



Etude bibliographique

GMST315 Projet bibliographique et conférences

Impacts des pratiques agropastorales sur les ressources éco-hydrologiques en milieu sahélien : apports d'un modèle SVAT détaillé

Travail réalisé par Aubin ALLIES
*Master Eau 2^{ème} année spécialité Ressource parcours
HYDRE (Hydrologie Risques Environnement)*

Encadré par Jérôme DEMARTY
*Laboratoire Hydrosciences Montpellier
Axe TECHS — Équipe AMMA Niger*

Année 2014 - 2015

Sommaire

Introduction	1
Contexte socio-éco-environnemental	1
Problématiques et objectifs	2
1- Contexte de l'étude	5
1-1- Généralités sur le Sahel agropastoral.....	5
1-1-1- Contexte climatique	6
1-1-2- Géomorphologie, hydrologie et hydrogéologie	6
1-1-3- Végétation.....	6
1-2-3-1- Végétation naturelle et semi-naturelle	7
1-2-3-1-1- Les herbacés	7
1-2-3-1-2- Les fourrés arbustifs : le guiera	7
1-2-3-2- Les cultures : le mil	8
1-1-4- Populations : dynamiques, usages et relations à l'environnement	8
1-1-4-1- Démographie	8
1-1-4-2- Agropastoralisme.....	8
1-1-4-3- Dynamiques et influences du pâturage et des périodes de jachère.....	9
1-1-4-4- Stratégies d'adaptation et perspectives des producteurs au Sahel.....	9
1-1-5- Synthèse bibliographique des évolutions de la zone Sud-Ouest Niger de 1950 à nos jours	10
2- Outils de modélisation	11
2-1- Modélisation SVAT	11
2-1-1- Généralités	11
2-1-2- Modélisation avec SiSPAT.....	12
2-1-3- Un focus particulier sur le module de conductance stomatique	13
2-2- Le modèle A-g _s	14
2-2-1- Description générale	14
2-2-2- Les processus biophysiques : la théorie	14
2-2-3- Les apports du modèle A-g _s par rapport au module de Jarvis du modèle SiSPAT	15
3- Inclusion du modèle A-g _s dans SiSPAT	16
3-1- Principe du couplage	16
3-2- Un exemple de modèle SVAT couplé à un modèle de fonctionnement de la végétation : le modèle ISBA-A-g _s	16

3-3- Premières réflexions à l'application du modèle	17
Conclusion	19
Bibliographie.....	20
Liste des figures	30
Liste des tableaux.....	31
Liste des acronymes.....	32
Liste des symboles	33
Glossaire	34
Annexes	

Introduction

Contexte socio-éco-environnemental

La question soulevée par les changements climatiques est devenue, ces dernières années, un enjeu majeur pour nos sociétés. Depuis le sommet de la Terre de Rio en 1992, les gouvernements ont désormais pris conscience des réalités du changement climatique global, de ses conséquences et de la responsabilité des activités anthropiques dans ces dérèglements (Dahan Dalmedico et Guillemot, 2006). L'Afrique sahélienne, considérée comme un futur hot spot des changements globaux, est particulièrement concernée par cette problématique. Sa forte croissance démographique, exacerbeant la pression induite sur les ressources naturelles, amplifie les répercussions de la variabilité climatique, observée depuis les années 1970, sur les populations et les milieux.

Les changements climatiques constituent certes un phénomène mondial, mais ses effets néfastes sont plus durement ressentis par les populations les plus défavorisées. Ces dernières sont en effet particulièrement plus dépendantes des ressources naturelles, et leur capacité à faire face aux aléas climatiques plus limitées. (Abeygunawardena *et al.*, 2002). Ainsi, tenter de réduire la vulnérabilité des pays du Sud aux changements climatiques reste un enjeu clairement identifié sur la scène politique internationale.

Dans un tel contexte socio-économique, la communauté scientifique s'attache à mieux anticiper l'évolution des ressources naturelles sous l'impulsion des changements climatiques. Le programme international AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine, <http://www.amma-international.org/>) est un des programmes phares en Afrique de l'Ouest. Il a comme double ambition d'améliorer la compréhension des mécanismes qui gouvernent la Mousson Ouest-Africaine (MOA) et d'en évaluer ses répercussions en terme de variabilité sur la disponibilité des ressources hydrologiques et biotiques, et par voie de conséquences sur les populations (Redelsperger *et al.*, 2006).

Dans ce programme, un Observatoire de Recherche pour l'Environnement (ORE), nommé AMMA-CATCH¹ (<http://www.amma-catch.org>), a été implanté en Afrique de l'ouest, sur trois sites géographiques situés le long d'un gradient pluviométrique Nord-Sud au Mali, au Niger et au Bénin. Sur l'ensemble de ces sites un programme expérimental dense a été mis en oeuvre depuis 2005 dans l'optique de suivre l'évolution des composantes des cycles de l'énergie, de l'eau et de la végétation ; l'importance des jeux de données acquis devant permettre d'apporter des éléments de réponses aux questions scientifiques traitées dans le cadre du programme AMMA.

¹ Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique

Problématiques et objectifs

L'ensemble des expérimentations menées plus particulièrement sur le site sahélien AMMA-CATCH situé au Sud-Ouest du Niger a permis de confirmer la réalité du « paradoxe » hydrologique sahélien (Cappelaere *et al.*, 2009), introduit quelques temps auparavant, à savoir que la diminution des précipitations, touchant plus ou moins la région depuis les années 1970 s'accompagne d'une augmentation de la ressource en eau souterraine qui induit une remontée des nappes. L'ensemble des travaux menés en hydrologie sur la zone cherchent à identifier formellement les causes de ce paradoxe, ainsi que ses impacts à plus ou moins long termes sur le fonctionnement des écosystèmes sahéliens au Niger. Les actions de recherches récentes se sont notamment engagées vers une meilleure compréhension et modélisation des échanges d'eau et d'énergie qui interagissent à l'interface Sol-Végétation-Atmosphère (SVA).

Ainsi, s'appuyant sur le réseau de mesures mis en place sur le site AMMA CATCH au Niger, les travaux de thèse de Velluet (2014), ont notamment permis de mieux quantifier les composantes des cycles hydrologique et énergétique, sur une période pluriannuelle longue (2005-2011). De tels résultats ont été obtenus sur l'appui d'un modèle numérique détaillant les processus d'interactions à l'interface SVA, appelé communément modèle SVAT¹ en anglais ou TSVA² en français.

Plus précisément, le modèle utilisé dans ce travail est le modèle SiSPAT³ (Braud *et al.*, 1995). C'est un modèle SVAT ayant la capacité de résoudre de manière couplée les échanges d'eau et d'énergie qui interagissent à l'interface SVA, et ainsi d'estimer les principales composantes associées à ces cycles à des échelles de temps de quelques secondes à quelques minutes. La principale originalité du modèle réside dans sa capacité de gestion couplée des échanges thermo-hydriques dans le sol tant en phase liquide qu'en phase vapeur. Une telle capacité est indispensable pour étudier finement le comportement hydrologique en région semi-aride (phénomènes d'encroûtement, échanges en phase vapeur non négligeables, évapotranspiration largement majoritaire). En contrepartie, le modèle requiert un paramétrage fin et important, notamment des propriétés hydrodynamiques et thermiques des sols (Velluet *et al.*, 2014). Le modèle SiSPAT reste actuellement plus conventionnel dans sa représentation des processus liés à la végétation. Par exemple, le module de régulation stomatique, permettant de calculer les pertes en eau par transpiration, bien que robuste et classiquement utilisé par ailleurs en modélisation SVAT, reste relativement simple en regard du degré de complexité de résolution des échanges thermo-hydriques

¹ Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer

² Transfert Sol-Végétation-Atmosphère

³ Simple Soil-Plant-Atmosphere Transfer model

dans le sol. De plus, les évolutions saisonnières de la végétation sont actuellement décrites au moyens de variables de forçage (indice foliaire, hauteur de végétation, profil racinaire).

L'équipe AMMA CATCH Niger d'HSM¹, qui mène ces travaux, s'efforce donc actuellement à développer une nouvelle version de SiSPAT qui soit plus élaborée sur ces aspects. L'objectif est d'avoir un modèle éco-hydrologique capable de simuler à la fois les cycles hydrologiques et énergétique, comme dans un SVAT conventionnel, mais aussi les cycles de la végétation et du carbone dont les interactions avec le cycle de l'eau sont multiples (cf. Fig.1). En effet, la végétation dépend du climat et de la disponibilité en eau du sol. Elle est donc de fait largement affectée par la capacité d'infiltration des sols. En retour, le développement saisonnier modifie les propriétés de surface (albédo, rugosité, propriétés hydrauliques et thermiques, etc.) et conditionne directement aussi certaines composantes clés du cycle hydrologique (transpiration, prélèvements racinaires, etc.).

