *Tb* pour l'analyse du contenu en eau du sol dans la zone non saturée w_g. L'assimilation des *Tb* (Fig. 8) est l'étape suivant logiquement les études menées par le CNRM dans le cadre de MUREX pour évaluer la possibilité d'assimiler des variables de surface, température de surface et contenu en eau superficiel du sol à partir du modèle ISBA.

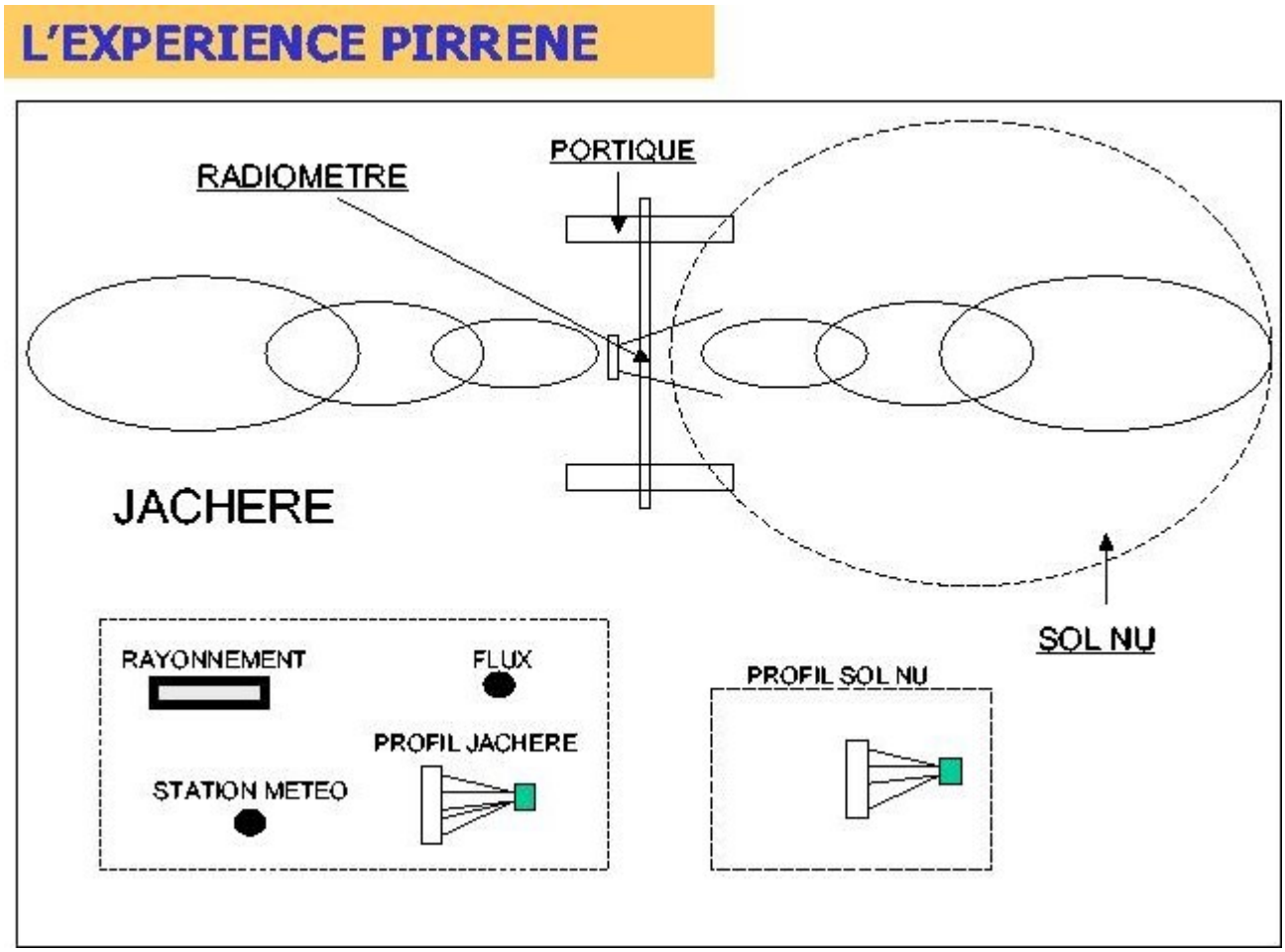

Fig. 9. Schéma de l'expérience SMOS-PIRRENE, en cours de réalisation sur le site ONERA de Mauzac, près de Toulouse. Deux zones sont observées par le radiomètre en bande L, monté sur un portique de 15 m de hauteur : jachère et sol nu. Une station météorologique complète, incluant des mesures de flux radiatifs et de flux de chaleur, et des mesures automatiques de contenu en eau du sol a été installée sur la zone de jachère. Sur sol nu, les mêmes mesures de contenu en eau du sol que sur la jachère sont effectuées.

b- Etude de faisabilité à l'échelle globale :

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) a mis en place un projet visant à évaluer la robustesse des algorithmes d'inversion permettant d'estimer le contenu en eau du sol superficiel (w_g) à partir de températures de brillance obtenues depuis l'espace par un radiomètre placé en orbite autour de la Terre. Ce projet est coordonné par L. Simmonds (U. Reading). J'ai pris en charge les aspects techniques de ce projet, qui sont traités au CNRM, avec Thierry Pellarin, qui est en post-doctorat. Ce projet mobilise une large communauté scientifique, qui est détaillée en annexe. Un modèle d'émission micro-ondes a été couplé au schéma de surface ISBA, et un simulateur global de SMOS a été réalisé à partir des données de forçage atmosphérique ISLSCP, en utilisant les fichiers physiographiques du CNRM : ECOCLIMAP (Masson et al. 2002). Les températures de brillance ainsi simulées ont permis de tester les algorithmes d'inversion (pour obtenir w_g) à l'échelle globale (Fig. 10).

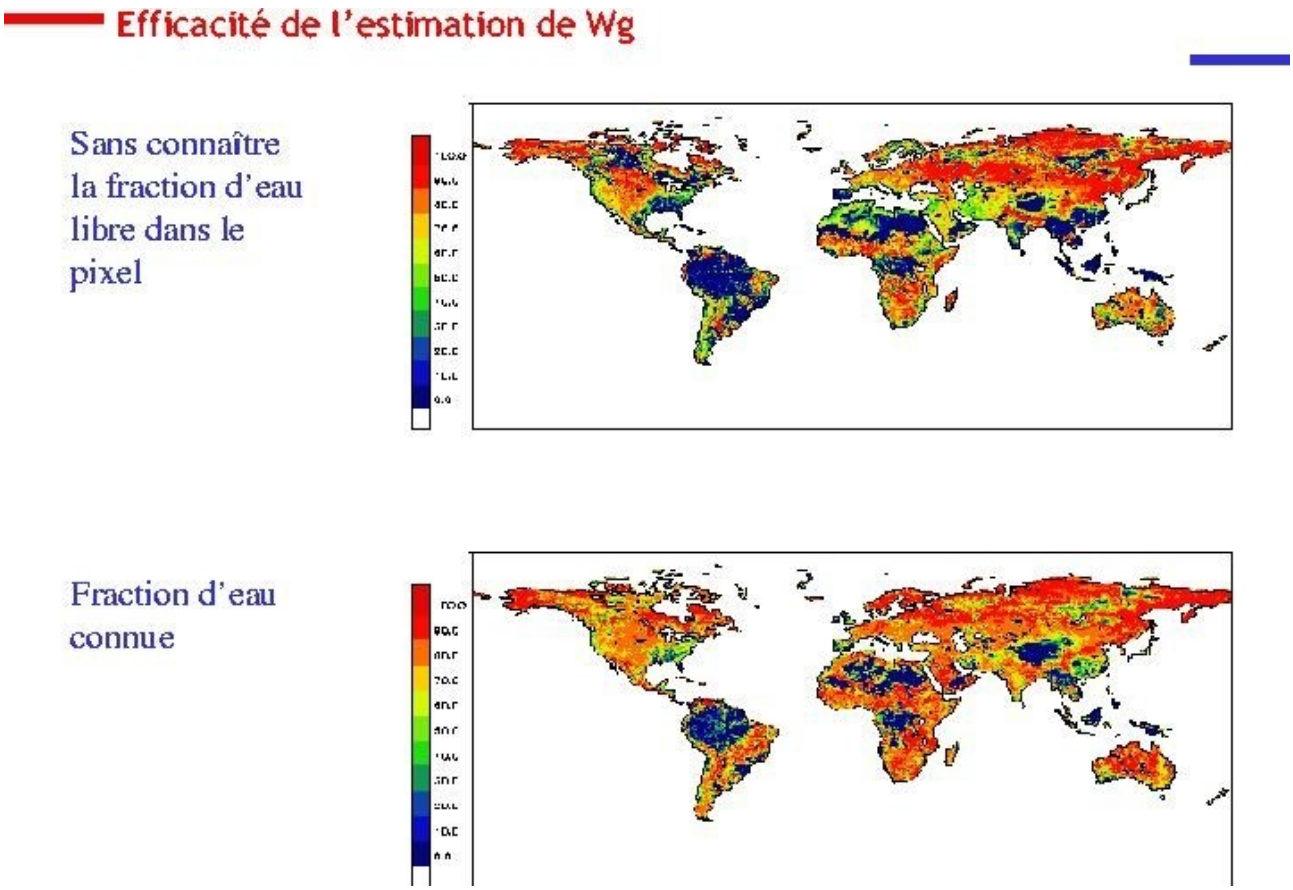

Fig. 10. Cartographie globale au demi-degré de l'efficacité d'estimation (sur une année) du contenu en eau du sol en surface (Wg) à partir d'un radiomètre en bande L, multi-angulaire, bi-polarisé, mis en orbite héliosynchrone. Les couleurs chaudes (du jaune au rouge) correspondent à de fortes valeurs de l'efficacité (> 60%). On voit que le fait de connaître la proportion d'eau libre (lacs, etc.) dans les pixels est important pour convertir les températures de brillance en estimations de Wg.

4.3. Conclusion

Les travaux réalisés par Calvet et al. 1998a et Calvet et Noilhan 2000 ont montré que l'assimilation dans les modèles TSVA de séries temporelles d'observations du contenu en eau du sol en surface (5-6 cm) permet de reconstituer par assimilation l'évolution du contenu en eau total du sol. Alors que l'assimilation de la température de surface, n'est possible qu'en conditions sèches (voir Calvet et al. 1998a pour les résultats obtenus dans le cadre de MUREX et pour une revue de la littérature scientifique portant sur ce sujet), l'usage du contenu en eau superficiel du sol semble efficace dans des conditions plus diverses.

Dans l'optique de la préparation d'une mission spatiale, une méthode d'assimilation la plus simple et la plus robuste possible a été testée et donne de très bons résultats. Ces résultats permettent d'envisager l'assimilation de données satellitaires radiométriques en bande L (1,4 GHz) dans les modèles hydrologiques et météorologiques. Dans l'éventualité d'une utilisation opérationnelle de données satellitaires, il est probable que l'on pourra encore améliorer la méthode au travers de divers algorithmes permettant d'utiliser de l'information complémentaire (comme la cohérence des séries temporelles obtenues, la comparaison avec la climatologie, etc.). L'utilisation d'autres domaines de longueur d'onde est également susceptible d'améliorer la description de la surface par les modèles. Comme cela est expliqué dans la Fig. 8, un modèle TSVA permet de calculer le contenu en eau du sol superficiel (w_g) et la température de surface (T_S). Dans le domaine des micro-ondes passives, ces deux variables permettent à un modèle d'émission de calculer les températures de brillance associées, moyennant l'estimation de l'épaisseur optique du couvert végétal à partir des informations disponibles sur la biomasse aérienne. Pour des applications en hydrométéorologie, l'assimilation des températures de brillance est susceptible de donner accès à une estimation du contenu en eau initial de la zone racinaire (w_2).

De manière optionnelle, on peut utiliser un modèle TSVA ayant la capacité de décrire la croissance de la végétation. Dans ce cas, l'indice foliaire Leaf Area Index (*LAI*) n'est plus prescrit mais calculé par le modèle. Dans cette configuration, il est possible d'estimer l'épaisseur optique micro-ondes du couvert à partir du *LAI*. L'assimilation des températures de brillance peut alors fournir une estimation d'un paramètre de la végétation variant selon les conditions climatiques et nutritionnelles (disponibilité en azote par exemple) : le rapport biomasse active sur *LAI*. L'utilisation des températures de brillance micro-ondes peut donc être associée à des radiances observées dans d'autres domaines de longueur d'onde, comme l'infrarouge ou le visible. L'infrarouge permet d'apporter de l'information au système, dans un processus d'assimilation faisant intervenir T_S. Dans le domaine visible, il est nécessaire de coupler le modèle TSVA à un modèle de réflectance (type SAIL), faisant intervenir le *LAI* calculé par un TSVA à végétation interactive (comme le modèle ISBA-A-gs présenté au chapitre 5). Ainsi, un modèle comme ISBA-A-gs permet d'utiliser au mieux l'information apportée par des observations de la surface dans l'infrarouge, les micro-ondes, et le visible. Les variables pouvant être analysées sont le contenu en eau de la zone

racinaire, et le rapport biomasse sur *LAI*. Si une technique d'assimilation variationnelle est utilisée, une période d'assimilation de quelques jours est suffisante dans le premier cas, alors que quelques semaines, voire quelques mois peuvent être nécessaires dans le second.

5. CO_2, azote, stress, et végétation interactive : le modèle ISBA-A-gs

La combustion de molécules organiques fossiles par les sociétés industrielles provoque une augmentation sensible de la concentration en CO_2 de l'atmosphère. On estime qu'elle pourrait être doublée d'ici la fin du XXIième siècle. La réponse des couverts végétaux à une augmentation de la teneur en CO_2 est une question cruciale en météorologie. En effet, l'ouverture des stomates ainsi que la quantité de feuilles produites par les plantes sont susceptibles d'être fortement influencées par la teneur en CO_2 atmosphérique. Or, la résistance stomatique et l'indice foliaire du couvert végétal régissent l'évaporation, et donc les bilans hydrique et énergétique de la surface.