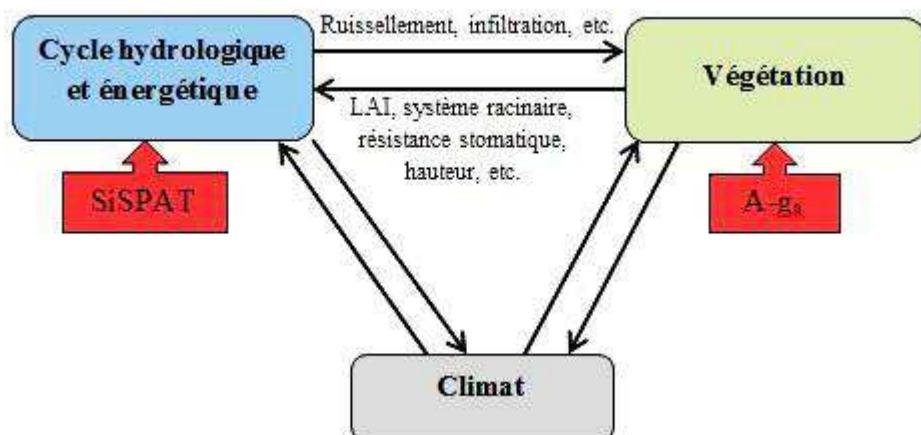


Figure 1 : Schéma des interactions Cycle hydro-énergétique — Végétation — Climat

Les objectifs associés à ce rapport bibliographique, et par conséquent du stage de master qui s'en suivra, s'inscrivent dans cette problématique scientifique. **Il s'agira dans un premier temps de documenter et finaliser une première phase de développement qui vient d'être réalisée sur une meilleure prise en compte de la végétation dans le modèle SiSPAT.** Celle-ci a été menée au travers l'inclusion d'un nouveau module de régulation stomatique et de photosynthèse, appelé A-gs (Jacobs, 1994), dans le code informatique du modèle SiSPAT. Ce module permet désormais de simuler les mécanismes de régulation transpiratoire et la photosynthèse, sous une approche écophysiologique semi-mécaniste. Ainsi, SiSPAT est donc désormais capable de simuler l'assimilation de carbone par la végétation qui est une grandeur clé du cycle de carbone. Les développements en cours sur cette première partie n'ayant pas encore jamais été éprouvés, et encore moins validés, la première partie du travail de master sera menée dans ce but, grâce aux

¹ HydroSciences Montpellier

observations acquises sur le site AMMA CATCH Niger et aux travaux antérieurs réalisés dans le cadre de la thèse de Velluet (2014).

Sur la base des résultats obtenus, un second lot de développement sur les aspects végétation sera éventuellement effectué après ce stage. L'idée est de pousser encore d'un cran les développements liés à la végétation en ajoutant dans le SVAT un schéma de croissance des plantes et d'allocation du carbone. Le modèle sera ainsi à terme capable de simuler, et par conséquent de s'affranchir, d'une de ces variables biophysiques clés de son forçage qui est l'indice foliaire (dit LAI¹). Cette grandeur, directement proportionnelle à la quantité de feuilles de la végétation, est une grandeur essentielle en modélisation SVAT. Elle contrôle par exemple la partition de l'énergie radiative incidente entre sol et végétation, et aussi la partition entre évaporation et transpiration. Bien que de tels développements n'aient pas encore été réalisés, il est toutefois intéressant d'évaluer par anticipation la nécessité d'inclure ou non un tel module dans le SVAT. Ainsi, *la seconde phase du stage de master s'attachera à étudier la sensibilité du modèle à la variabilité du LAI. Pour cela, il est donc prévu d'étudier la réponse du modèle en termes de bilans d'eau et d'énergie à des variations de forçage du LAI.* Ces variations doivent être réalistes et être susceptibles de se produire sous l'impulsion de changements de pratiques agropastorales en réponse ou non aux changements climatiques attendus. L'objectif sur cette partie consistera donc à mieux documenter et comprendre les pratiques agropastorales qui régissent la zone du Sud-Ouest Niger, à tenter d'anticiper les évolutions éventuelles à l'avenir et à les traduire en termes d'évolution saisonnière d'indice foliaire pour en tester l'impact sur les cycles de l'eau et de l'énergie à court et moyen termes.

Cette synthèse bibliographique est structurée comme suit. Dans un premier temps, des éléments généraux présentant la zone d'études et son contexte climatique et environnemental, seront introduits. La seconde partie sera consacrée aux outils de modélisation TSVA. Un focus sera particulièrement donné dans ce sens au modèle SiSPAT, principal objet d'études et aux développements récents qui ont été effectués au travers l'inclusion du modèle de photosynthèse. Pour finir, une dernière partie abordera la question des scenarios d'évolution de l'indice foliaire et décrira les modalités et les apports du couplage des deux modèles.

¹ Leaf Area Index (indice foliaire en français)

1- Contexte de l'étude

Préambule : Le contexte climatique et hydrologique ayant fait l'objet d'une recherche bibliographique dans les travaux de thèse de Velluet (2014) ; les grandes lignes sont ici synthétisées. En revanche, comme ce travail porte sur les interactions entre la végétation et l'hydrologie, une place beaucoup plus importante est faite dans ce rapport aux éléments contextuels en lien avec la végétation et les pratiques agropastorales, peu décrites jusqu'à présent.

La zone d'étude est située au Sahel agropastoral, dans le Sud-Ouest Niger, et plus précisément sur le bassin de Wankama localisé à une petite cinquantaine de kilomètres à l'est de Niamey, capitale du pays (13.53° Nord, 2.53° Est). Ce bassin, de taille très modeste ($2-3 \text{ km}^2$) est instrumenté dans le cadre du programme AMMA-CATCH (cf. Fig.2). Le travail de stage se place à l'échelle de la parcelle, et concerne les deux écosystèmes majeurs du Sahel agropastoral : une parcelle en cultures de mil, culture dominante de la zone, et une parcelle de savane arbustive, qui n'est rien d'autre qu'un champ laissé en jachère (environ 15 ha chacune). La parcelle de mil est cultivée depuis mai 2005, tandis que la parcelle de savane arbustive est en jachère depuis 2000 environ (Velluet, 2014). En 2013, la rotation des couverts a été réalisée sur les deux parcelles afin de respecter les pratiques traditionnelles de la zone.

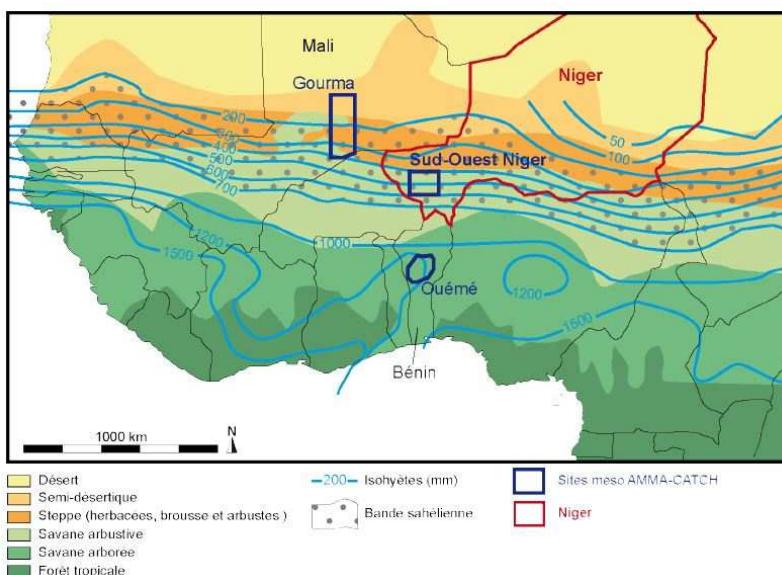


Figure 2 : Localisation des différents types de climat et de végétation en Afrique de l'Ouest (gradient éco-climatique latitudinal) et des différents sites AMMA-CATCH (extrait de Velluet, (2014))

1-1- Généralités sur le Sahel agropastoral

Le Sahel désigne la zone de transition éco-climatique entre le désert saharien au nord et les savanes arborées de la région soudanienne au sud. La bande sahélienne s'étend de l'océan Atlantique à l'ouest, à la mer Rouge à l'est (cf. Fig.2). Le Sahel agropastoral correspond à la partie sud de cette bande, où les précipitations sont un peu plus importantes qu'au nord (400 mm/an à 700 mm/an) et permettent aux populations de cultiver, tout en conservant un pastoralisme important (Velluet, 2014).