Le modèle ISBA-A-gs, que j'ai développé en collaboration avec l'INRA, permet de simuler ces phénomènes : la photosynthèse est estimée par le modèle et la conductance foliaire en est déduite ; la croissance de la biomasse active est le résultat d'une accumulation d'assimilation nette de carbone ; l'indice foliaire est calculé directement à partir de la biomasse active (contrairement à beaucoup de modèles de croissance qui utilisent les sommes de température) ; la valeur de la photosynthèse est modifiée par les différents stress qui affectent la plante (sécheresse du sol et de l'air, température trop basse ou trop élevée) et les facteurs limitants (rayonnement, CO_2 et azote).

Ce modèle permet donc de décrire les effets d'un changement climatique sur le fonctionnement de la plante et son interaction avec l'atmosphère sur le plan des bilans d'énergie et d'eau, avec un nombre réduit de paramètres (moins de 10 paramètres pour la végétation dans la version la plus complexe). Ce résultat a été obtenu en appliquant l'approche fonctionnelle couramment appliquée dans les modèles TSVA : les processus biologiques sont traités par un système d'entrées-sorties de « boîtes noires » au travers d'un nombre réduit de paramètres fonctionnels, fixés de manière empirique. Ici, on essaie d'aller assez loin dans la modélisation, et la paramétrisation est appliquée en vue de décrire les phénomènes que l'on ne sait pas modéliser simplement, comme les effets du stress hydrique ou d'un enrichissement en azote. Cet effort de paramétrisation s'est appuyé sur les résultats de l'expérience MUREX et d'autres expériences de terrain, et aussi sur un travail de méta-analyse : les résultats de nombreuses études indépendantes ont été combinés pour estimer les paramètres fonctionnels et leur corrélation entre eux. Cette méthode permet de synthétiser divers résultats présentés dans la littérature, pouvant être très nombreux et apparemment contradictoires entre eux parfois. Elle est utilisée depuis longtemps en médecine et en sciences sociales, et commence à être utilisée en sciences naturelles.

Le modèle ISBA-A-gs ne comprend pas pour l'instant de véritable compartiment de carbone dans le sol et ne peut donc pas être utilisé pour réaliser des études d'impact sur les stocks de carbone. Cet aspect est traité par d'autres équipes en France (on peut citer le LSCE de l'IPSL, l'INRA) et leurs développements dans ce domaine seront intégrés dans ISBA-A-gs.

5.1. Photosynthèse et croissance des végétaux

Le schéma ISBA a été modifié par Calvet et al. (1998b) de façon à prendre en compte l'effet de la concentration atmosphérique en CO_2 sur la résistance stomatique. Le modèle proposé par Jacobs (1994) a été employé pour décrire la photosynthèse et son couplage avec la résistance stomatique. L'effet du stress hydrique, absent dans le modèle de Jacobs, a été pris en compte. La photosynthèse étant simulée par le modèle, elle est utilisée pour gérer un modèle très simple du fonctionnement du couvert permettant de prédire l'indice foliaire (Fig. 11), que j'ai mis en œuvre et testé grâce aux jeux de données disponibles au CNRM et à ceux fournis par mes collègues de l'INRA.

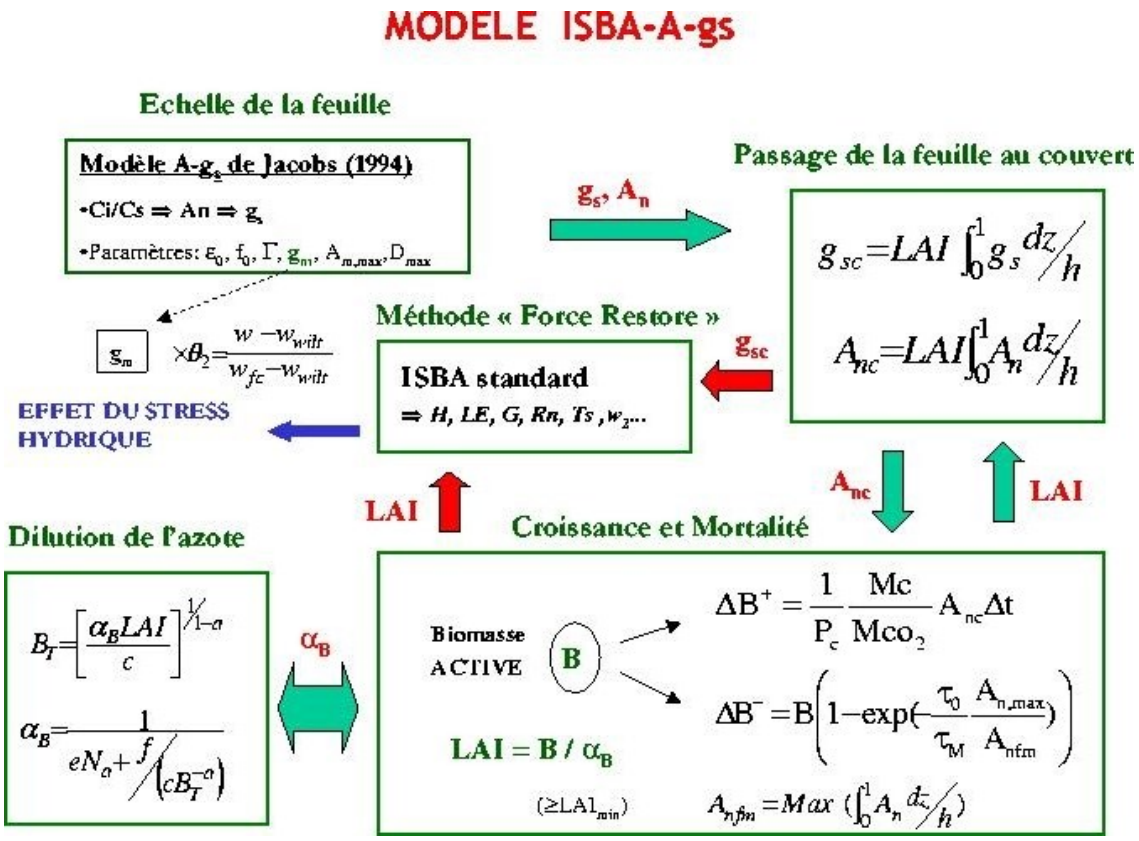

Fig. 11- Couplage d'un modèle de type « A-g_s » avec ISBA : le modèle ISBA-A-gs. Voir Calvet et al. 1998b pour la signification et la valeur des paramètres du modèle. La partie « dilution de l'azote » est décrite dans Calvet et Soussana 2001.

a- Modèle de Jacobs et introduction du stress hydrique :

Le modèle de Jacobs (1995) permet de calculer l'assimilation nette de CO_2 (A_n, en mg de CO_2 par m^2 de feuille et par seconde) et la conductance stomatique foliaire (g_s, en mm s^{-1}) à l'échelle de la feuille en fonction :

- de la densité de l'air, ρ_a (kg m^{-3}),
- de la concentration en CO_2 à la surface de la feuille, C_s (en parties par million, ppm),
- de la température de la feuille, T_s (°C),
- du déficit de saturation à la surface de la feuille, D_s (g kg^{-1}) qui est la différence entre l'humidité spécifique à saturation à la température de la feuille et l'humidité spécifique de l'air à proximité de la feuille,
- du rayonnement global, R_g (W m^{-2}),
- du type de plante (plante en C_3 ou plante en C_4).

Outre A_n et g_s, le modèle calcule la concentration interne en CO_2 (C_i, en ppm) et la transpiration foliaire E (mg m^{-2} s^{-1}). La version du modèle A-g_s qui a été codée dans ISBA est une version simplifiée qui évite de nombreuses itérations (Jacobs 1995). Les calculs sont effectués en plusieurs étapes :

On détermine d'abord l'effet de la température sur le point de compensation Γ (ppm) et la conductance mésophyllienne g_m (mm s^{-1}). Le rapport entre la concentration en CO_2 à l'intérieur et à la surface de la feuille C_i/C_s est calculé ensuite en fonction du point de compensation et du déficit de saturation. Le calcul de l'assimilation nette A_n est fondé sur l'approche proposée par Goudriaan et al. (1985). L'assimilation nette maximale $A_{m,max}$ est d'abord calculée en fonction de la température, comme g_m. Une première équation de saturation au CO_2, faisant intervenir g_m et C_i est appliquée pour obtenir l'assimilation nette maximale. Enfin, l'assimilation nette est limitée par la quantité de lumière disponible selon une équation de saturation prenant en compte l'efficacité de conversion de la lumière et le rayonnement efficace disponible pour la photosynthèse. La conductance stomatique est calculée à partir de l'assimilation nette selon une relation flux-gradient.

Le facteur permettant de décrire l'effet d'un manque d'eau au niveau des racines sur la résistance stomatique dans la version standard d'ISBA est le contenu en eau volumique du sol dans la zone racinaire (w_2) normalisé selon $\theta_2 = \frac{w_2 - w_{wilt}}{w_{fc} - w_{wilt}}$, où w_{fc} et w_{wilt} sont les contenus en eau volumiques à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, respectivement.

Ce même facteur θ_2 est utilisé dans ISBA-A-gs pour décrire l'effet du stress hydrique sur A_n et g_s. On suppose que les valeurs « non-stressées » des paramètres de la photosynthèse (uniquement la conductance mésophyllienne g_m en première approximation) sont affectées par la fonction stress θ_2.

b- Passage de la feuille au couvert :

Le modèle A-g_s décrit précédemment permet de simuler l'assimilation nette et la conductance stomatique à l'échelle de la feuille. L'extension du modèle à l'échelle du couvert a été réalisée selon la méthode préconisée par Jacobs (1995). En particulier, le couplage du modèle A-g_s avec ISBA consiste à donner aux variables T_s, C_s, et D_s des valeurs représentatives du couvert végétal dans son ensemble, et à tenir compte de l'atténuation du rayonnement solaire incident à l'intérieur du couvert. Pour conserver au schéma une certaine simplicité, on fait l'hypothèse que les variables T_s, C_s, et D_s sont constantes à l'intérieur du couvert. En fait, T_s est la température de surface déjà calculée dans la version standard d'ISBA. Les variables C_s et D_s sont calculées au niveau du couvert en fonction des valeurs obtenues au niveau de référence (2 m au-dessus du sol par exemple) à partir de la résistance aérodynamique r_a, elle aussi calculée dans la version standard d'ISBA, et des flux de CO_2 et de vapeur d'eau (A_n et LE, respectivement). A l'intérieur du couvert, l'éclairement des feuilles n'est pas homogène. Les feuilles situées au sommet du couvert absorbent ou réfléchissent le rayonnement solaire, limitant ainsi l'activité photosynthétique des feuilles situées à la base du couvert. L'atténuation du rayonnement global à l'intérieur du couvert doit donc être pris en compte pour le calcul de l'assimilation nette A_{nc} et de la résistance stomatique r_s du couvert. Le transfert radiatif à l'intérieur du couvert est décrit par une loi de Beer intégrée en utilisant une méthode de quadrature de Gauss à 3 niveaux.

Le modèle A-g_s intégré permet d'estimer la résistance stomatique du couvert, qui dirige la transpiration. Cette résistance stomatique du couvert est ensuite utilisée dans le calcul des flux de vapeur d'eau et de chaleur par le même algorithme que celui qui est employé dans la version standard d'ISBA.

c- Croissance et mortalité :

Le cumul de l'assimilation nette du couvert A_{nc} (kgCO_2 m^{-2} s^{-1}) correspond à une formation de biomasse ΔB^+ (kg m^{-2}). Après chaque pas de temps Δt on a $\Delta B^+ = \frac{A_{nc}}{P_C} \times \frac{M_C}{M_{CO_2}} \times \Delta t$ où P_C est la proportion de carbone dans la matière végétale sèche (on prend 40%), et M_C et M_{CO2} sont les masses molaires du carbone et du CO_2 (12 et 44 g mol^{-1}, respectivement).

La biomasse active B peut décroître de deux manières : par mortalité (flétrissement dû au stress hydrique ou thermique, maladies, prélèvements effectués par les animaux herbivores) ou par transfert d'assimilats dans des organes de réserve (fruits, tubercules, tiges) où la biomasse se trouve en quelque sorte immobilisée. La biomasse B ne représente donc pas la biomasse totale, mais plutôt la biomasse à fort métabolisme qui réalise la photosynthèse, essentiellement dans les feuilles. En première approximation, on peut supposer que pour un couvert végétal et un climat donnés, il existe un rapport constant α (sorte de biomasse active unitaire) entre la biomasse active B et le LAI. Par commodité, nous appellerons mortalité toute variation négative journalière de B. La mortalité ΔB^- est calculée dans le modèle au bout d'une période τ_0 = 1 jour selon une loi

exponentielle $\Delta B^{-} = B \times \left(1 - e^{-\frac{\tau_0}{\tau_M}\frac{A_{n,\max}}{A_{nfm}}}\right)$ où τ_M est la durée (en jour) après laquelle il ne resterait plus que 37% (e-folding) de la biomasse active initiale *B* dans le cas où l'ensemble des feuilles du couvert pourraient effectuer une assimilation nette maximale $A_{n,max}$ une fois par jour au moins. Le paramètre τ_M représente une espérance de vie maximale. La valeur maximale de l'assimilation nette foliaire moyenne du couvert (A_{nfm}) telle qu'elle est simulée au cours d'une journée intervient pour estimer la mortalité affectant le couvert végétal au cours de cette même journée.

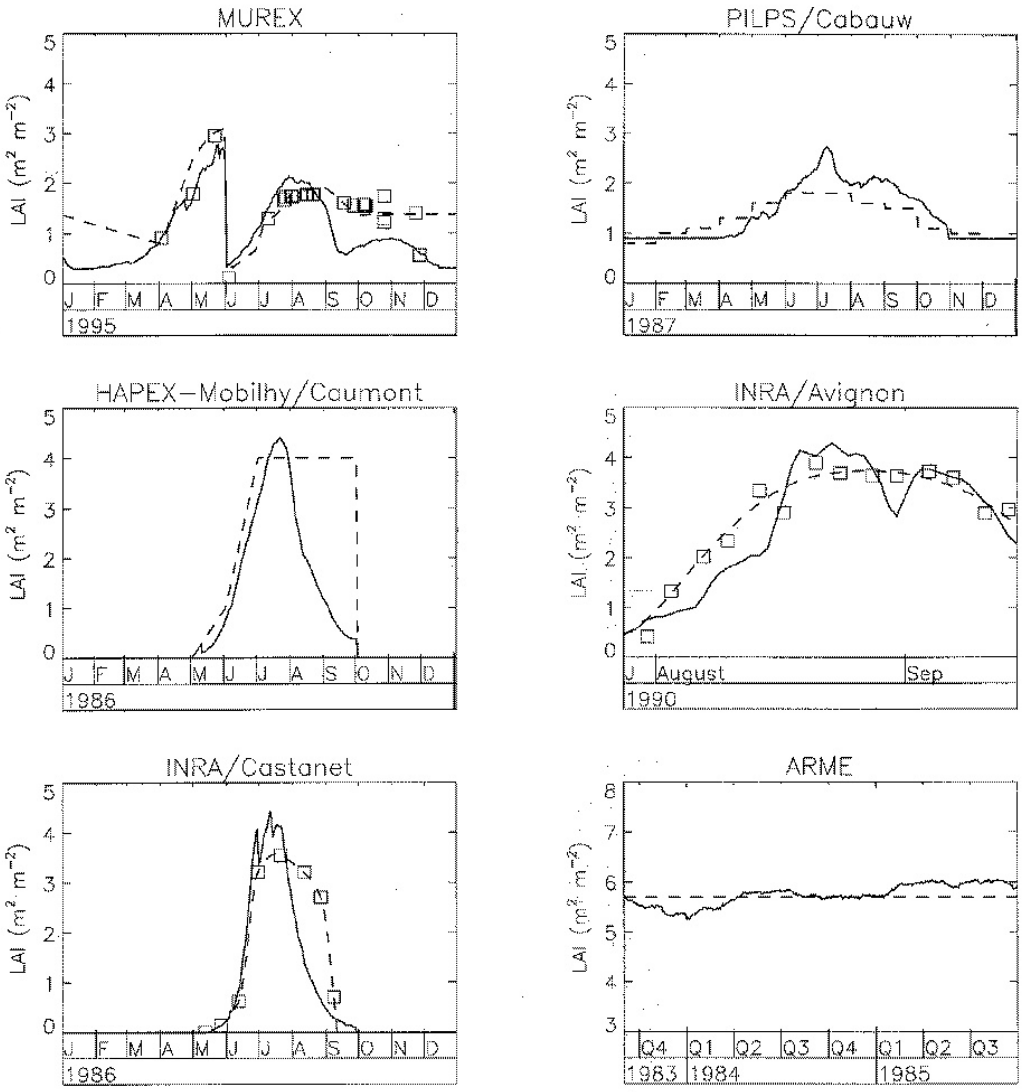

Fig. 12- Indice foliaire observé (carrés), prescrit dans la version standard d'ISBA (tiretés), et calculé par ISBA-A-gs (trait continu), sur les six sites étudiés par Calvet et al. (1998) : jachère fauchée au printemps (MUREX 1995), prairie (Cabauw), culture de soja (Caumont et Avignon), maïs (Castanet), et forêt amazonienne (ARME).

d- Calage du modèle :

Le modèle A-g_s étendu à l'échelle du couvert doit être étalonné à partir de mesures in situ de façon à éprouver sa capacité à simuler les flux et l'indice foliaire. Ce nouveau schéma, nommé ISBA-A-gs, a été testé sur six jeux de données, dont MUREX (Fig. 12), pour lesquels il donne d'excellents résultats (Calvet et al. 1998). Dans le cadre de cette étude, j'ai pu rassembler des jeux de données provenant de l'INRA (Avignon et Castanet), sur divers types de cultures, qui ont été extrêmement utiles pour compléter ceux dont nous disposions déjà.

5.2. Description des effets du stress hydrique

L'une des causes de la variabilité des résultats des modèles TSVA est sans nul doute la formulation de l'ouverture stomatique en fonction de l'humidité de l'air et de la réserve en eau du sol. C'est un aspect très important des modèles TSVA, qui n'a pas été suffisamment étudié dans le passé par manque de données expérimentales et à cause de résultats apparemment contradictoires entre différentes études. De plus, les études passées ont le plus souvent été réalisées à l'échelle de la feuille par des physiologistes. Un jeu de données comme celui de MUREX est l'occasion de revisiter la formulation des stress hydriques, à l'échelle du couvert. Ce travail a été entrepris par Calvet (2000) à partir de formulations traditionnelles de la conductance stomatique, de type Jarvis, et de la description de l'évolution des paramètres de la photosynthèse du modèle A-gs. L'analyse de plusieurs jeux de données, à l'échelle de la feuille ou du couvert (dont MUREX) montre que selon toute probabilité, il existe une interaction entre l'effet de l'humidité de l'air et celui de l'état hydrique de la zone racinaire. De plus, au moins deux stratégies de réponse à l'un et l'autre des facteurs peuvent être adoptées selon le type de plante considéré. La Fig. 13 détaille la méthode qui a été utilisée dans Calvet (2000) pour réaliser une méta-analyse d'un grand nombre de jeux de données, qui a permis d'établir des corrélations entre paramètres de la photosynthèse, et des règles empiriques d'évolution de ces paramètres en fonction du stock d'eau dans la zone racinaire (Figs. 14 et 15).

Une façon de paramétrer l'effet du stress hydrique est de faire varier plusieurs paramètres de la photosynthèse en fonction de l'état de la réserve en eau du sol, et pas seulement la conductance mésophyllienne g_m comme indiqué dans la Fig. 11 à titre d'exemple. Pour les plantes herbacées, Calvet (2000) montre que g_m doit être modifié en même temps que D_{max}, qui représente la limite supérieure du déficit de saturation entre la feuille et l'air (Fig. 14).

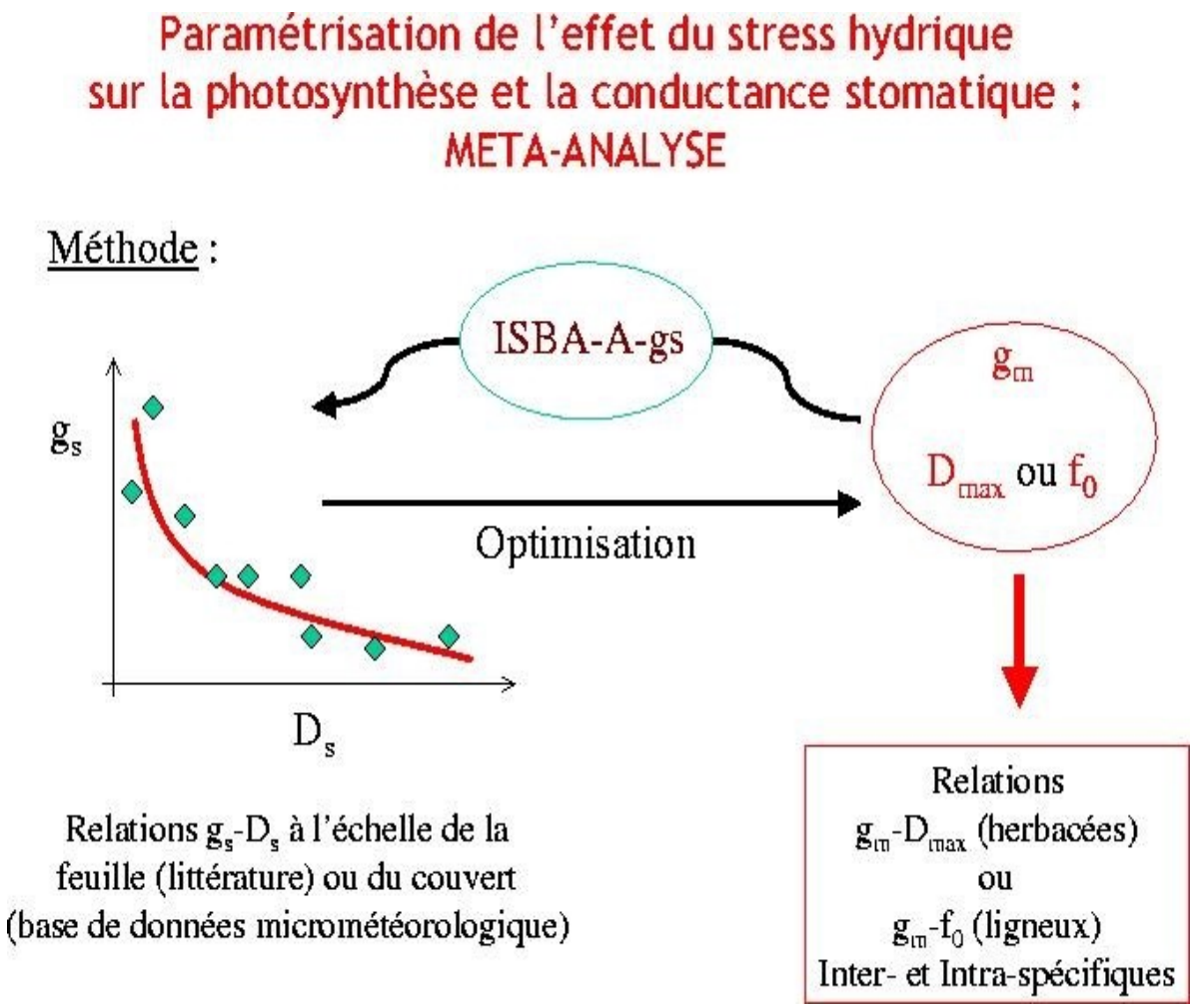

Fig. 13- Méthode employée pour paramétrer le module A-gs du modèle ISBA-A-gs servant à estimer la conductance foliaire (Calvet 2000) : une méta-analyse de la littérature permet de construire une base de données décrivant la réponse de la conductance foliaire (g_s) au déficit de saturation entre la feuille et l'air (D_s), pour un grand nombre d'espèces. L'inversion du modèle permet d'obtenir pour chaque espèce les paramètres de la photosynthèse qui lui sont associés (g_m, D_{max} et f_0). Enfin, la corrélation de ces paramètres entre eux est analysée.

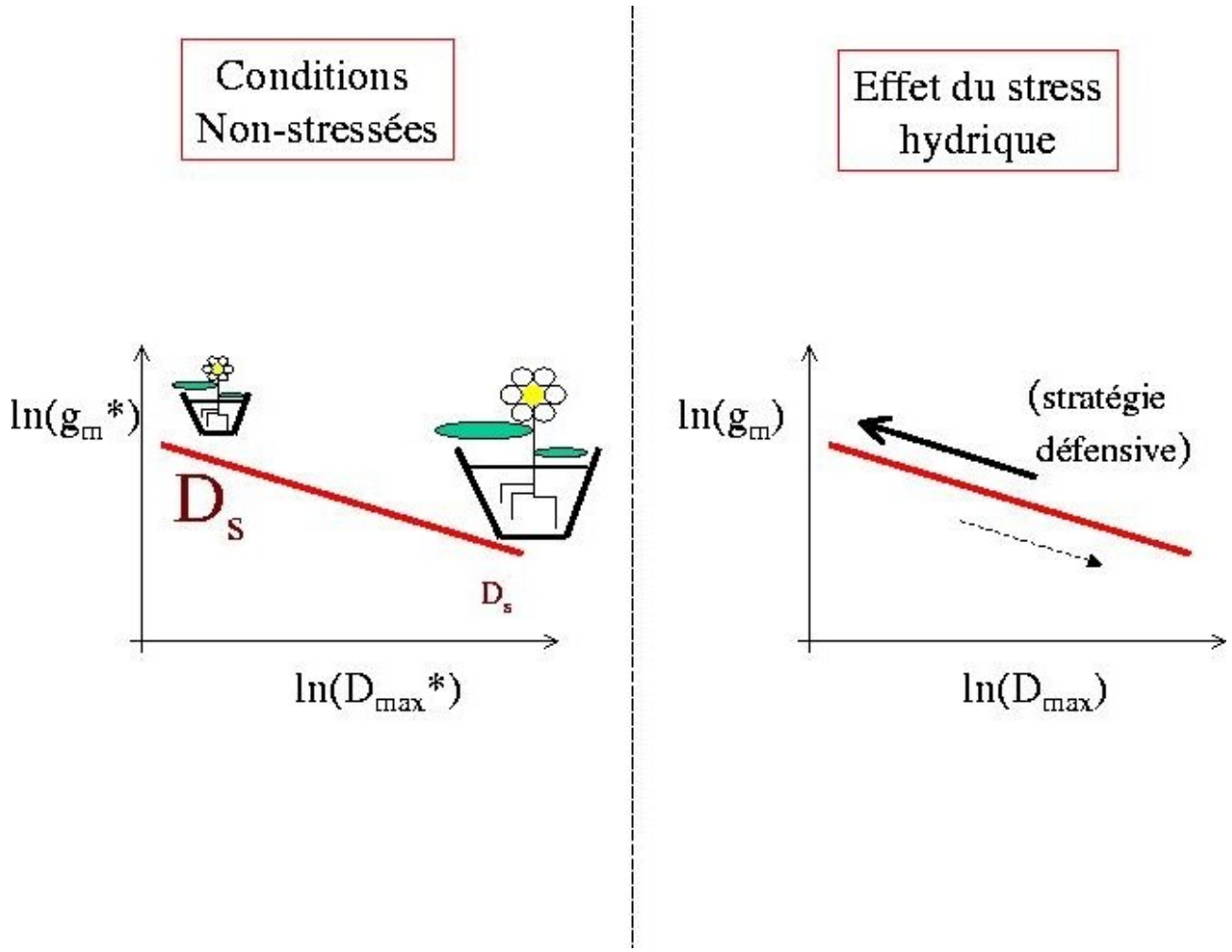

Fig. 14- Relation entre les paramètres g_m et D_{max} pour les plantes herbacées, en conditions de bonne alimentation en eau (*) et en condition de faible stress hydrique (à droite). En conditions non-stressées, les plantes les plus sensibles à l'humidité de l'air correspondent à des paramètres les situant à gauche de la relation (faibles valeurs de D_{max}*) et une même plante peut se trouver à divers endroits sur la courbe selon les conditions d'enracinement (les plantes cultivées dans un volume de sol restreint –« effet pot »- présentent une réponse plus marquée à l'humidité de l'air et se trouvent sur la partie la plus à gauche de la courbe). En condition de stress hydrique modéré, les paramètres g_m et D_{max} d'une plante donnée évoluent selon la même relation logarithmique. On distingue 2 types de stratégie de réponse au stress : (1) dans la stratégie défensive, les paramètres g_m et D_{max} évoluent dans le sens d'une plus grande sensibilité des stomates à l'humidité de l'air, comme dans le cas de « l'effet pot », (2) dans la stratégie offensive, c'est l'effet inverse qui est observé.