1-1-1- Contexte climatique

Le climat est de type semi-aride tropical et régi par le phénomène de la MOA (Lebel *et al.*, 2009). Il est caractérisé par une saison des pluies entre mai et octobre, contrastant avec une intense saison sèche le reste de l'année. La pluviométrie est comprise entre 400 et 700 mm/an avec une moyenne de 560 mm/an (Niamey, Sud-Ouest NIGER, 1950-2007) (Velluet, 2014). Les précipitations montrent une forte variabilité interannuelle (écart-type de 135 mm, Niamey, 1950-2007) et spatiale (Velluet, 2014). A partir de 1970, une diminution significative des circulations de la MOA a été mise en évidence, entraînant une diminution des précipitations en Afrique de l'Ouest notamment au Sahel. Depuis la fin des années 90, on observe un retour à des conditions plus humides, avec une remontée de la pluviométrie moyenne de l'ordre de 10 % pour la période 1990-2007 (par rapport à 1970-1989), observée essentiellement au Niger (Lebel et Ali, 2009). L'évapotranspiration de référence (ET_0) annuelle est estimée à 2500 mm/an (Niamey, 1950-2003), à partir de l'équation de Penman (Massuel, 2005). Les valeurs mensuelles sont toujours supérieures à celles des pluies, sauf en juillet et en août (Velluet, 2014).

1-1-2- Géomorphologie, hydrologie et hydrogéologie

La région est caractérisée par de nombreux plateaux latéritiques dominant de larges vallées peu profondes où subsiste un réseau hydrographique fossile appelé kori (Massuel, 2005). Une grande partie de la région est caractérisée par une hydrologie de type endoréique où les écoulements convergent vers des mares temporaires dont le régime est fortement conditionné par les précipitations, l'évaporation et l'infiltration (Vischel, 2006). Les sols sont majoritairement sableux ($\geq 80\%$ de sable). Ils sont très filtrants, mais aussi très propices à l'érosion et à l'encroûtement, ce qui favorise le ruissellement (Ambouta *et al.*, 1996). Ainsi les hétérogénéités spatiales dues tant aux événements pluvieux qu'aux propriétés du sol, induisent une forte variabilité des flux de ruissellement (Casenave et Valentin, 1992). La partie la plus à l'est du site AMMA-Catch Niger (ACN), contient un aquifère poreux multicouches cloisonné regroupant une nappe libre et plusieurs nappes captives (Favreau, 2000). La nappe se recharge essentiellement par infiltration profonde d'eau provenant des mares temporaires et des zones humides. (Favreau *et al.*, 2009).

1-1-3- Végétation

Au Sahel agropastoral, la végétation se compose presque toujours de trois types de couverts (cf. Fig.3) : les cultures (majoritairement de mil), les jachères de savane arbustive (végétation semi-naturelle dominée par des herbacées et le guiera), les brousses tigrées (sur les plateaux) (Velluet,

2014). Les cultures de mil et les jachères de savane arbustive constituent les deux types de végétation pilotes de l'étude et feront donc l'objet d'une description plus approfondie.

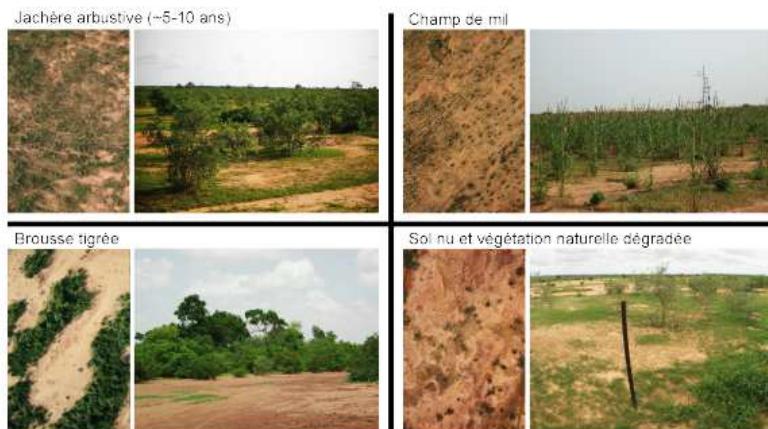


Figure 3 : Photographies illustrant chacun des principaux couverts végétaux présents sur le site AMMA-Catch Niger, prises sous deux angles de vue différents : vue aérienne (source : J.-L. Rajot) et vue frontale (source : équipe AMMA-Catch Niger, HSM) (extrait de Velluet, (2014))

1-2-3-1- Végétation naturelle et semi-naturelle

Avec 1500 espèces (Le Houérou, 1997) pour 2,5 millions de km², la flore du Sahel apparaît très pauvre. Le taux des espèces endémiques est très faible, il est estimé à 3% (Le Houérou, 1997), et confère à la zone sahélienne un statut biogéographique de zone de transition entre deux souches d'endémisme (soudanienne et sahélienne).

1-2-3-1-1- Les herbacés

Au Sud Sahel, les peuplements végétaux sont associés à une strate herbacée largement dominée par des herbacées annuelles parmi lesquelles les graminées ont la première place. Les formations à herbacées pérennes se cantonnent à des dépressions et s'apparentent aux savanes qui s'étendent plus au sud en zone soudanienne (Hiernaux et Le Houérou, 2006). La forte micro-hétérogénéité est une des caractéristiques reconnues des strates herbacées sahéliennes. Cette structure en mosaïque est renforcée par la protection contre l'incendie et la pâture (Hiernaux, 1998). D'un point de vue physiologique, chez les graminées du sud Sahel, le mode de photosynthèse en C₄ est dominant. Ce dernier est souvent associé à une régulation de l'ouverture des stomates (Hiernaux et Le Houérou, 2006). La majorité des herbacées sahéliennes produisent des semences qui ont une dormance de quelques mois mais qui germent ensuite dès que les pluies et l'humidité du sol le permettent (Cissé, 1986).

1-2-3-1-2- Les fourrés arbustifs : le guiera

Au sud-ouest Niger, le guiera (*Guiera senegalensis* J. F. Gmel) peut contribuer à hauteur de plus de 85% de la densité totale des arbustes des savanes arbustives et des jachères (Seghieri *et al.*,

2005). La résistance physiologique de cette espèce au stress hydrique et ses capacités d'adaptation phénotypique contribuent à sa dominance au Sahel. Les travaux de Wezel *et al.* (2000) montrent que les arbustes ont une importance vitale dans l'accumulation des nutriments et le maintien de la fertilité des sols dans les agrosystèmes au Niger ; notamment parce-qu'ils permettent de piéger les sédiments soufflés par les vents. Les agriculteurs locaux sont tout à fait conscients de ce phénomène. Ainsi, les plants de mil sont souvent plus denses au pied des souches de guiera (Wezel *et al.*, 2000). Pendant la période de culture, les guieras sont normalement coupés à ras entre janvier et mars puis à nouveau entre juillet et août lors des défrichements. La plante tolère ses élagages répétés et répond en se ramifiant abondamment à la base des souches (Seghieri *et al.*, 2005 ; Ichoua, 2000).

1-2-3-2- Les cultures : le mil

La culture pluviale du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), constitue la principale production céréalière de la région. En 2005, les champs de mil couvraient 58% de la surface du bassin de Wankama (Boulain *et al.*, 2009). La culture du mil est bien adaptée au climat sahélien, du fait, en autre, de sa résistance à des périodes de sécheresse (Do *et al.*, 1996). En règle générale, le mil est semé après la première pluie, lorsque celle-ci est en mesure de mouiller les premiers centimètres du sol (c'est-à-dire entre 5 et 10 mm de pluie). Il peut ensuite être semé à nouveau à plusieurs reprises jusqu'à la mi-juillet en fonction de la distribution des précipitations. Des périodes de jachère régulières sont nécessaires dans ce système de culture traditionnel qui n'utilise que très rarement des fertilisants chimiques (Velluet, 2014). Les arbustes et les mauvaises herbes sont éliminés manuellement généralement par fauchage. La récolte est faite peu de temps après la fin de la saison des pluies, en septembre ou octobre, et consiste à retirer du sol l'ensemble de la plante, laissant ainsi le sol nu (Boulain *et al.*, 2009).

1-1-4- Populations : dynamiques, usages et relations à l'environnement

1-1-4-1- Démographie

Le Sahel agropastoral fait partie des régions les plus densément peuplées d'Afrique de l'Ouest (Lebel *et al.*, 2009). La pression anthropique sur le milieu est déjà très forte (Leblanc *et al.*, 2008) et tend à augmenter considérablement. En effet, cette région connaît actuellement l'un des plus forts taux de croissance démographique au monde (3 %/an ; Guengant *et al.*, 2003).