Ces différentes réponses de la photosynthèse (et donc de la conductance foliaire) au stress ont été paramétrées dans ISBA-A-gs pour une application sur MUREX et, dans le cadre du travail de thèse de Sophie Voirin-Morel, des simulations hydrologiques sur le bassin de l'Adour. Dans ce dernier cas, la simulation du *LAI* par ISBA-A-gs est améliorée, ainsi que la simulation des débits des rivières par le système ISBA-MODCOU. Enfin des études ont été menées dans le cadre du travail de thèse de Vincent Rivalland pour étendre cette paramétrisation au cas des plantes ligneuses. Dans le cas des ligneux, il semble que les paramètres de la photosynthèse évoluant selon le stress hydrique sont g_m et f_0 (Fig. 15). Le paramètre f_0 représente la valeur asymptotique maximale du rapport entre la concentration en CO_2 à l'intérieur et à l'extérieur de la feuille.

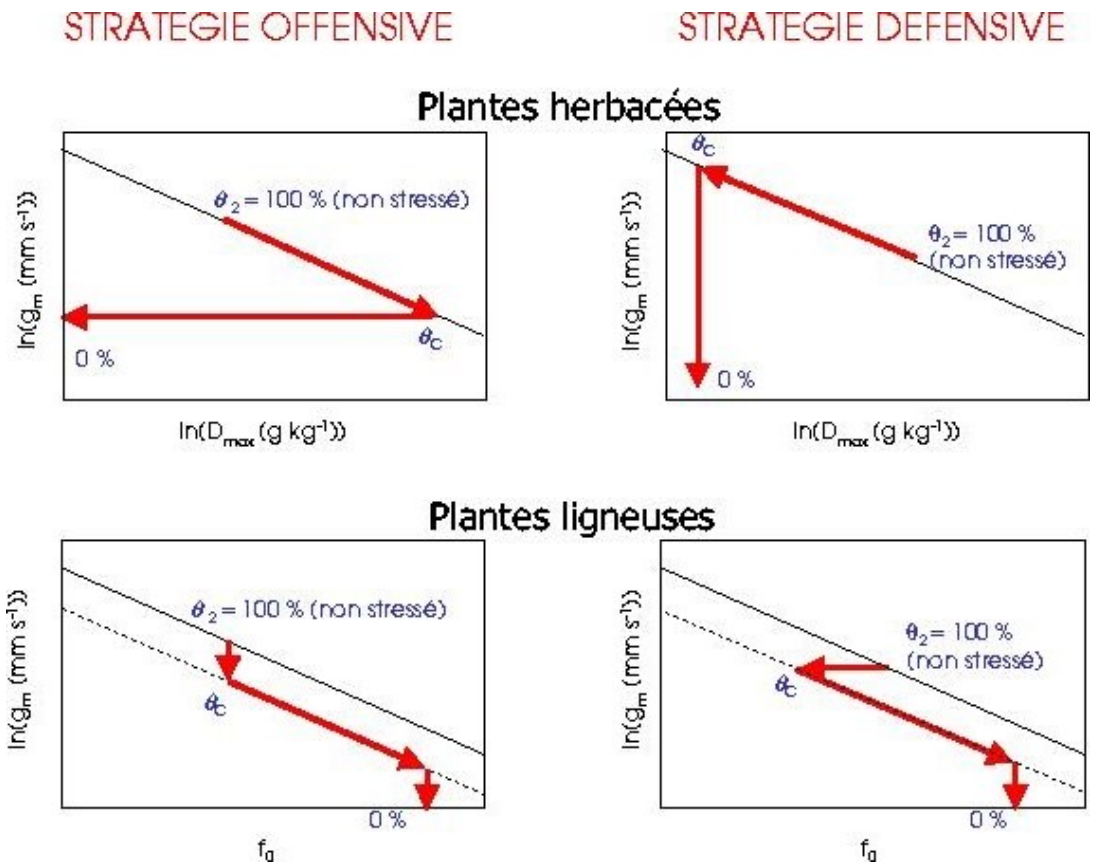

Fig. 15- Représentation schématique des deux stratégies de réponse au stress hydrique pour (en haut) les plantes herbacées et (en bas) les plantes ligneuses. La stratégie offensive (à gauche) correspond à une diminution de l'efficacité d'utilisation de l'eau lors des premières étapes du stress, alors que la stratégie défensive (à droite) demande l'accroissement de l'efficacité d'utilisation de l'eau. La stratégie offensive correspond à des plantes qui tolèrent la sécheresse grâce à un système racinaire suffisamment bien développé pour exploiter au mieux la réserve en eau du sol, alors que la stratégie défensive correspond à une résistance à la sécheresse liée à un « effort métabolique » de la plante lui permettant améliorer les performances de la photosynthèse, ce qui peut permettre de pallier la faiblesse du système racinaire, la mauvaise qualité du sol, ou une faible pluviométrie. Les paramètres de la photosynthèse affectés par la fonction stress θ_2 sont, la conductance mésophyllienne g_m, la valeur maximale du déficit de saturation de l'air D_{max} (pour les herbacées), et la valeur optimale du rapport c_i/c_s, f_o (pour les ligneux). Les droites figurant dans chaque diagramme ont été établies à partir d'une méta-analyse des données de la littérature et sont des relations interspécifiques universelles (Calvet 2000).

5.3. *Description des effets d'un changement climatique : la version « azote »*

L'effet du climat sur la végétation doit être décrit pour accroître le réalisme des simulations climatiques. Une nouvelle version du modèle ISBA-A-gs a été développée afin de mieux prendre en compte l'ensemble des facteurs limitants de l'environnement, en particulier la concentration atmosphérique en CO_2 et la disponibilité en azote, sur la croissance des végétaux (Calvet et Soussana 2001). Pour conserver l'approche de type fonctionnel adoptée dans ISBA et ISBA-A-gs, une paramétrisation simplifiée a été mise au point. Son développement s'est appuyé sur un jeu de données extrèmement riche (Casella et Soussana 1997) fourni par l'INRA de Clermont-Ferrand. Il s'agit d'une expérience d'enrichissement en azote et en CO_2 réalisée sous un tunnel plastique (Fig. 16). Ce type de protocole expérimental est en théorie moins efficace que les expériences de type FACE pour tester et valider les modèles. En effet, la serre modifie considérablement les échanges turbulents et le rayonnement thermique incident. Les dispositifs de type FACE (Fig. 16) permettent d'échapper à ces contraintes car le CO_2 est émis dans l'atmosphère libre autour de la parcelle étudiée.

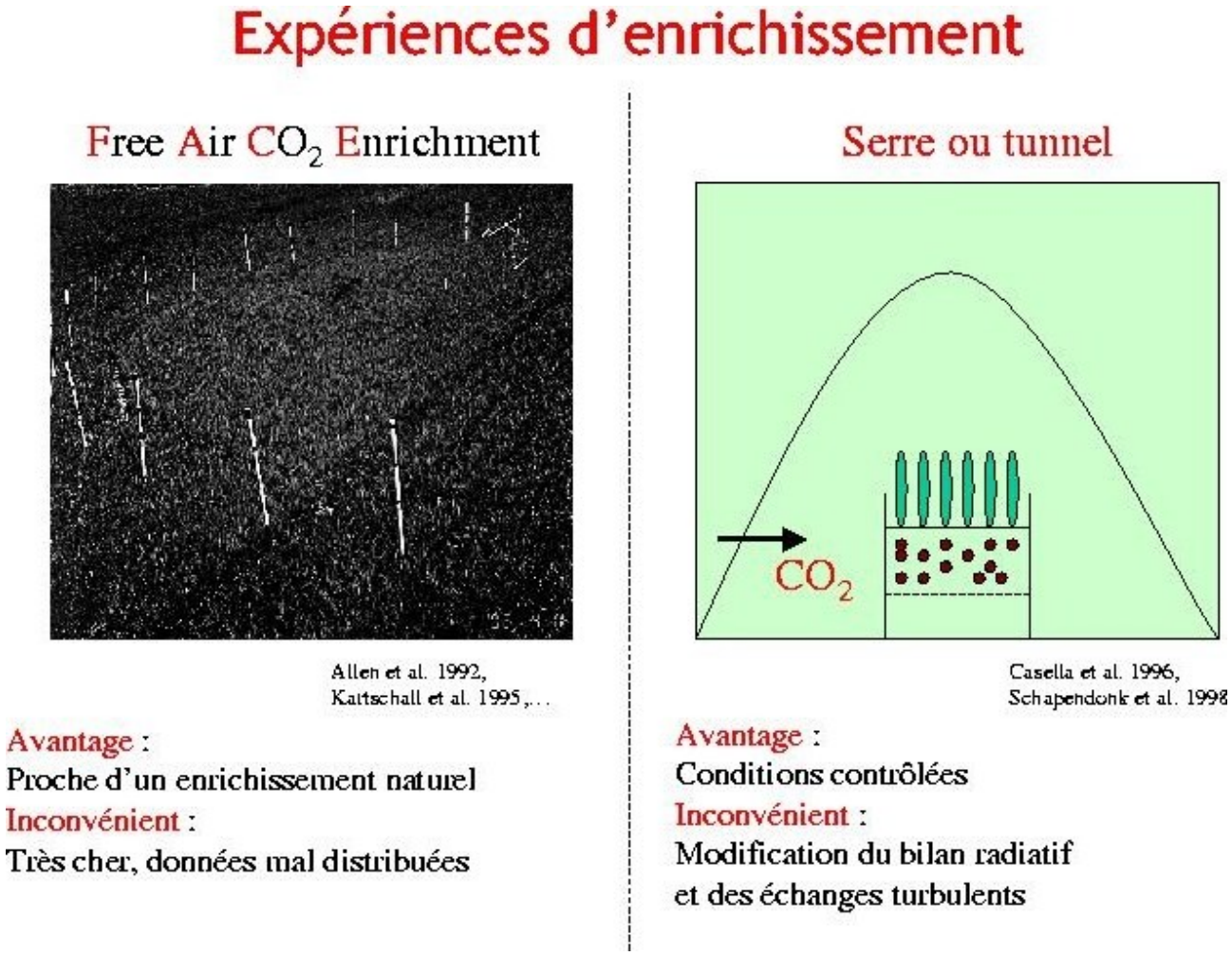

Fig. 16- Comparaison de 2 méthodes expérimentales d'enrichissement en CO_2 de l'air : méthode FACE et méthode serre ou tunnel.

Essentiellement développés aux USA, les expériences FACE ont pour inconvénient d'être extrêmement onéreuses. Une autre difficulté est la dispersion des données parmi les différents laboratoires qui ont participé à ces expériences. Bref, encore à l'heure actuelle, il est difficile d'accéder à des bases de données FACE ayant la richesse des données recueillies de manière plus modeste, sous serre ou tunnel, par un seul laboratoire. De plus, Calvet et Soussana (2001) ont montré que les inconvénients liés à l'utilisation d'une serre peuvent être contournés : les propriétés thermiques du plastique utilisé peuvent être introduites dans le modèle, qui calcule le rayonnement thermique incident à partir de la température de surface et du rayonnement atmosphérique ; enfin les échanges turbulents sont calculés de manière classique, mais une valeur constante de la vitesse du vent est prescrite.

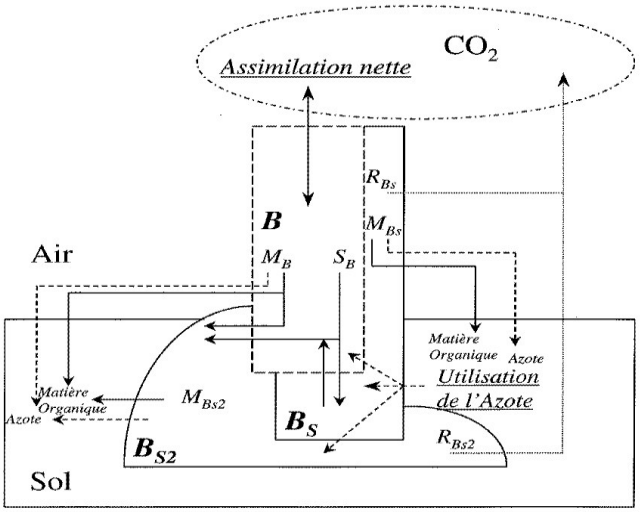

Fig. 17- Représentation schématique du sous-modèle d'allocation de ISBA-A-gs. Les flux d'azote et de carbone sont représentés par les traits tireté et continu, respectivement. Les trois compartiments de biomasse (active, structure, et stockage) sont désignés par les symboles B, B_s, et B_{s2}, respectivement. Les termes de stockage et de mortalité sont désignés par S et M, respectivement. La respiration de maintenance (R) est représentée par les pointillés. Les termes de mortalité peuvent alimenter un modèle de production de bois et de décomposition de la matière organique dans le sol.

Tout en conservant la simplicité de l'approche ISBA et un nombre de paramètres réduit, le nouveau modèle permet de simuler de manière réaliste la réponse de la biomasse (Fig. 17) et de la surface foliaire d'un couvert végétal à un changement climatique, quel qu'il soit (augmentation de température, de concentration en CO_2, etc.). Il s'appuie sur une représentation simplifiée de la dilution de l'azote et de l'interaction entre biomasse aérienne et rapport biomasse active sur *LAI* (paramètre α_B de la Fig. 11), illustrées par la Fig. 18. Il a été validé sur les données de la station INRA d'Agronomie de Clermont-Ferrand portant sur une culture en serre d'un gazon (ray-grass) en 1993 et 1994. Dans ce jeu de données, l'effet sur de nombreuses caractéristiques du couvert

de divers traitements d'alimentation azotée et de conditions atmosphériques (y compris la concentration en CO_2) est décrit. Ces mesures ont permis de vérifier les bonnes performances du modèle. L'enrichissement en CO_2 atmosphérique sur la biomasse totale du ray-grass a un effet comparable à l'enrichissement en azote, conformément aux observations. L'utilisation du modèle pour un type de plante donné requiert la connaissance de deux paramètres définissant la « plasticité phénotypique » de la plante, c'est à dire l'ampleur de sa réponse à l'enrichissement en nutriments ou en CO_2, en terme de rapport entre indice foliaire et masse foliaire (Specific leaf area ou *SLA*). Ces deux paramètres, nommés *e* et *f* dans Calvet et Soussana (2001) correspondent, respectivement, à la sensibilité du *SLA* à la concentration en azote dans la plante, et à la valeur minimale (létale) du *SLA* (Figs. 18 et 19). Cette dernière valeur (*f*) peut être nulle ou négative comme cela est observé dans le cas du ray-grass. Cela signifie que la plante se développe très lentement dans des milieux pauvres en azote et (par conséquence) répond de manière très marquée à un enrichissement en azote. Inversement, l'indice foliaire de ce type de plantes présente une réponse nulle, voire négative, à un enrichissement en CO_2.