1-1-4-2- Agropastoralisme

Pour s'adapter à ces conditions climatiques particulièrement sévères et très variables ainsi qu'à des sols pauvres en matière organique (< 2 % de carbone ; Rockström et de Rouw, 1997) et en nutriments, peu favorables à l'agriculture, les populations ont notamment investi dans des systèmes

de production mobiles, comme l'élevage transhumant, ou l'agropastoralisme, très répandus dans la région du Sud-Ouest Niger. Cette pratique simultanée d'activités pastorales et agricoles permet d'optimiser la rentabilité des différentes productions dans ces conditions environnementales. Les deux tiers de la population sahélienne vivent de cette pratique (FAO, 2001).

1-1-4-3- Dynamiques et influences du pâturage et des périodes de jachère

Hiernaux *et al.* (2009b) ont montré qu'à court terme, le pâturage du bétail, pendant la saison des pluies affecte la croissance des plantes ainsi que le rendement des cultures dans des directions et des proportions qui varient selon la durée et l'intensité de la pâture. De longues périodes de pâturage intensif favorisent des espèces à cycle court ; ainsi les parcours pâturés répondent plus rapidement à la sécheresse. L'augmentation de la population s'est accompagné d'une expansion des aires cultivées au dépend des jachères, de la réduction et de la fragmentation des pâturages et d'une augmentation des cheptels de bétail conduisant à une surexploitation des ressources (Achard et Banoin, 2003). Cette surexploitation a conduit, à court terme, à l'effondrement de la production d'herbacés, et à long terme, à la modification de la végétation et de sa succession dans les aires de jachères (Hiernaux et Turner, 1996). Ces dernières contribuent, à présent, dans une moindre mesure à la maintenance de la fertilité des sols cultivés au niveau local, du fait de leur faible durée (Pieri, 1989). Actuellement, la restauration de la fertilité des sols cultivés est en partie maintenue par les résidus de cultures et le dépôt de fèces et d'urine par le bétail (Batiano et Mokwunye, 1991). Toutefois, Achard et Banoin (2003) et de Rouw et Rajot (2004) ont montré que ces apports de matières organiques restent insuffisants pour compenser totalement le bénéfice des longs cycles de jachère.

1-1-4-4- Stratégies d'adaptation et perspectives des producteurs au Sahel

Face aux différents risques liés à la variabilité climatique, les paysans du Sahel agropastoral ont développé des stratégies d'adaptation. Parmi ces stratégies, figurent celles relatives aux pratiques agricoles comme la lutte contre la dégradation des terres agricoles (défrichement amélioré par exemple), la gestion de la fertilité des sols, les techniques de gestion de l'eau (diguettes antiérosives, technique de « zaï », technique de la demi-lune), la diversification des cultures, etc. (OCDE/CSAO, 2008). L'essor et la généralisation de l'agropastoralisme, a rendu l'avenir de l'élevage transhumant incertain. Cette évolution des pratiques s'est doublée d'une mutation spatiale des activités qui s'est traduite par des « fuites pastorales » de 1973 à 1984 (Boutrais, 2007).

Par ailleurs, si pour le moment les cultures restent essentiellement pluviales (93 % des exploitations agricoles), les populations commencent à se tourner vers l'irrigation à partir des nappes souterraines (Siebert *et al.*, 2010). Néanmoins, ces pratiques restent pour le moment marginales, limitées aux zones à proximité des puits et onéreuses (Torou *et al.*, 2013).

1-1-5- Synthèse bibliographique des évolutions de la zone Sud-Ouest Niger de 1950 à nos jours

Cette synthèse est extraite des travaux de Velluet (2014).

Hydrologie :

- baisse de la pluviométrie sur la période 1970-1990 avec des déficits de l'ordre de 40 % en moyenne annuelle (par rapport à la période 1950-1969 ; Cappelaere *et al.*, 2009) suivie d'une remontée de la pluviométrie moyenne de l'ordre de 10 % pour la période 1990-2007 (par rapport à 1970-1989 ; Lebel et Ali, 2009) ;
- hausse continue du niveau de la nappe phréatique depuis les années 1950 (Leduc *et al.*, 2009). La nappe est montée en moyenne d'environ 0,20 m/an depuis les années 1980 (Favreau *et al.*, 2005) ;
- augmentation du nombre, du volume et de la durée d'existence des mares temporaires (Favreau, 2000) ;
- augmentation modérée du nombre de drains entre 1950 et 1975, puis multipliée par deux entre 1976 et 1992 (Leblanc *et al.*, 2008) ;
- augmentation du ruissellement hortonien (Séguis *et al.*, 2004) ;
- diminution de l'évapotranspiration moyenne pendant la saison des pluies depuis les années 1975 (Cappelaere *et al.*, 2009)

Populations et environnement :

- augmentation de la population rurale et de la pression anthropique (Guengant *et al.*, 2003) ;
- disparition progressive de la végétation naturelle au profit des cultures et des espaces dégradés. La proportion des champs cultivés a doublé entre 1950 et 1990, passant de 30 % à 60 % (Leduc *et al.*, 2001). Elle a augmenté en moyenne de 2 % par an entre 1994 et 2006 (Hiernaux *et al.*, 2009a) ;
- forte réduction des durées de jachères depuis 1970 (Valentin *et al.*, 2004), en conséquence, le rendement des cultures a diminué en moyenne de 5 % par an entre 1994 et 2006 (Hiernaux *et al.*, 2009a) ;
- augmentation du cheptel (Turner, 2000) et accroissement de la pression du pâturage, particulièrement pendant la saison de développement des cultures puisque le bétail n'a pas accès aux champs cultivés (Turner *et al.*, 2005) ;
- diminution de la production d'herbacées d'environ 5 % par an entre 1994 et 2006 sur différents types d'écosystèmes (Hiernaux *et al.*, 2009a).

2- Outils de modélisation

2-1- Modélisation SVAT

Préambule : Ici encore, un travail bibliographique ayant été réalisé par Velluet quelques années auparavant sur la modélisation SVAT, un focus particulier est donné aux aspects végétation dans les modèles.

2-1-1- Généralités

La modélisation SVAT s'attache à décrire les échanges verticaux d'énergie et d'eau entre le sol, la végétation et l'atmosphère, sur une surface homogène (Franks *et al.*, 1997). Cette description repose sur la connaissance actuelle des processus physiques et biologiques interdépendants qui gouvernent de tels échanges. La principale particularité d'un modèle SVAT, par rapport à un modèle hydrologique classique est qu'il ne s'intéresse en général qu'aux échanges verticaux (modèle 1D), et qu'il couple les cycles de l'eau et de l'énergie dans son approche (pour plus de détail, cf. Velluet, 2014). Quantifier les échanges thermo-hydriques est un enjeu important pour différentes communautés scientifiques (météorologie, climatologie, agronomie, hydrologie, écologie). Ainsi une multitude de modèles TSVA a été spécifiquement développée, au cours des 3 dernières décennies, pour répondre aux objectifs définis par chacune de ces communautés (Demarty, 2001). L'adaptation et l'application d'un modèle SVAT à un site donné nécessite la connaissance d'un grand nombre d'informations décrivant les caractéristiques du sol et de la végétation (Rivalland, 2003). Ainsi les modèles SVAT requièrent en général un jeu de paramètres et de variables important.

Les modèles SVAT sont généralement classifiés en fonction de leur représentation du système sol-végétation (Velluet, 2014). Ces différentes classes sont présentées dans les travaux d'Overgaard *et al.* (1999) et Demarty (2001). En règle générale, la complexité du modèle augmente avec le nombre de paramètres, pouvant soulever des questions sur la sur-paramétrisation des modèles et l'équifinalité des jeux de paramètres (Demarty, 2001 ; Demarty *et al.*, 2004).

Les modèles SVAT ne considèrent pas toujours la végétation comme une composante dynamique. Pourtant d'un point de vue hydrologique, l'humidité du sol interagit avec la végétation, par le biais de la transpiration qui est fortement conditionnée par les paramètres inhérents à la végétation (LAI, résistance stomatique, profondeur des racines, albédo, etc.) (Arora, 2002). Seuls les modèles multi-source, séparant le comportement de la végétation de celui du sol, peuvent intégrer des modèles dynamiques de végétation. Parmi les modèles actuels, la plupart prescrit l'évolution saisonnière du LAI sans tenir compte du cycle du carbone (Velluet, 2014). Il existe également différentes représentations du module sol, d'une modélisation conceptuelle à une modélisation physique des processus (voir Boulet, 1999 et Velluet, 2014).

→ La combinaison d'un modèle SVAT à un modèle de fonctionnement de la végétation comme A-g_s qui sera utilisée durant le stage, devrait permettre de modéliser les flux de carbone à l'interface sol-végétation, et de mieux déterminer et quantifier la dichotomie entre transpiration de la végétation et évaporation du sol.

2-1-2- Modélisation avec SiSPAT

Préambule : Dans un souci de synthèse, le modèle sera décrit succinctement, sans mention à toutes les équations qui le composent. Une description complète est consultable dans le manuel d'utilisation de SiSPAT (Braud, 2000). Des synthèses complètes ont été réalisées dans le cadre des travaux de thèse de Velluet (2014) et Demarty (2001), sur lesquels se reposent les généralités qui sont présentées ici.

Le modèle SiSPAT a été développé au sein du Laboratoire d'études des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) de Grenoble (Braud *et al.*, 1995). SiSPAT est un modèle SVAT vertical-1D mécaniste. Il permet de simuler les échanges verticaux d'énergie et d'eau dans le sol à l'interface SVA à une échelle homogène. De plus, SiSPAT est un modèle à deux couches, et distingue ainsi le fonctionnement de la végétation de celui du sol nu sous-jacent, en leur attribuant à chacun leur propre bilan d'énergie. Depuis son développement par Braud *et al.* (1995), SiSPAT a été validé sur divers types de couverts végétaux soumis à différentes conditions climatiques et environnementales, ce qui a permis de construire différentes versions du modèle suivant les divers objectifs d'étude. Une liste non exhaustive des applications de SiSPAT est présentée en annexe 1. Ce modèle est divisé en trois modules principaux qui interagissent (Velluet, 2014) :

- Le module Sol :

SiSPAT résout les équations couplées non-linéaires des échanges d'énergie et de masse dans le sol, ce qui permet d'obtenir l'évolution temporelle du potentiel matriciel (h) et de la température (T). Les échanges de masse sous forme de vapeur sont également décrits (Velluet, 2014). Le modèle peut traiter des sols verticalement hétérogènes discrétisés en plusieurs horizons de propriétés thermiques et hydrodynamiques différentes (cf. Fig.4).

- Le module Sol-Plante-Atmosphère :

Ce module décrit numériquement l'ensemble des processus biophysiques qui interagissent à l'interface SVA. Le module Sol-Plante-Atmosphère est un modèle bicouche, c'est-à-dire que la végétation et le sol sous-jacent sont considérés comme deux sources de chaleur sensible (H) et de chaleur latente (LE) indépendantes, définies chacune par leur température et leur humidité spécifique (cf. Fig.4) (Demarty, 2001 ; Velluet, 2014).

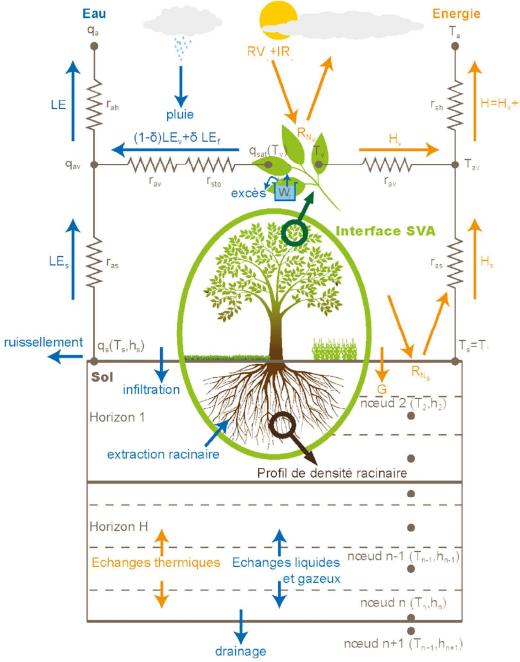


Figure 4 : Description des échanges d'énergie au sein du module d'interface Sol-Plante-Atmosphère (extrait de Velluet (2014))

- Le module Sol-Plante :

La colonne de sol est reliée à la végétation via le système racinaire. Ce module décrit l'évolution temporelle du système racinaire et calcule l'extraction hydrique totale associée (Demarty, 2001). Le modèle est capable de gérer l'extraction racinaire dans les différentes couches de sol sous l'hypothèse du fonctionnement des plantes en régime permanent. Cela signifie que toute l'eau extraite du sol est immédiatement transpirée (Federer, 1979). Le taux d'extraction dépend essentiellement de la régulation stomatique de la plante. Les stomates des feuilles s'ouvrent et se ferment en fonction de la demande évaporatoire, de la quantité d'eau dans le sol et du rayonnement incident. L'objectif de ce module est donc de calculer la quantité d'eau extraite et le site d'extraction dans le sol, par le biais de la conductance stomatique (Velluet, 2014).

2-1-3- Un focus particulier sur le module de conductance stomatique

Dans SiSPAT, au sein du module sol, c'est le module dit de Jarvis, qui est utilisée pour décrire le fonctionnement des couverts végétaux. Afin de modéliser la conductance stomatique à l'échelle de la canopée, Jarvis (1976) et Stewart (1988) ont mis au jour une relation statistique entre la conductance stomatique à l'échelle du couvert et diverses variables météorologiques telles que, le rayonnement de courtes longueurs d'ondes, l'humidité, ou la température (Jacobs *et al.*, 2003).

Les facteurs environnementaux contrôlent le degré d'ouverture des stomates. L'activité des stomates est résumée par la résistance somatique qui, dans le modèle SiSPAT, dépend de trois

facteurs (Braud, 2000) : le rayonnement solaire incident (VPD^1), le déficit de pression de vapeur et le volume d'eau disponible au niveau racinaire. Ainsi, dans SiSPAT, la résistance stomatique pour la canopée est exprimée comme suit :

$$R_{sto} = R_{st \min} \frac{f_{RG}(R_G)f_{h_f}(h_f)f_{VPD}(VPD)}{LAI} \quad (3.1)$$

Dans cette équation, $R_{st \ min}$ représente le minimum de résistance stomatique qui correspond à l'absence de stress radiatif et/ou hydrique ; et R_G le taux de radiation solaire incidente net. Le facteur f_{RG} représente l'influence des radiations photosynthétiquement actives (PAR²) (Sellers *et al.*, 1986).

→ Ce focus sur le module de Jarvis permet d'apprehender la manière dont est traitée la résistance stomatique dans le modèle SiSPAT ; le but étant de comparer ce type de paramétrisation avec celle inclut dans le module A-g_s, que nous utiliserons lors du stage, et d'analyser ainsi les apports du modèle couplé. L'ensemble des formules, annotées d'explications, intervenant dans ce module est présenté en annexe 2.

2-2- Le modèle A-g_s

2-2-1- Description générale

Le modèle A-g_s (Jacobs, 1994) couple l'assimilation photosynthétique, A_n , à la conductance stomatique à l'échelle de la feuille, g_s . Ce type de modèle a été introduit par Goudriaan *et al.* (1985) qui ont mis en évidence, à l'échelle foliaire, une corrélation robuste entre le taux de photosynthèse des plantes et leur conductance stomatique. Dans ce modèle, beaucoup de paramètres sont étroitement liés à des variables micro-météorologiques, le rendant ainsi facilement applicable à des données issues de stations météorologiques locales (Jacobs *et al.*, 2003). De plus, dans le modèle A-g_s, les paramètres sont estimés empiriquement et sont basés sur des processus biochimiques (Jacobs *et al.* 2003). Ce modèle est robuste et peut être utilisé dans des modèles hydrologiques de méso-échelles (Ronda *et al.*, 2001). L'ensemble des formules permettant de décrire le fonctionnement du modèle est présenté en annexe 3.

2-2-2- Les processus biophysiques : la théorie

Le modèle A-g_s (Jacobs, 1994) décrit des phénomènes se produisant à l'échelle de la feuille. Ce modèle permet de calculer l'assimilation nette de CO₂ (A_n , en mg de CO₂ par m² de feuille par seconde) et la conductance stomatique foliaire (g_s , en mm.s⁻¹). Pour cela il requiert un certain nombre de variables climatiques (Rivalland, 2003) dont la densité de l'air, ρ_a (kg.m⁻³), la température de la feuille, T_s (°C), le déficit de saturation en vapeur d'eau entre la feuille et l'air à la surface de la feuille, D_s (g.kg⁻¹), le rayonnement global R_G (W.m⁻²) et la concentration en CO₂ à la surface de la

¹ Vapour Pressure Deficit

² Photosynthetically Active Radiation

feuille, C_s (ppm). Le flux de CO_2 à travers les feuilles est déterminé par la différence de concentration en CO_2 entre l'air turbulent à la surface des feuilles (C_s) et la concentration en CO_2 dans les sites de carboxylation internes aux feuilles. Ce processus de diffusion du CO_2 entre l'atmosphère et la plante est contrôlé, directement ou indirectement, dans le modèle par 4 conductances qui par leurs actions successives, conditionnent le taux de photosynthèse. On distingue (cf. Fig.5) : la conductance aérodynamique (g_a) de la couche limite foliaire (boundary layer), la conductance stomatique (g_{sc} pour le CO_2 et g_s pour la vapeur d'eau), la conductance cuticulaire (g_c), la conductance mésophyllienne (g_m) (Rivalland, 2003).