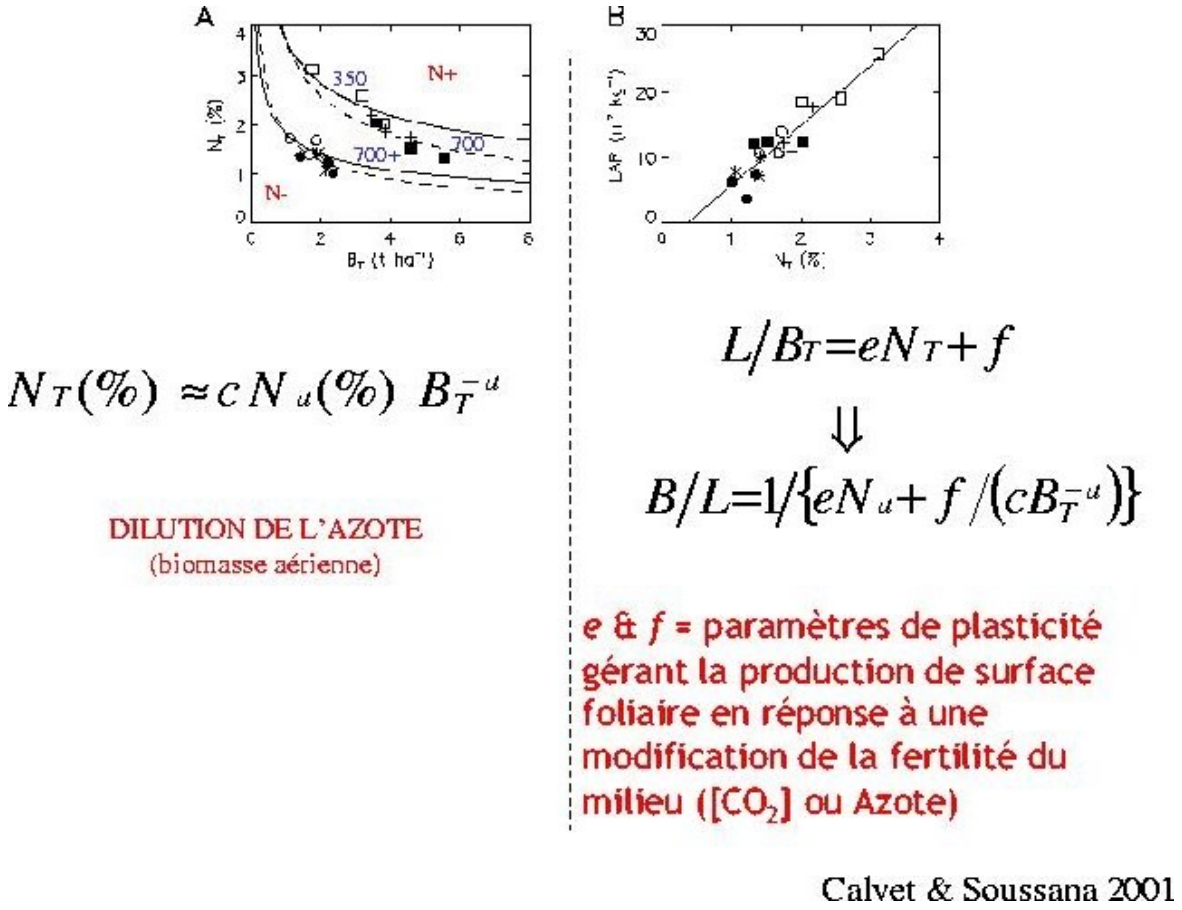

Fig. 18- Paramétrisations implantées dans ISBA-A-gs pour décrire la dilution de l'azote et la réponse interspécifique à l'enrichissement (en azote ou au CO_2).

Calvet et Soussana (2001) ont montré que l'ensemble de ces effets peuvent être représentés de façon simple en écrivant le paramètre α_B, qui représente le rapport entre la biomasse active (*B*) et l'indice foliaire (*LAI*) en fin de croissance, en fonction de la concentration en azote de la biomasse active (N_a) et de la biomasse aérienne totale (B_T) par l'équation $B/LAI = 1/\{eN_a + f/(cB_T^{-a})\}$, où *a* et *c* sont des constantes (Fig. 18). Les paramètres *e* et *f*, dont l'estimation pour plusieurs espèces végétales est présentée dans la Fig. 19, permettent de prédire le comportement d'une plante donnée à un changement climatique ou à un enrichissement en azote. Une expérience d'enrichissement réalisée en 2001 en collaboration avec le CESBIO par Vincent Rivalland sur la jachère du site SMOS-PIRRENE (chapitre 4.2) montre que cette méthode peut être appliquée à une prairie multi-spécifique, à une population d'espèces différentes donc.

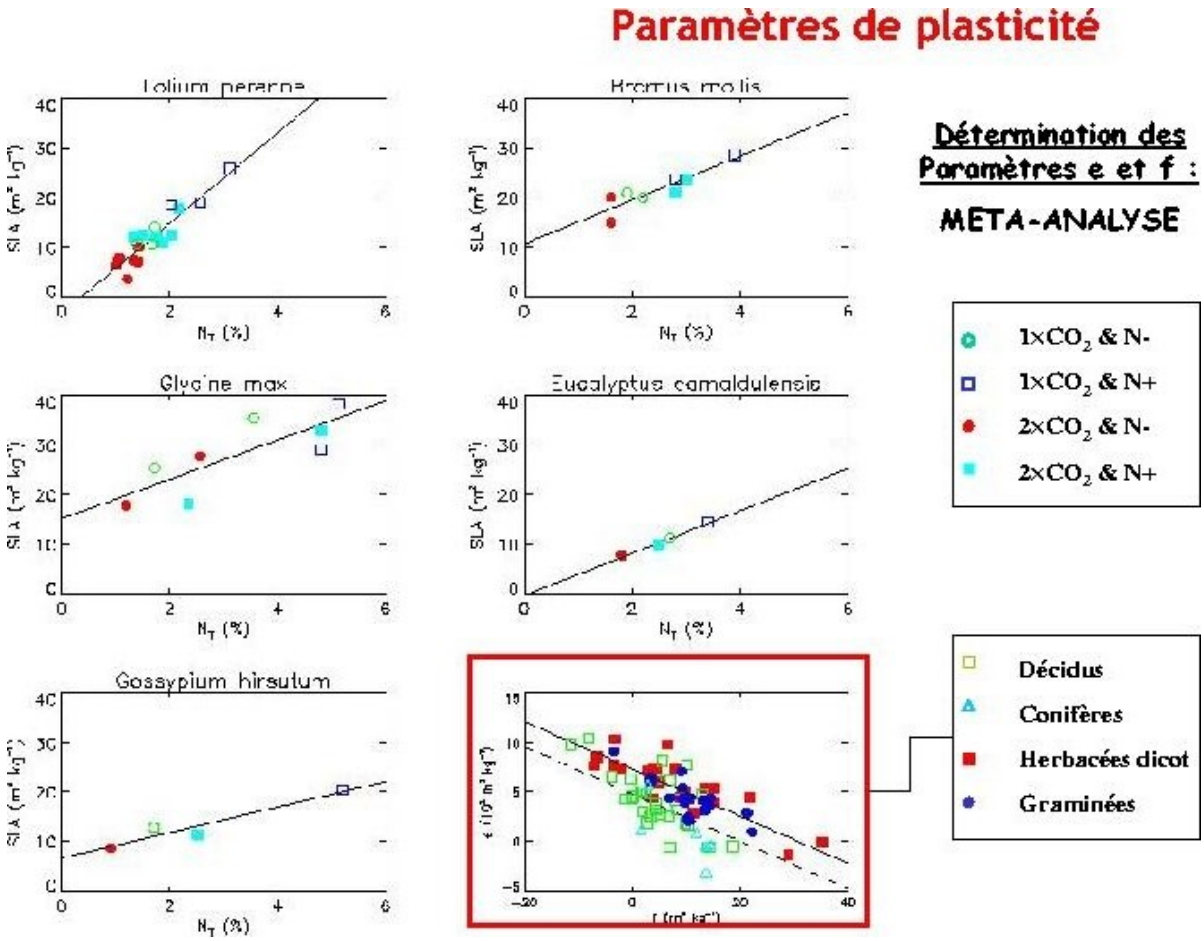

Fig. 19- Relation observée entre le SLA (Specific Leaf Area ou rapport entre la surface des feuilles et leur masse) et la teneur en azote des feuilles, pour un enrichissement en azote et/ou en CO_2. La relation présentée dans la Fig. 18 pour le Ray-grass (Lolium perenne) est reproduite ici et comparée aux relations obtenues pour d'autres espèces, herbacées ou ligneuses. Les droites obtenues sont caractérisées par leur ordonnée à l'origine (f) et leur pente (e). Ces paramètres sont des paramètres de plasticité qui caractérisent la réponse de la plante à un enrichissement en azote et/ou en CO_2. Le graphique encadré montre les relations (trait continu pour les plantes herbacées et trait tireté pour les ligneux) qui existent entre les paramètres e et f.

5.4. Conclusion

La nouvelle version d'ISBA que j'ai proposée, en collaboration avec l'INRA, permet de calculer les flux de CO_2 en surface et de diagnostiquer le *LAI* de manière simple. Deux versions améliorées ont en outre été mises au point. La première permet de distinguer deux types de comportement décrivant la réponse physiologique de la plante au stress hydrique : stratégie offensive et défensive. La seconde autorise l'utilisation du modèle dans les études d'impacts climatiques et traite de manière simplifiée la répartition de l'azote dans la biomasse. L'objectif de ce modèle est de mieux représenter la végétation (actuelle) dans les modèles et, à terme, de mieux simuler l'impact d'un changement climatique. Les applications potentielles de ce type de schéma sont nombreuses : études de sensibilité de la végétation (et donc du bilan hydrique de la surface) à des variations de la concentration atmosphérique en CO_2 ; végétation s'adaptant automatiquement à des conditions météorologiques différentes (température, précipitations,...) dans des modèles hydrologiques ou climatiques ; analyse des mesures de flux de CO_2 dans les expériences micro-météorologiques, etc.

Ce type de modélisation simplifiée est « statique », c'est à dire que l'on simule un couvert végétal à l'équilibre. L'avantage de cette approche par rapport à d'autres modèles est le nombre très réduit de paramètres physiologiques de la végétation qu'il faut prescrire (3 dans la version de base et 5 dans la version « changement climatique ») et la rapidité des calculs. Pour ce qui est des études d'impact climatiques, ISBA-A-gs est susceptible de prévoir la plupart des tendances fortes du fonctionnement de la végétation liées à un changement climatique rapide, comme l'ont montré Calvet et Soussana (2001).

6. Discussion

6.1. Cheminement scientifique

J'ai essayé de montrer dans ce mémoire de recherche que la dichotomie apparente de mon travail (radiométrie micro-ondes et végétation interactive) n'est pas en contradiction avec un cheminement scientifique cohérent. En effet, et c'est un aspect qui est rarement mis en exergue par les communautés relativement distinctes qui traitent de l'hydrologie et de l'écophysiologie, une bonne représentation de la dynamique du contenu en eau du sol est un préalable à la compréhension du fonctionnement de la végétation. A l'inverse, la modélisation d'une végétation interactive est un atout dans la représentation de la dynamique de l'état hydrique du sol.

Cette interaction entre les 2 projets n'est pas que théorique. La Fig. 20 dépeint les relations entre les projets SMOS et ISBA-A-gs, et la manière dont elles sont intégrées dans une stratégie de recherche. Un exemple précis de l'utilisation de ISBA-A-gs dans les études menées sur SMOS est présenté par la Fig. 21 : les températures de brillance en bande L peuvent être assimilées par ISBA-A-gs pour obtenir la valeur du paramètre biomasse active sur LAI, qui est susceptible de varier, pour une même espèce végétale, en fonction des conditions de croissance (climat et apport en nutriments).

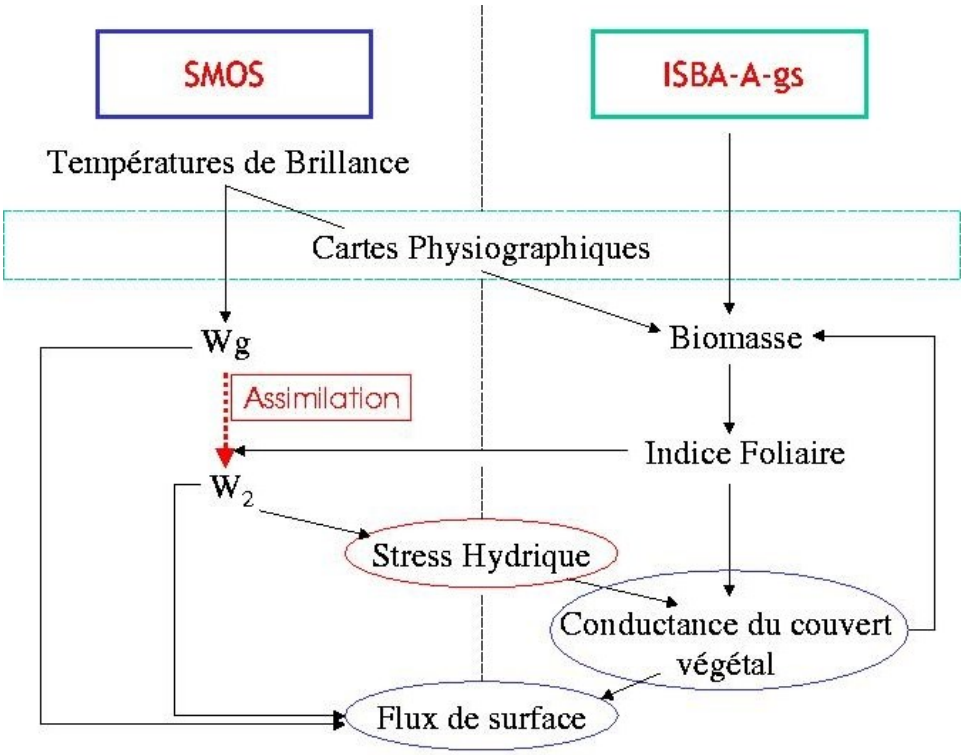

Fig. 20- Articulation entre les projets « SMOS » et « ISBA-A-gs ». La végétation interactive décrite par ISBA-A-gs permet d'envisager l'assimilation de températures de brillance pour estimer la disponibilité en nutriments du milieu (voir la Fig. 8 et chapitre 5.3). L'amélioration de la représentation des effets du stress hydrique (chapitre 5.2) est susceptible de mieux valoriser la connaissance de l'état hydique du sol obtenue par télédétection.