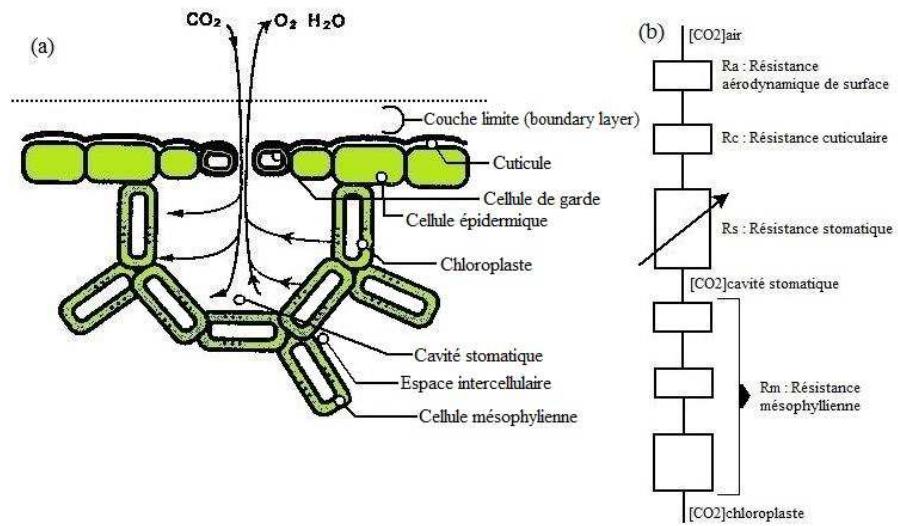


Figure 5 : Schéma d'une coupe transversale d'une feuille au niveau d'un stomate (a) et les différents types de résistance intra et extra-foliaire à la diffusion du CO_2 (b) (adapté de Lövenstein et al. (1995)¹⁾

→ Dans le modèle A- g_s , la conductance mésophyllienne est considérée comme le groupement d'un ensemble de résistances dérivant de processus physiques et chimiques complexes intervenant dans la diffusion de l'eau et du CO_2 au sein de la feuille (cf. Fig.5(b)). Il apparaît que g_m est un paramètre important pour la modélisation de l'assimilation photosynthétique (Rivalland, 2003). g_m sera donc considérée comme un paramètre d'ajustement du modèle, spécifique à chaque type de végétation.

2-2-3- Les apports du modèle A- g_s par rapport au module de Jarvis du modèle SiSPAT

L'approche de Jarvis-Stewart est fortement dépendante de fonctions empiriques qui dépendent des espèces végétales (Jacobs et al., 2003). En règle générale, la paramétrisation de type Jarvis, utilisé dans SiSPAT fournit de bonnes estimations quantitatives de la transpiration. Cependant, la réponse stomatique à l'humidité de l'air est simulée avec difficultés et requiert souvent une analyse approfondie des flux et des mesures de conductance stomatique *in situ* pour calibrer le modèle. En

¹ Lövenstein, H., Lantinga, E. A., Rabbinge, R., van Keulen, H., 1995. Les principes de la théorie de l'écologie de la production. Rapports du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS) N° 13, Wageningen. 181 pp. (<https://library.wur.nl/way/catalogue/documents/hel/RAP13/RAP13A.HTM>)

effet, on suppose que les différents facteurs environnementaux agissent indépendamment sur g_s alors que les mesures indiquent que de fortes interactions peuvent se produire (Collatz *et al.*, 1991 ; Jacobs, 1994). En outre, la valeur du LAI prescrite est souvent une estimation brute, qui ne tient pas compte des changements rapides dans le couvert végétal, associés à des événements climatiques (en particulier les sécheresses). Une autre limite de cette paramétrisation est l'absence de rétroaction de la concentration atmosphérique en CO₂, en particulier dans les études climatiques. En effet, une augmentation de la concentration en CO₂ induit une réponse physiologique des plantes par le biais d'une réduction de la conductance stomatique. Cet effet peut influencer les bilans d'eau et d'énergie de surface à différentes échelles de l'évolution de la concentration en CO₂ : diurne ou saisonnière par exemple (Calvet *et al.*, 1998). C'est pourquoi, les paramètres physiologiques liés à la concentration en CO₂, prenant en compte ses effets, utilisés dans le modèle A-g_s, semblent plus appropriés que les paramètres du module de Jarvis. Ceci est particulièrement vrai pour des simulations de changements climatiques où la rétroaction CO₂-climat-végétation a besoin d'être décrite (Betts *et al.*, 1997). Dans ce type d'étude, l'impact fertilisant de l'augmentation de la concentration en CO₂ (autrement dit une hausse du LAI) et l'effet du climat en général (précipitations, température, humidité de l'air, rayonnement solaire, etc.) doit être incluse dans l'approche de modélisation choisie (Monteith, 1995 ; Sellers *et al.*, 1996 ; Carlson et Bunce, 1996).

3- Inclusion du modèle A-g_s dans SiSPAT

3-1- Principe du couplage

Le principe de base de ce couplage est simple : le modèle A-g_s a été codé dans le même langage numérique que le modèle SiSPAT, afin que chaque « appel » au module de Jarvis soit remplacé par le modèle A-g_s.

3-2- Un exemple de modèle SVAT couplé à un modèle de fonctionnement de la végétation : le modèle ISBA-A-g_s

Le modèle ISBA¹ (Noilhan et Planton, 1989) est un modèle SVAT développé et utilisé par Météo-France. Le modèle « standard » a été modifié par Calvet *et al.* (1998), de façon à prendre en compte l'effet de la concentration atmosphérique en CO₂ sur la résistance stomatique (R_s). Le modèle A-g_s proposé par Jacobs *et al.* (1996) a été utilisé pour décrire les processus photosynthétiques et leur couplage avec la résistance stomatique. Ce couplage fournit une meilleure estimation de la conductance stomatique (g_s). Ce modèle permet désormais de relier cette conductance d'un type de végétation à son assimilation photosynthétique nette (A_n) calculée selon le

¹ Interaction entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère

formalisme de Collatz *et al.* 1991. De plus, grâce à un modèle simple de croissance de la végétation, l'assimilation nette en carbone de la plante (ou photosynthèse) est convertie en surface foliaire afin de prédire l'évolution du LAI. Ainsi ce dernier n'est plus simplement prescrit comme une entrée dans le modèle mais peut être simulé comme une sortie (Rivalland, 2003). Quelques applications existantes de ce modèle couplé sont présentées en annexe 3.

3-3- Premières réflexions à l'application du modèle

Préambule : Cette partie consiste en une réflexion autour de l'établissement des scénarios en lien avec l'évolution des pratiques agropastorales. L'objectif est ici de s'interroger sur les réponses attendues, en termes de LAI, des deux écosystèmes pilotes face à cette évolution. Notons que nous ne développerons qu'un seul exemple de scénario par écosystème, mais d'autres sont à l'étude (réduction des périodes de jachère, effets des ravageurs, cultures associées...).

Certains travaux déjà cités (Seghieri *et al.*, 2005 ; Wezel *et al.*, 2000) ont souligné l'importance des arbustes (le guiera essentiellement) dans la fertilité des sols et donc indirectement le rendement des cultures. Nous souhaitons donc associer un scénario à ce constat, en testant la réponse, en termes de LAI, du champ de mil en cas d'arrachage des arbustes. Comme le montre la figure 6, compte tenue de l'effet bénéfique des souches de guiera, leur arrachage hypothétique devrait engendrer une chute de LAI sur l'écosystème « mil » simulé.

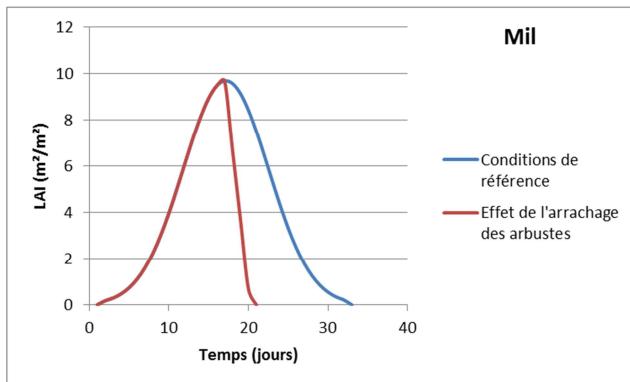


Figure 6 : Évolution plausible du LAI d'un champ de mil sous l'effet de l'arrache des espèces associées

Comme nous avons pu le souligner, les travaux de Hiernaux *et al.* (2009b) et Achard et Banoin (2003) montrent que l'augmentation de la pression de pâture, significativement observée au Sahel, diminue la croissance et le rendement des plantes. Ainsi s'il on s'intéresse à l'influence de cette évolution pastorale sur le site pilote de jachère arbustive, on peut s'attendre à de brusques ruptures de croissance dues au broutage, comme l'illustre la figure 7.