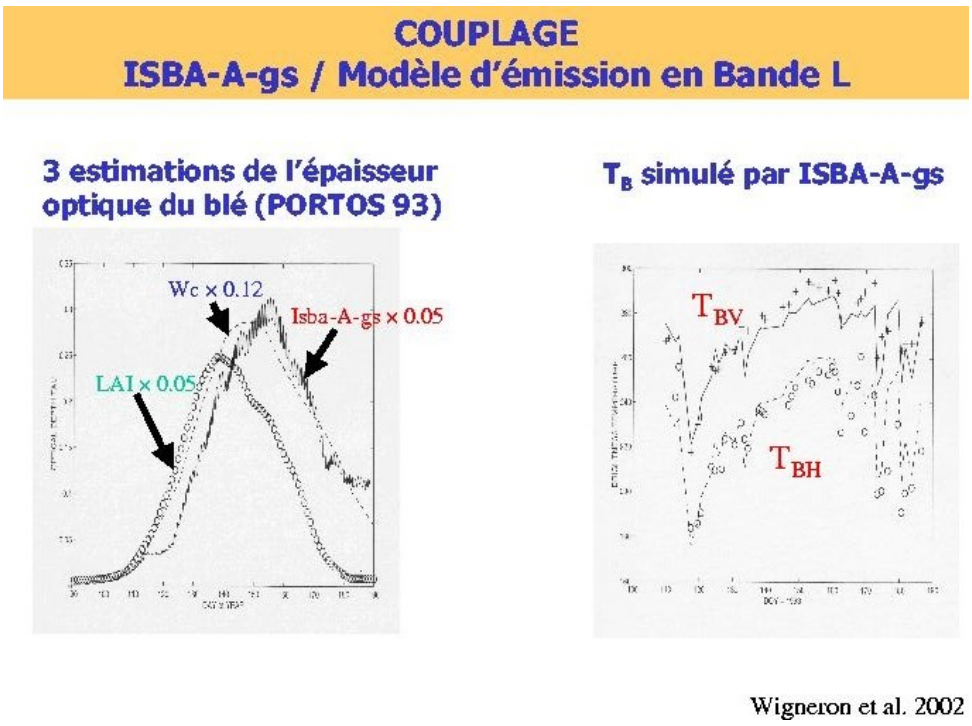

Fig. 21- Exemple d'application sur un couvert de blé d'une version du modèle ISBA-A-gs couplée avec un modèle simple, type τ-ω, d'émission en bande L. La minimisation de la différence entre températures de brillance observées et simulées permet d'obtenir une valeur optimale du rapport biomasse sur LAI. L'épaisseur optique micro-ondes obtenues avec ISBA-A-gs est similaire à celle dérivée des mesures de contenu en eau de la végétation, mais s'écarte de celle provenant des mesures de LAI. En effet, sur un couvert de blé, l'indice foliaire sensu stricto n'est pas représentatif de la biomasse active (les épis concentrent une partie significative de l'eau et de l'azote de la plante)

6.2. Limites de la méthode de méta-analyse

La méta-analyse d'une population d'études existantes est un exercice long et fastidieux mais qui permet de construire une description fonctionnelle des processus. Cette méthode présente au moins 2 écueils qu'il convient d'éviter :

- Les études individuelles qui sont examinées utilisent souvent des méthodes et des protocoles expérimentaux différents ;
- La qualité de l'échantillonnage est hasardeuse car elle dépend de la bonne répartition des objets étudiés dans une population d'études rassemblée au hasard des recherches bibliographiques.

Dans les méta-analyses réalisées ici sur le stress hydrique et les paramètres de plasticité (chapitres 5.2 et 5.3), ces 2 problèmes ont pu être dans une grande mesure évités. Seuls les articles présentant de manière claire l'environnement des mesures (température foliaire et rayonnement photosynthétiquement actif incident) des relations g_s-D_s ont été utilisés. Dans le cas des mesures de biomasse foliaire et de teneur en azote, les protocoles de mesure sont

relativement uniformes. Enfin, un nombre important d'études ont été collectées (Tableau 4) et on vérifie que toute la gamme possible des valeurs des paramètres recherchés est couverte.

Tableau 4

Taille des populations d'études examinées dans les méta-analyses portant sur les relations g_s-D_s (calage des paramètres de photosynthèse et représentation du stress dans ISBA-A-gs) et les paramètres de plasticité (paramétrisation de la version azote de ISBA-A-gs), pour les plantes herbacées et ligneuses.

Méta-Analyse	Plantes herbacées	Plantes ligneuses	Total
g_s-D_s	44	32	76
Plasticité (e et f)	42	37	79

6.3. Limites de l'approche fonctionnelle

Les paramètres fonctionnels comme, dans ISBA la fraction de végétation *veg*, dans ISBA-A-gs la conductance mésophyllienne g_m, dans un modèle simple d'émission micro-ondes le rapport entre l'épaisseur optique de la végétation et son contenu en eau, peuvent recouvrir une réalité différente d'un type de surface à un autre. C'est à la fois la force et la faiblesse de ce type d'approche : le nombre de paramètres est faible, et chaque paramètre est relativement indépendant de la structure de l'objet étudié. En d'autres termes, l'approche fonctionnelle résume les phénomènes plus qu'elle ne les explique. Dans certains cas, cela peut avoir des conséquences sur la qualité des simulations. Comme le montre l'étude d'intercomparaison réalisée dans le cadre de MUREX (Tableau 3), la modélisation explicite de la couche de litière par SiSPAT-mulch améliore considérablement la simulation du flux de chaleur dans le sol *G*. Dans ISBA, la litière est représentée symboliquement par une valeur élevée du paramètre *veg*, qui permet de limiter la contribution du sol à l'évaporation. Cela ne suffit pas à bien simuler *G* mais permet de décrire correctement les autres termes du bilan d'énergie.

7. Conclusions et perspectives

Mes travaux de recherche effectués de 1996 à 2001 sont résumés dans ce mémoire. Ils ont abouti à un modèle générique de végétation interactive, ISBA-A-gs, et à la démonstration que la radiométrie micro-ondes en bande L permet l'analyse du contenu en eau du sol dans la zone racinaire. Ce dernier aspect de mon travail a été déterminant pour justifier le projet de mission spatiale SMOS (CNES et ESA).

Le modèle ISBA-A-gs présenté ici est un outil efficace pour l'analyse de la réponse de la végétation à des modifications climatiques. Le faible nombre de paramètres nécessaires pour adapter le modèle à des situations contrastées le rend particulièrement adapté à une utilisation en hydrométéorologie. Actuellement, ce schéma est inclus dans le modèle atmosphérique de méso-échelle MESO-NH et dans le modèle hydrologique ISBA-MODCOU. Les progrès réalisés par rapport à la version standard sont importants :

- la résistance stomatique du couvert est simulée de manière plus réaliste car son lien fonctionnel avec la photosynthèse est pris en compte,
- l'effet de l'humidité de l'air sur la résistance stomatique est mieux géré car il intervient par l'intermédiaire de la photosynthèse, sans paramètre empirique supplémentaire,
- il est possible de décrire plusieurs stratégies de réponse de la plante au stress hydrique,
- il est désormais possible de faire réagir de manière interactive la végétation en fonction des conditions climatiques plutôt que d'imposer une variation constante d'indice foliaire d'année en année (ce qui peut entraîner des erreurs importantes dans la description du bilan hydrique et des processus de surface),
- les mesures de flux de CO_2 sont désormais un élément supplémentaire de validation du schéma lors d'expériences de terrain,
- ce schéma, qui reste relativement simple (condition nécessaire de son emploi en météorologie et en climatologie), permet de décrire des phénomènes complexes associés à une augmentation de la teneur atmosphérique en CO_2.

Pour ce qui est de la radiométrie micro-ondes, j'ai montré, à partir des données de l'expérience MUREX, que l'assimilation de températures de brillance en bande L en utilisant ISBA permet d'analyser le contenu en eau de la zone racinaire. Le modèle ISBA-A-gs couplé à un modèle d'émission micro-ondes est également à même d'utiliser des observations d'émission micro-ondes des couverts végétaux pour déterminer les paramètres de l'évolution de l'indice foliaire, la disponibilité en azote notamment.

Les progrès de la modélisation des processus de surface continentaux permettent une meilleure description de la réserve en eau du sol et de la croissance de la végétation. Ces progrès vont de pair avec le développement de données de télédétection se prêtant à l'assimilation dans les modèles de transfert entre le sol, la végétation, et l'atmosphère (TSVA). Les développements attendus en modélisation et assimilation de données sont les suivants :

- Modélisation : effet du stress hydrique sur la photosynthèse et l'évaporation ; paramétrisation des effets d'un changement climatique (par exemple d'un doublement de la concentration atmosphérique en CO_2) ; couplage et/ou intervalidation de modèles TSVA avec des modèles de culture.
- Assimilation de données : la perspective de pouvoir assimiler des températures de brillance en bande L issues d'un capteur spatial dans les modèles TSVA est tout à fait remarquable puisque, pour la première fois, il sera possible de cartographier les réserves en eau des sols globalement. L'apparition de modèles TSVA traitant une végétation interactive est également un fait marquant dans l'utilisation de données de télédétection car au lieu de reconstituer un indice foliaire en aveugle à partir de relations empiriques avec les radiances, il deviendra possible d'inclure les radiances issues de divers domaines de longueurs d'onde (visible, infra-rouge, micro-ondes) dans un processus d'assimilation beaucoup plus robuste (Cayrol et al. 2000).

Le projet SMOS, une fois mené à son terme, représentera une avancée significative de l'observation spatiale de la biosphère. A la suite des études menées par l'INRA dans le cadre du programme PORTOS du CNES, et par le CNRM dans le cadre de MUREX, la communauté scientifique française (CESBIO, CNRM, INRA, IPSL, LTHE, ONERA) est actuellement très impliquée dans les études de phase A du projet :

- Campagne de mesure SMOS-PIRRENE (CESBIO, CNRM, ONERA) financée par le Comité TAOB du CNES, le CESBIO, le CNRM, le PNTS, et la Région Midi-Pyrénées, afin de préciser les techniques d'assimilation des températures de brillance à employer.
- Projet de modélisation pour la simulation des températures de brillance à l'échelle globale et leur inversion (CNRM, INRA) financé par l'ESA.
- Dans le cadre du même projet, étude de l'effet de l'hétérogénéité spatiale sur la signification des températures de brillance sur un pixel de 40 x 40 km.
- Projet de campagne de mesure aéroportée en Espagne et dans le Sud-Ouest de la France (ESA).
- Utilisation d'un modèle mécaniste pour paramétrer le couplage entre humidité de surface et contenu en eau de la zone racinaire (LTHE, INRA, CESBIO, CNRM).

- Lien entre SMOS et le projet ELDAS d'assimilation de données sur les surfaces continentales, pour la météorologie (projet européen regroupant de nombreux services météorologiques européens dont Météo-France, le CEP, le KNMI, …).

Le raffinement des études d'impact climatiques et de la description des processus hydrologiques nécessite la description d'une végétation interactive. Le modèle ISBA-A-gs de Météo-France représente un compromis acceptable entre simplicité et exactitude : la simplicité du schéma est associée à un nombre très faible de paramètres pour un modèle permettant de décrire des phénomènes physiologiques très complexes. Les perspectives dans ce domaine avec ISBA-A-gs sont de :

- Continuer à tabuler les paramètres allométriques *e* et *f* dans le cas des plantes herbacées à partir de mesures et de modèles de culture (par exemple le modèle STICS de l'INRA) ;
- Etendre l'application du modèle au cas des ligneux ;
- Etendre le travail de méta-analyse à d'autres paramètres de ISBA-A-gs (relations entre paramètres de plasticité et conductance mésophyllienne, stratégie de réponse au stress, espérance de vie, en s'appuyant sur le travail d'écophysiologistes –par exemple Debain 1998-) ;
- Coupler le modèle de végétation avec un modèle générique de l'évolution du stock de carbone du sol;
- Tester l'assimilation de données satellitaires sur la France (le jeu de données acquises par le capteur VEGETATION 2000 est un bon candidat) pour la cartographie des paramètres de croissance de la végétation et explorer l'apport de diverses gammes de longueurs d'onde (en complétant le travail de Wigneron et al. 2001 qui a été réalisé dans le cas de la radiométrie micro-ondes).

Enfin, l'ensemble de ces travaux a pour vocation à servir le développement opérationnel de la prévision à échelle fine et de l'hydrologie à Météo-France.

Bibliographie

Boone, A., "Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA : Inclusion d'un réservoir hydrologique, du gel, et modélisation de la neige", Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, 2000

Calvet, J.-C., R. Santos-Alvalá, G. Jaubert, C. Delire, C.A. Nobre, I. Wright and J. Noilhan, "Mapping surface parameters for mesoscale modeling in forested and deforested south-western Amazonia", Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 78, No. 3, 1997.

Calvet, J.-C., J. Noilhan and P. Bessemoulin, "Retrieving the root-zone soil moisture from surface soil moisture or temperature estimates: a feasibility study based on field measurements", J. Appl. Meteor., Vol. 37, No. 4, pp. 371-386, 1998a.