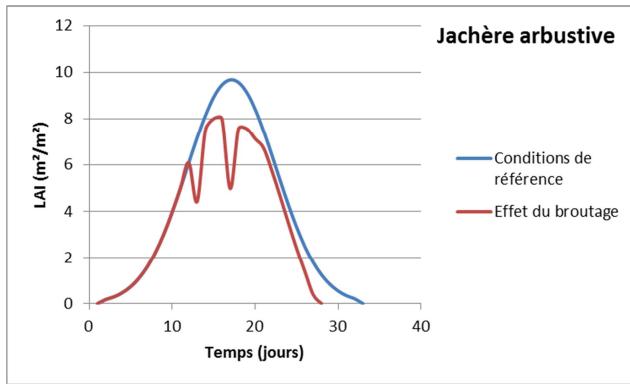


Figure 7 : Évolution plausible du LAI d'une jachère arbustive sous l'effet du broutage par le bétail

Toutefois, il ne faut pas omettre les apports de fumure que génère le bétail sur ces écosystèmes. Cet engrais naturel favorise la croissance des plantes ; on peut donc imaginer que ces apports compensent par exemple les pertes de biomasse par broutage. Cependant cette compensation devrait être décalée dans le temps, du fait du délai d'assimilation des nutriments par le sol puis par les plantes.

L'établissement de ces scénarios nous amène également à nous projeter sur la paramétrisation du modèle. Dans le modèle A-g_s, les valeurs utilisées pour les principaux paramètres dépendent de l'espèce végétale considérée et notamment de son appartenance au groupe des C₃ ou des C₄ (cf. Tab.1) (Jacobs, 1994 ; Calvet et al., 1998, Rivalland, 2003).

Tableau 1 : Valeurs standards des paramètres du modèle A-g_s (extrait de Calvet et al. (1998) ; d'après Jacobs, (1994))

Type	Paramètres	X(@ 25)	Q ₁₀	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)
C ₃	ε_0 (mg.J ⁻¹)	0.017	—	—	—
	f_0	0.85	—	—	—
	Γ (ppm)	4.5	1.5	—	—
	g_m (m.s ⁻¹)	7	2.0	5	28
	A _{m,max} (mg.m ⁻² .s ⁻¹)	2.2	2.0	8	38
C ₄	ε_0 (mg.J ⁻¹)	0.014	—	—	—
	f_0	0.50	—	—	—
	Γ (ppm)	2.8	1.5	—	—
	g_m (m.s ⁻¹)	17.5	2.0	13	36
	A _{m,max} (mg.m ⁻² .s ⁻¹)	1.7	2.0	13	38

Les valeurs de Q₁₀, T₁ et T₂ modulent la sensibilité de chaque paramètre à la température (cf. annexe 3). X(@25) correspond à la valeur des paramètres à 25°C.

Des valeurs de paramètres du modèle A-g_s utilisées dans la littérature, pour des espèces végétales typiquement sahariennes (le guiera notamment), sont présentées en annexe 5. Néanmoins, ces recherches bibliographiques méritent d'être poursuivies car nous n'avons trouvé à ce jour aucune information concernant le calage des paramètres du modèle pour le mil, une graminée de type C₄.

Conclusion

Le programme AMMA-Catch a permis de collecter des données expérimentales sur les variables clés des cycles de l'eau, de l'énergie et de la végétation dans la région sahélienne de Niamey, au Niger. Plusieurs études récentes ont confirmé l'existence d'un paradoxe hydrologique : les précipitations sont globalement en baisse alors que la ressource en eau disponible augmente. En réalité, le changement d'occupation du sol joue un rôle prépondérant : le recul progressif de la végétation naturelle au profit des cultures impact plus fortement la disponibilité de la ressource en eau que le déficit pluviométrique observé en Afrique de l'Ouest depuis les années 1970. Ce constat souligne l'importance des processus de surface dans le cycle hydrologique, d'où l'intérêt d'étudier les processus physiques intervenant dans les transferts d'énergie et d'eau à l'interface Sol-Végétation-Atmosphère. Les différents travaux réalisés sur le site ont permis de considérablement améliorer notre connaissance de ces processus sur le site d'étude via l'utilisation d'un modèle numérique de type SVAT : SiSPAT.

Si ce modèle reste très représentatif des phénomènes atmosphériques et de surface de par sa paramétrisation lourde, la représentation de la végétation reste relativement simple. C'est donc dans un souci d'amélioration du module végétation que le modèle SiSPAT a été couplé à un modèle d'assimilation photosynthétique et de conductance stomatique permettant de mieux décrire le fonctionnement de la végétation : A-g_s. Les utilisations antérieures de ce modèle ont montré qu'il pouvait être couplé à un modèle de type SVAT, et ainsi permettre d'améliorer l'étude de la conductance stomatique et des flux de carbone à travers la prise en compte des mécanismes de la photosynthèse.

Ce travail bibliographique nous permet d'introduire le travail de stage qui sera réalisé par la suite (cf. annexe 6 pour le calendrier prévisionnel de déroulement du stage). Celui-ci se divisera en deux étapes. La première consistera à caler et à valider la nouvelle version du modèle couplé à partir de la série pluriannuelle de données acquises sur le site de Wankama au Niger, sur la période 2005-2013 et pour les deux écosystèmes clés de la zone : un champ de mil et une jachère arbustive. L'étalonnage et la validation de ce type de modèle en milieu sahélien n'ayant encore jamais été réalisés. La deuxième étape consistera à préparer l'intégration au modèle d'un module d'allocation de carbone entre les différents compartiments de la plante. Cette intégration nous permettra d'aborder dans un second temps la question de la sensibilité du modèle au LAI. Cette étape de préparation repose sur l'observation de l'impact du LAI sur la photosynthèse, le cycle de l'eau et les variables simulées en se plaçant dans un contexte plausible d'évolution des pratiques agropastorales sous contrainte des changements climatiques et anthropiques

Bibliographie

- Abeygunawardena, P., Vyas, Y., Knill, P., Foy, T., Harrold, M., Steele, P., Tanner, T., Hirsch, D., Oostermen, M., Rooimans, J., Debois, M., Lamin, M., Liptow, H., Mausolf, E., Verheyen, R., Agrawala, S., Gaspari, G., Paris, R., Kashyap, A., Sharma, R., Mathur, A., Sharma, M., Sperling, F., 2002. Pauvreté et changements climatiques. Réduire la vulnérabilité des populations pauvres par l'adaptation. Commission européenne, 56 pp.
- Achard, F. et Banoin, M., 2003. Fallows, forage production and nutrient transfers by livestock in Niger. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 65 (2), 183-189.
- Albergel, C., Calvet, J.-C., Gibelain, A.-L., Lafont, S., Roujean, J.-L., Berne, C., Traullé, O., Fritz, N., 2010. Observed and modelled ecosystem respiration and gross primary production of a grassland in southwestern France. *Biogeosciences*, 7 (5), 1657-1668.
- Ambouta, J.-M. K., Valentin, C., Laverdière, M. R., 1996. Jachères et croûtes d'érosion au Sahel. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 7 (4), 269-275.
- Arora, V. K., 2002. Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. *Reviews of Geophysics*, 40 (2), 1006.
- Batiano, A. et Mokwunye, A. U., 1991. Role of manure and crop residues in alleviating soil fertility constraints to crop production: With special reference to the Sahelian and Soudanian zones of West Africa. *Fertilizer Research*, 29 (1), 117-125.
- Betts, R. A., Cox, P. M., Lee, S. E., Woodward, F. I., 1997. Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations. *Nature*, 387 (6635), 796-799.
- Boulain, N., Cappelaere, B., Ramier, D., Issoufou, H. B.-A., Halilou, O., Seghieri, J., Guillemin, F., Oï, M., Gignoux, J., Timouk, F., 2009. Towards an understanding of coupled physical and biological processes in the cultivated Sahel - 2. Vegetation and carbon dynamics. *Journal of Hydrology*, 375 (1-2), 190-203.
- Boulet, G., 1999. Modélisation des changements d'échelle et prise en compte des hétérogénéités de surface et de leur variabilité spatiale dans les interactions sol-végétation-atmosphère. Thèse de doctorat, Université de Joseph Fourier, Grenoble, France, 216 pp.