Calvet, J.-C., J. Noilhan, J.-L. Roujean, P. Bessemoulin, M. Cabelguenne, A. Olioso and J.-P. Wigneron, "An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites", Agric. For. Meteorol., Vol. 92, pp. 73-95, 1998b.

Calvet, J.-C., P. Bessemoulin, J. Noilhan, and 19 coauthors, "MUREX: a land-surface field experiment to study the annual cycle of the energy and water budgets", Ann. Geophys., Vol. 17, pp. 838-854, 1999a.

Calvet, J.-C., "Investigating soil and atmospheric plant water stress using physiological and micrometeorological data sets", Agric. For. Meteorol., Vol. 103, No. 3, pp. 229-247, 2000.

Calvet, J.-C., and J. Noilhan, "From near-surface to root-zone soil moisture using year-round data", J. Hydromet., Vol. 1, No. 5, pp. 393-411, 2000.

Calvet, J.-C. and J.-F. Soussana, "Modelling CO_2-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme", Agric. For. Meteorol., Vol. 108, No. 2, pp. 129-152, 2001.

Casella, E. and J.-F. Soussana, "Long-term effects of CO_2 enrichment and temperature increase on the carbon balance of a temperate grass sward", J. Exp. Bot., Vol. 48, No. 311, pp. 1309-1321, 1997.

Cayrol, P. , A. Chehbouni, L. Kergoat, G. Dedieu, P. Mordelet and Y. Nouvellon, "Grassland modeling and monitoring with SPOT-4 VEGETATION instrumentduring the 1997¯1999 SALSA experiment", Agric. For. Meteorol., Vol. 105, pp. 91-115, 2000.

Deardorff, J.W., "Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation", J. Geophys. Res., Vol. 83, pp. 1889-1903, 1978.

Debain, S., "Structure et fonction des feuilles d'espèces caractéristiques de friches d'âges différents : Existe-t-il un compromis entre acquisition et conservation des ressources ?", Mémoire de DEA, CEFE, ENSAM, Université Montpellier II, 1998.

Delire, C., J.-C. Calvet, J. Noilhan, I. Wright, A. Manzi and C.A. Nobre, "Physical properties of Amazonian soils: A modeling study using the Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study data", J. Geophys. Res., vol. 102, No. D25, pp. 30119-30133, 1997.

Dolman, A.J., M.A. Silva Dias, J.-C. Calvet, M. Ashby, A.S. Tahara, C. Delire, P. Kabat, G.A. Fisch and C.A. Nobre, "Mesoscale effects of tropical deforestation in Amazonia: preparatory LBA modelling studies", Ann. Geophys., Vol. 17, pp. 1095-1110, 1999.

Douville, H., S. Planton, J.-F. Royer, D.B. Stephenson, S. Tyteca, L. Kergoat, S. Lafont, and R.A. Betts, "Importance of vegetation feedbacks in doubled-CO_2 climate experiments", J. Geophys. Res., Vol. 105, No. D11, pp. 14841-14861, 2000.

Fisch, G., "Camada limite amazônica: Aspectos observacionais e de modelagem (Amazonian boundary layer: observations and modelling)", Thèse de doctorat, Instituto Nacional de pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brésil, 170 pp, 1995.

Friends, A.D. and P.M. Cox, "Modelling the effects of atmospheric CO_2 on vegetation-atmosphere interactions", Agric. For. Meteorol., Vol. 73, No. 3-4, pp. 285-295, 1995.

Garnier

Gascon, C., G.B. Williamson, and G.A.B. da Fonseca, "Receding forest edges and vanishing reserves", Science, Vol. 288, pp. 1356-1358, 26 May 2000.

Gash, J., C. Nobre, J. Roberts and R. Victoria, "An overview of ABRACOS", in Amazonian Deforestation and Climate, Ed. J. Gash et al., pp.1-14, John Wiley, New York, 1996.

Giard, D., and E. Bazile, "Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model", Mon. Wea. Rev., Vol. 128, pp. 997-1015, 2000.

Gonzalez-Sosa, E.,. "Mesure et modélisation à long terme du bilan de masse et d'énergie d'une jachère du sud-ouest de la France. Influence et rôle d'une couche naturelle de résidus végétaux, ou mulch", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999.

Gonzalez-Sosa, E., I. Braud, J.-L. Thony, M. Vauclin, P. Bessemoulin, and J.-C. Calvet, "Modelling heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch", Agric. For. Meteorol., Vol. 97, pp. 151-169, 1999.

Gonzalez-Sosa, E., I. Braud, J.-L. Thony, M. Vauclin, and J.-C. Calvet, "Heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch layer: a modeling study using the three year MUREX data set", J. Hydrol., Vol. 244, pp. 119-136, 2001.

Goudriaan, J., H.H. van Laar, H. van Keulen, W. Lovwerse, "Photosynthesis, CO_2 and plant production". In: W. Dray & R.K. Atkins (Eds.), Wheat growth and modelling. NATO ASI Series, Series A, Vol. 86. Plenum Press, New York, 107-122, 1985.

Jacobs, C.M.J., "Direct impact of atmospheric CO_2 enrichment on regional transpiration", Ph.D. Thesis, Agricultural University, Wageningen, 1994

Kabat, P., A.J. Dolman, M. Ashby, J.C. Gash, I. Wright, A. Culf, J.-C. Calvet, C. Delire, J. Noilhan, A. Jochum, M.A. Silva Dias, G.A. Fisch, R.C. Santos-Alvalá, C.A. Nobre, S.D. Prince, and M. Steininger, "The large scale biosphere-atmosphere experiment in Amazonia (LBA): Use of integrated modelling for experimental design", SC-DLO report No. 145, Wageningen, 1997.

Kerr, Y., et al., "SMOS : Soil Moisture and Ocean Salinity (MIRAS on RAMSES). Proposal in answer to the call for Earth Explorer Opportunity Mission", ESA, 1998.

Laurance, W.F., P. Delamônica, S.G. Laurance, H.L. Vasconcelos and T.E. Lovejoy, "Rainforest fragmentation kills big trees", Nature, Vol. 404, p. 836, 20 April 2000.

Mahfouf, J.-F., "Analysis of soil moisture from near-surface parameters: a feasibility study". J. Appl. Meteor., Vol. 30, No. 11, pp. 1534-1547, 1991.

Masson, V., J.-L. Champeaux, F. Chauvin, C. Meriguet and R. Lacaze, "A global database of land surface parameters at 1 km resolution in meteorological and climate models", submitted, J. Climate, 2002.

Mordelet, P., C. Tosca, D. Vignes, L. Kergoat, and J.-C. Calvet, "Vegetation dynamics and the water and carbon dioxide fluxes", Ann. Geophys., EGS 23rd General Assembly, Nice, 20-24 avril 1998, Vol. 16, Suppl. 2, p. C525, 1998.

Noilhan, J. and S. Planton: "A simple parameterization of land surface processes for meteorological models", Mon. Wea. Rev., Vol. 117, pp. 536-549 , 1989.

Noilhan, J., and P. Lacarrère, "GCM gridscale evaporation from mesoscale modeling", J. Climate, Vol. 8, pp. 206-223 , 1995.

Tenhunena, J.D., R. Valentini, B. Köstnera, R. Zimmermann and A. Granier, "Variation in forest gas exchange at landscape to continental scales", Annales des Sciences Forestières, Vol. 55, No. 1-2, pp. 1-11, 1998.

Viterbo, P. and A.C.M. Beljaars, "An improved land surface parameterization in the ECMWF model and its validation", J. Climate, Vol. 8, pp. 2716-2748, 1995.

Wigneron, J.-P., J.-C. Calvet, A. Olioso, A. Chanzy, and P. Bertuzzi, "Estimating the root-zone soil moisture from the combined use of time series of surface soil moisture and SVAT modeling", Water Resource Research, Vol. 35, No. 12, pp. 3735-3745, 1999.

Wigneron, J.-P., A. Chanzy, J.-C. Calvet, A. Olioso, and Y. Kerr, "Modeling approaches to assimilating L-band passive microwave observations over land surfaces", J. Geophys. Res., soumis, 2002.

Liste des articles publiés dans des revues à comité de lecture

1. Forêt Amazonienne et déforestation :

Calvet, J.-C. and Y. Viswanadham, "Amazon forest radiation budget from satellite data", J. Appl. Meteor., Vol. 32, No. 5, 1993.

Calvet, J.-C., "A lagrangian model of the evapotranspiration of the Amazon forest from surface and stomatal resistance estimates", Remote Sensing Reviews, Vol. 10, pp. 193-216, 1994.

Calvet, J.-C., R. Santos-Alvalá, G. Jaubert, C. Delire, C.A. Nobre, I. Wright and J. Noilhan, "Mapping surface parameters for mesoscale modeling in forested and deforested south-western Amazonia", Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 78, No. 3, 1997.

Delire, C., J.-C. Calvet, J. Noilhan, I. Wright, A. Manzi and C.A. Nobre, "Physical properties of Amazonian soils: A modeling study using the Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study data", J. Geophys. Res., vol. 102, No. D25, pp. 30119-30133, 1997.

Dolman, A.J., M.A. Silva Dias, J.-C. Calvet, M. Ashby, A.S. Tahara, C. Delire, P. Kabat, G.A. Fisch and C.A. Nobre, "Mesoscale effects of tropical deforestation in Amazonia: preparatory LBA modelling studies", Ann. Geophys., Vol. 17, pp. 1095-1110, 1999.

2. Théorie de l'émission micro-ondes du sol et de la végétation, et problème inverse :

Wigneron, J.-P., J.-C. Calvet, Y.H. Kerr, "Microwave emission of vegetation: sensitivity to leaf characteristics", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 31, No. 3, pp. 716-726, 1993.

Calvet, J.-C., J.-P. Wigneron, E. Mougin, Y.H. Kerr and J.L.S. Brito, "Plant water content and temperature of the Amazon forest from satellite microwave radiometry", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 32, No. 2, pp. 397-408, 1994.

Noilhan, J. and J.-C. Calvet, "Mesoscale land-atmosphere models and usefulness of microwave remote sensing data", in Passive microwave remote sensing of land-atmosphere interactions, Eds. B.J. Choudhury, Y.H. Kerr, E.G. Njoku and P. Pampaloni, VSP, Utrecht, The Netherlands, 1995.

Wigneron, J.-P., A. Chanzy, J.-C. Calvet and N. Bruguier, "A simple algorithm to retrieve soil moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields", Rem. Sens. Environ., Vol. 51, pp. 331-341, 1995.

Wigneron, J.-P., J.-C. Calvet, A. Chanzy, O. Grosgean and L. Laguerre, "A composite discrete-continuous approach to model the microwave emission of vegetation", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 33, No. 1, pp. 201-211, 1995.

Calvet, J.-C., J.-P. Wigneron, A. Chanzy, S. Raju and L. Laguerre, "Microwave dielectric properties of a silt-loam at high frequencies", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 33, No. 3, pp. 634-642, 1995.

Raju, S., A. Chanzy, J.-P. Wigneron, J.-C. Calvet, Y. Kerr and L. Laguerre, "Soil moisture and temperature profile effects on microwave emission at low frequencies", Rem. Sens. Environ., Vol. 54, pp. 85-97, 1995.

Calvet, J.-C., A. Chanzy and J.-P. Wigneron, "Surface temperature and soil moisture retrieval in the Sahel from airborne multi-frequency microwave radiometry", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 34, No. 2, pp. 588-600, mars 1996.

Calvet, J.-C., J.-P. Wigneron, A. Chanzy and D. Haboudane, "Retrieval of surface parameters from microwave radiometry over open canopies at high frequencies", Rem. Sens. Environ., Vol. 53, pp. 46-60, 1995.

Calvet, J.-C. and J.-P. Jullien, "Land surface temperature retrieval in dry conditions from infrared and microwave satellite radiometry", Remote Sensing Reviews, Vol. 13, pp. 235-255, 1996.

Calvet, J.-C., A. Chanzy and J.-P. Wigneron, "Surface temperature and soil moisture retrieval in the Sahel from airborne multi-frequency microwave radiometry", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 34, No. 2, pp. 588-600, 1996.

Wigneron, J.-P, J.-C. Calvet, A. Chanzy and Y.K. Kerr, "Monitoring water interception by crop fields from passive microwave observations", Agr. For. Meteor., Vol. 80, pp. 177-194, 1996.

Haboudane, D., A. Chanzy, J.-C. Calvet, J.-P. Wigneron and F. Bonn, "Radiométrie micro-onde dans le cas des couverts végétaux partiels : estimation de la teneur en eau du sol", Journal canadien de télédétection, Vol. 22, No. 2, pp. 208-217, 1996.

Wigneron, J.-P., D. Guyon, J.-C. Calvet, G. Courrier and N. Bruguier, "Monitoring coniferous forest characteristics using a multifrequency (5-90 GHz) microwave radiometer", Rem. Sens. Environ., 60:299-310, 1997.

Chanzy, A., T.J. Schmugge, J.-C. Calvet, Y. Kerr, P. van Oevelen, O. Grosjean and J.R. Wang, "Airborne microwave radiometry on a semi-arid area during HAPEX-Sahel", J. Hydrology, Vol. 188-189, pp. 285-309, 1997.

Wigneron, J.-P., T.J. Schmugge, A. Chanzy, J.-C. Calvet and Y. Kerr, "Use of passive microwave remote sensing to monitor soil moisture", Agronomie, Vol. 18, pp. 27-43, 1998.

Wigneron, J.-P., P. Ferrazoli, J.-C. Calvet, Y. Kerr, and P. Bertuzzi, "A parametric study on passive and active microwave observations over a soybean crop", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 37, No. 6, pp. 2728-2733, 1999.

Wigneron, J.-P., P. Waldteufel, A. Chanzy, J.-C. Calvet, and Y. Kerr, "Two-Dimensional Microwave Interferometer Retrieval Capabilities over Land Surfaces (SMOS Mission)", Rem. Sens. Environ., Vol. 73, No. 3, pp. 270-282, 2000.

Wigneron, J.-P., A. Chanzy, J.-C. Calvet, A. Olioso, and Y. Kerr, "Modeling approaches to assimilating L-band passive microwave observations over land surfaces", J. Geophys. Res., soumis, 2002.

3. Expériences micrométéorologiques et analyse de l'eau du sol :

Calvet, J.-C., J. Noilhan and P. Bessemoulin, "Retrieving the root-zone soil moisture from surface soil moisture or temperature estimates: a feasibility study based on field measurements", J. Appl. Meteor., Vol. 37, No. 4, pp. 371-386, 1998.

Calvet, J.-C., P. Bessemoulin, J. Noilhan, and 19 coauthors, "MUREX: a land-surface field experiment to study the annual cycle of the energy and water budgets", Ann. Geophys., Vol. 17, pp. 838-854, 1999.

Olioso, A., H. Chauki, J.-P. Wigneron, K. Bergaoui, P. Bertuzzi, A. Chanzy, P. Bessemoulin, and J.-C. Calvet, "Estimation of energy fluxes from thermal infrared, spectral reflectances, microwave data and SVAT modeling", Phys. Chem. Earth (B), Vol. 24, No. 7, pp. 829-836, 1999.

Wigneron, J.-P., J.-C. Calvet, A. Olioso, A. Chanzy, and P. Bertuzzi, "Estimating the root-zone soil moisture from the combined use of time series of surface soil moisture and SVAT modeling", Phys. Chem. Earth (B), Vol. 24, No. 7, pp. 837-843, 1999.

Gonzalez-Sosa, E., I. Braud, J.-L. Thony, M. Vauclin, P. Bessemoulin, and J.-C. Calvet, "Modelling heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch", Agric. For. Meteorol., Vol. 97, pp. 151-169, 1999.

Wigneron, J.-P., J.-C. Calvet, A. Olioso, A. Chanzy, and P. Bertuzzi, "Estimating the root-zone soil moisture from the combined use of time series of surface soil moisture and SVAT modeling", Water Resour. Res., Vol. 35, No. 12, pp. 3735-3745, 1999.

Calvet, J.-C., and J. Noilhan, "From near-surface to root-zone soil moisture using year-round data", J. Hydromet., Vol. 1, No. 5, pp. 393-411, 2000.

Gonzalez-Sosa, E., I. Braud, J.-L. Thony, M. Vauclin, and J.-C. Calvet, "Heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch layer: a modeling study using the three year MUREX data set", J. Hydrol., Vol. 244, pp. 119-136, 2001.

4. Assimilation du CO_2 et amélioration des modèles de transfert entre le sol, la végétation, et l'atmosphère :

Calvet, J.-C., J. Noilhan, J.-L. Roujean, P. Bessemoulin, M. Cabelguenne, A. Olioso and J.-P. Wigneron, "An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites", Agric. For. Meteorol., Vol. 92, pp. 73-95, 1998.

Boone, A., J.-C. Calvet and J. Noilhan, "Inclusion of a third soil layer in a land-surface scheme using the force-restore method", J. Appl. Meteor., Vol. 38, No. 11, pp. 1611-1630, 1999.

Calvet, J.-C., "Investigating soil and atmospheric plant water stress using physiological and micrometeorological data sets", Agric. For. Meteorol., Vol. 103, No. 3, pp. 229-247, 2000.

Calvet, J.-C. and J.-F. Soussana, "Modelling CO_2-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme", Agric. For. Meteorol., Vol. 108, No. 2, pp. 129-152, 2001.

Voirin, S., J.-C. Calvet, F. Habets and J. Noilhan, "Interactive vegetation modeling at a regional scale: application to the Adour basin", Phys. Chem. Earth (B), Vol. 26, No. 5-6, pp. 479-484, 2001.

Liste des contributions à des congrés (depuis 1997)

Calvet, J.-C., J. Noilhan, P. Bessemoulin, et J.-P. Wigneron, « Estimation de la réserve en eau du sol à partir du contenu en eau superficiel ou de la température de surface : étude de faisabilité à partir de mesures », in Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Ed. G. Guyot et T. Phulpin, Tome 2, pp. 435-440, Courchevel, 7-11 avril 1997.

Calvet, J.-C., J. Noilhan, et P. Bessemoulin, « Estimation de la réserve en eau du sol à partir du contenu en eau superficiel ou de la température de surface », in Milieux poreux et transferts hydriques, 21 èmes Journées Scientifiques du GFHN, Avignon, 26-27 novembre 1996, *Bulletin du Groupe Français d'Humidimétrie Neutronique et des Techniques Associées*, Vol. 39-40, pp. 21-26, Novembre 1997.

Calvet, J.-C., J. Noilhan, et J.-L. Roujean, « Introducing CO_2 assimilation in ISBA for interactive vegetation », in Book of Abstracts, International Workshop on Prospects for Co-ordinated Activities in Core Projects of GCTE, BAHC and LUCC, Ed. S.C. van de Geijn and P.J. Kuikman, Wageningen, 16-19 Novembre 1997.

Calvet, J.-C., J. Noilhan, et J.-L. Roujean, « Introduction du cycle du carbone dans Isba pour une végétation interactive », Atelier de Modélisation de l'Atmosphère, pp. 83-86, Toulouse, 2-3 décembre 1997.

Calvet, J.-C., J. Noilhan, et J.-L. Roujean, « Introducing CO_2 assimilation in ISBA for interactive vegetation », *Ann. Geophys.*, Vol. 16, Suppl. 2, p. C618, EGS 23rd General Assembly, Nice, 20-24 avril 1998.

Calvet, J.-C., J. Noilhan, et J.-L. Roujean, 1998. "Introducing CO_2 assimilation in ISBA for interactive vegetation. *AMS 23rd Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, Albuquerque, 2-6 novembre 1998, pp. 119-122.

Calvet, J.-C., Y. Kerr, J.-P. Wigneron, A. Chanzy, et P. Waldteufel, 1999. "Retrieval capabilities of microwave radiometry over semi-arid land-surfaces: the RAMSES-SMOS mission". *Conférence MEDESERT'99, Synergie dans les processus de désertification en région méditerranéenne*, Perpignan, 16-19 mars 1999, p. 206.

Calvet, J.-C., «Describing plant water stress in interactive vegetation SVAT models», 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, Sydney, 8-12 novembre 1999.

Masson, V., Brion, D., Noilhan, J., et J.-C. Calvet, «A complete physically based-based town energy budget scheme for atmospheric models», 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, Sydney, 8-12 novembre 1999.

Calvet, J.-C., et J. Noilhan, 1999. « Du contenu en eau en surface au contenu en eau de la zone racinaire ». Proc. Atelier de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, 30 novembre - 2 décembre 1999, pp. 289-292, Toulouse: Météo-France/CNRM.

Calvet, J.-C., P. Bessemoulin, J. Noilhan et al.: « MUREX : une campagne de mesure pour l'étude du cycle annuel des bilans hydrique et énergétique », in Proceedings of Colloque PNRH, pp. 51-55, Météo-France, Toulouse, 16-17 mai 2000.

Calvet, J.-C., J. Noilhan et J.-P. Wigneron : « Root-zone soil moisture analysis using micro-wave radiometry », pp. 629-637, in Proceedings of 8th International Symposium Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing, CNES, Aussois, 8-12 janvier 2001.

Calvet, J.-C., et J.-F. Soussana : « Modelling CO_2-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme », in Proceedings of Challenges of a Changing Earth, Global Change open science conference, p. 109, Amsterdam, 10-13 juillet 2001.

Liste des textes de vulgarisation

Deudon, O., H. le Treut, J.-M. Jancovici, V. Pérarnaud, J.-C. Calvet, C. E. Rosenzweig, R. Delécolle, "Changements climatiques : Quelles conséquences pour l'agriculture", Perspectives Agricoles, ITCF, Vol. 266, pp. 44-61, 2001.

Liste des rapports de fin de contrat

Kabat, P., A.J. Dolman, M. Ashby, J.C. Gash, I. Wright, A. Culf, J.-C. Calvet, C. Delire, J. Noilhan, A. Jochum, M.A. Silva Dias, G.A. Fisch, R.C. Santos-Alvalá, C.A. Nobre, S.D. Prince, and M. Steininger, "The large scale biosphere-atmosphere experiment in Amazonia (LBA): Use of integrated modelling for experimental design", SC-DLO report No. 145, Wageningen, 1997.

Liste des programmes de recherche

1991-1996 : Programme de recherche PORTOS (radiométrie micro-ondes) dirigé par l'INRA, financé par le CNES et le PNTS.

1996-1997 : Programme européen « Pré-LBA » PL-931938 (CABARE), Contrat EV5V-CT94-0456, dirigé par le SC-DLO (Wageningen, NL). Collaboration avec l'IH (UK), Alterra (NL) et l'INPE (Brésil). Avec R. Santos-Alvalá et C. Delire (post-docs).

1997-1998 : Expérience Alpilles-Réséda dirigée par l'INRA, financée par le PNTS et l'Europe. Participation aux volets SVAT et Méso-échelle.

1997-1998 : Début du projet ISBA-A-gs. Volet végétation interactive de Méso-NH avec A. Boone (en thèse au CNRM).

1995-1999 : Expérience MUREX dirigée par le CNRM, financée par le PNRH, Météo-France, le CESBIO, et le LTHE. Participation à l'encadrement de E. Gonzalez-Sosa (en thèse au LTHE).

1999-2000 : Volet végétation interactive du système ISBA-MODCOU, avec S. Voirin, en thèse au CNRM.

1998-2001 : Projet de mission spatiale SMOS proposé par le CESBIO et dirigé par le CNES et l'ESA. Collaboration avec le CESBIO, l'INRA, l'IPSL, le LTHE, l'ONERA.

2000-2002 : « Soil moisture retrieval by a future space-borne earth observation mission », étude financée par l'ESA (contrat ESTEC 14662/00/NL/DC), dirigée par l'Université de Reading. Collaboration avec l'INRA, le CESBIO, l'IPSL, les Universités de Reading et de Valencia (« Equipe ESA-Soil Moisture », voir ci-contre). Avec T. Pellarin (post-doc).

2000-2002 : Expérience aéroportée EUROSTARRS financée par l'ESA (RFQ/3-10167/01/NL/SF), en collaboration avec, le DLR, l'INRA, l'Université de Valencia, le CESBIO

2000-2003 : Volet forêts et azote de ISBA-A-gs en collaboration avec l'INRA, avec V. Rivalland (en thèse avec JC Calvet).

2000-2003 : Expérience SMOS-PIRRENE, en collaboration avec le CESBIO, l'INRA, et l'ONERA (financement TAOB, région Midi-Pyrénées, Météo-France, Cesbio).

2002-2003 : « Développement de techniques d'assimilation de données spatiales (optiques et microondes) dans le modèle de surface ISBA du CNRM. Comparaison de différentes techniques à l'échelle de la parcelle agricole, apport comparé des différents domaines spectraux et impact d'une meilleure simulation des processus d'interface sur l'hydrologie d'un sous-bassin versant du Rhône ». Projet dirigé par le CETP et financé par l'ACI Observation de ta Terre.

2002-2004 : Projet européen ELDAS (Development of a European Land Data Assimilation System to predict Floods and Droughts).

(en rouge : étudiants encadrés, en thèse ou post-doctorants)

Equipe ESA-Soil Moisture :

T. Pellarin[1], J.-C. Calvet[1], J.-P. Wigneron[2], L.P. Simmonds[3], Ernesto Lopez-Baeza[4], M. Berger[5], A. Camps[6], A. Chanzy[7], P. Ferrazzoli[8], M. T. Hallikainen[9], Y. H. Kerr[10], C. Mätzler[11], W. Mauser[12], A. van de Griend[13], B. van den Hurk[14], P. J. van Oevelen[15], P. Viterbo[16], P. Waldteufel[17]

[1] Météo-France/CNRM, Toulouse, France
[2] INRA, Bordeaux, France
[3] The University of Reading, UK
[4] Universitat de Valencia, Spain
[5] ESTEC/ESA - Land Surfaces Unit, Noordwijk, The Netherlands
[6] Universitat Politècnica de Catalunya, Spain
[7] INRA, Avignon, France
[8] Tor Vergata University, Rome, Italy
[9] Helsinki University of Technology, Laboratory of Space Technology, Helsinki, Finland
[10] CESBIO, Toulouse, France
[11] Institute of Applied Physics, University of Bern, Switzerland
[12] Institute for Geography, Dept of Remote Sensing, University of Munich, Germany
[13] Department of Hydrology, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands
[14] Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI, The Netherlands
[15] Department of Environmental Sciences, Wageningen Agricultural University, The Netherlands
[16] ECMWF, Reading, UK
[17] Laboratoire d'Aéronomie, Verrières-le-Buisson, France

Liste des mémoires de diplômes dirigés

Mémoire de DEA, INA P-G, Paris VI, ENS, Vincent Rivalland, 2000, « *Optimisation du modèle SVAT ISBA-A-gs à partir d'une base de données EUROFLUX sur un couvert de Pins maritimes à sous-bois de Molinie* ». Stage co-encadré avec Yves Brunet de l'INRA.

Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, Vincent Rivalland, « *Simulation des cycles du carbone et de l'azote pour une végétation interactive dans les modèles hydro-météorologiques* », en cours.

Participation à l'encadrement du travail de thèse de Aaron Boone et Sophie Voirin-Morel (en thèse avec Joël Noilhan), de Enrique Gonzalez-Sosa (en thèse au LTHE avec Isabelle Braud).

Direction des travaux de post-doctorat de Christine Delire, de Régine Santos-Alvalá, et de Thierry Pellarin.

Copie de cinq publications

Calvet, J.-C., J. Noilhan and P. Bessemoulin, "Retrieving the root-zone soil moisture from surface soil moisture or temperature estimates: a feasibility study based on field measurements", J. Appl. Meteor., Vol. 37, No. 4, pp. 371-386, 1998a.

Calvet, J.-C., J. Noilhan, J.-L. Roujean, P. Bessemoulin, M. Cabelguenne, A. Olioso and J.-P. Wigneron, "An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites", Agric. For. Meteorol., Vol. 92, pp. 73-95, 1998b.

Calvet, J.-C., "Investigating soil and atmospheric plant water stress using physiological and micrometeorological data sets", Agric. For. Meteorol., Vol. 103, No. 3, pp. 229-247, 2000.

Calvet, J.-C., and J. Noilhan, "From near-surface to root-zone soil moisture using year-round data", J. Hydromet., Vol. 1, No. 5, pp. 393-411, 2000.

Calvet, J.-C. and J.-F. Soussana, "Modelling CO_2-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme", Agric. For. Meteorol., Vol. 108, No. 2, pp. 129-152, 2001.