- Boulet, G., Braud, I., Vauclin, M., 1997. Study of the mechanisms of evaporation under arid conditions using a detailed model of the soil-atmosphere continuum. Application to the EFEDA I experiment. *Journal of Hydrology*, 193 (1-4), 114-141.
- Boulet, G., Chehbouni, A., Braud, I., Vauclin, M., 1999. Mosaic versus dual source approaches for modelling the surface energy balance of a semi-arid land. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3 (2), 247-258.
- Boutrais, J., 2007. Crises écologiques et mobilités pastorales au Sahel: Les Peuls du Dallol Bosso (Niger). *Sécheresse*, 18 (1), 5-12.
- Braud I., Dantas-Antonio, A. C., Vauclin, M., Thony, J.-L., Ruelle, P., 1995. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SiSPAT) development and field verification. *Journal of hydrology*, 166 (3-4), 213-250.
- Braud, I., 2000. SiSPAT User's Manual : SiSPAT, a numerical model of water and energy fluxes in the soil-plant-atmosphere continuum, Version 3.0. LTHE, Grenoble, France, 107 pp.
- Braud, I., Bessemoulin, P., Monteny, B., Sicot, M., Vandervaere, J.P., Vauclin, M., 1997. Unidimensional modelling of a fallow savannah during the HAPEX-Sahel experiment using the SiSPAT model. *Journal of Hydrology*, 188-189, 912-945.
- Calvet, J.-C., 2000. Investigating soil and atmospheric plant water stress using physiological and micrometeorological data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103 (3), 229-247.
- Calvet, J.-C., Gibelin, A.-L., Roujean, J.-L., Martin, E., Le Moigne, P., Douville, H., Noilhan, J., 2008. Past and future scenarios of the effect of carbon dioxide on plant growth and transpiration for three vegetation types of southwestern France. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 397-406.
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J.-L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., Wigneron, J.-P., 1998. An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92 (2), 73-95.
- Calvet, J.-C., Rivalland, V., Picon-Cochard, C., Guehl, J.-M., 2004. Modelling forest transpiration and CO₂ fluxes-response to soil moisture stress. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124 (3-4), 143-156.

- Calvet, J.-C., Soussana, J.-F., 2001. Modelling CO₂-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108 (2), 129-152.
- Campbell, G. S., 1985. Soil physics with BASIC : transport models for soil-plant systems. Elsevier, Amsterdam, 150 pp.
- Cappelaere, B., Descroix, L., Lebel, T., Boulain, N., Ramier, D., Laurent, J.-P., Favreau, G., Boubkraoui, S., Boucher, M., Bouzou Moussa, I., Chaffard, V., Hiernaux, P., Issouffou, H. B.-A., Le Breton, E., Mamadou, I., Nazoumou, Y., Oï, M., Ottlé, C., Quantin, G., 2009. The AMMA-Catch experiment in the cultivated Sahelian area of south-west Niger - Investigation water cycle response to a fluctuating climate and changing environment. *Journal of Hydrology*, 375 (1-2), 34-51.
- Carlson, T. N. et Bunce, J. A., 1996. Will a doubling of atmospheric carbon dioxide concentration lead to an increase or a decrease in water consumption by crops? *Ecological modelling*, 88 (1-3), 241-246.
- Casenave, A. et Valentin, C., 1992. A runoff capacity classification system based on surface features criteria in semiarid areas of West Africa. *Journal of Hydrology*, 130 (1-4), 231-249.
- Choudhury, B. J. et Idso, S. B., 1985. An empirical model for stomatal resistance of field grown wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36 (1), 65-82.
- Cissé, A. M., 1986. Dynamique de la strate herbacée des pâturage de la zone sud-sahélienne. Thèse de doctorat, Landbouw Universiteit, Wageningen, The Netherlands, 211 pp.
- Collatz, G. J., Ball, J. T., Grivet, C., Berry, J. A., 1991. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agriculture and Forest Meteorology*, 54 (2-4), 107-136.
- Collatz, G. J., Ribas-Carbo, M., Berry, J. A., 1992. Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C₄ plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, 19 (5), 519-538.
- Dahan Dalmedico A. et Guillemot, H., 2006. Changement climatique: Dynamiques scientifiques, expertise, enjeux géopolitiques. *Sociologie du travail*, 48 (3), 412-432.
- de Rouw, A. et Rajot, J.-L., 2004. Nutrient availability and pearl millet production in Sahelian farming systems based on manuring or fallowing. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104 (2), 249-262.

- Deardoff, J. W., 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83 (C4), 1889-1903.
- Demarty, J., 2001. Développement et application du modèle SiSPAT-RS à l'échelle de la parcelle dans le cadre de l'expérience Alpilles ReSeDA. Thèse de Doctorat, Université Denis Diderot (Paris 7), France, 216 pp.
- Demarty, J., Ottlé, C., Braud, I., Olioso, A., Frangi, F. P., Bastidas, L. A., Gupta, H. V., 2004. Using a multiobjective approach to retrieve information on surface properties used in a SVAT model. *Journal of Hydrology*, 287 (1-4), 214-236.
- Do, F., Winkel, T., Cournac, L., Louguet, P., 1996. Impact of late-season drought on water relations in a sparse canopy of millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). *Field Crops Research*, 48 (2-3), 103-113.
- El-Sharkawy, M. A., Cock, J. H., Held, K. A. A., 1984. Water use efficiency of Cassava. II. Differing sensitivity of stomata to air humidity in Cassava and other warm-climate species. *Crop science*, 24 (3), 503-507
- FAO, 2001. Country Pasture/Forage Resource Profiles in Niger.
- Farquhar, G. D., Von Caemmerer, S., Berry, J. A., 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149 (1), 78-90.
- Favreau, G., 2000. Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du kori de Dantiandou (sud-ouest Niger). Thèse de doctorat, Université Paris XI, Orsay, France, 348 pp.
- Favreau, G., Cappelaere, B., Massuel, S., Leblanc, M., Boucher, M., Boulain, N., Leduc, C., 2009. Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: a review. *Water Resources Research*, 45 (W00A16), 1-18.
- Favreau, G., Leduc, C., Marlin, C., Dray, M., Taupin, J.-D., Massault, M., La Salle, C. L. G., Babic, M., 2005. Estimate of recharge of a rising water table in semiarid Niger from 3H and 14C modelling. *Ground Water*, 40 (2), 144-151.
- Federer, C. A., 1979. A soil-plant-atmosphere model for transpiration and availability of soil water. *Water Resources Research*, 15 (3), 555-562.

- Flerchinger, G. N. et Pierson, F. B., 1991. Modelling plant canopy effects on variability of soil temperature and water. *Agricultural and Forest Meteorology*, 56 (3-4), 227-246.
- Franks, S.-W., Beven, K.-J., Quinn, P.-F., Wright, I.-R., 1997. On the sensitivity of soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) schemes: equifinality and the problem of robust calibration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86, 63-75.
- Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Roujeau, J.-L., Jarlan, L., Los, S. O., 2006. Ability of the land surface model ISBA-Ag_s to simulate leaf area index at the global scale : Comparison with satellites products. *Journal of Geophysical Research*, 111, 1109-1124
- Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Viovy, N., 2008. Modelling energy and CO₂ fluxes with an interactive vegetation land surface model — Evaluation at high and middle latitudes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (10), 1611-1628.
- Gonzales-Sosa, E., Braud, I., Thony, J.-L., Vauclin, M., Calvet, J.-C., 2001. Heat and water exchanges of fallow land covered with a plant-residue mulch layer : a modelling study using the three year MUREX data set. *Journal of Hydrology*, 244 (3-4), 119-136.
- Gonzalez-Sosa, E., Mastachi-Loza, C., Medina-Frutos, C., Ramos-Salinas, N. M., 2012. Modeling of Water balance in semiarid region of Mexico. EGU General Assembly Conference Abstracts, Vol. 14.
- Goudriaan, J., Van Laar, H. H., Van Keulen, H., Louwerse, W., 1985. Photosynthesis, CO₂ and plant production. In: Day, W., Atkin, R. K. (Eds.), Wheat growth modelling. NATO ASI Series, Series A, vol. 86. Plenum Press, New York. 107-122 pp.
- Guengant, J. P., Banoin, M., Quesnel, A., 2003. Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers: le cas du Niger. CIRED, Comité international de coopération dans les recherches nationales en démographie. 144 pp.
- Hiernaux, P., 1998. Effects of grazing on plant species composition and spatial distribution in rangelands of the Sahel. *Plant Ecology*, 138 (2), 191-202.
- Hiernaux, P., Ayantunde, A., Kalilou, A., Mougin, E., Gérard, B., Baup, F., Grippa, M., Djaby, B., 2009a. Trends in productivity of crops, fallow and rangelands in Southwest Niger: Impact of land use, management and variable rainfall. *Journal of Hydrology*, 375 (1-2), 65-77.
- Hiernaux, P. et Le Houérou, H. N., 2006. Les parcours du Sahel. *Sécheresse*, 17 (1-2), 51-71.

- Hiernaux, P., Mougin, E., Diarra, L., Soumaguel, N., Lavenu, F., Tracol, Y., Diawara, M., 2009b. Sahelian rangeland response to changes in rainfall over two decades in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology*, 375 (1-2), 114-127
- Hiernaux, P. et Turner, M. D., 1996. The effect of clipping on growth and nutrient uptake of sahelian annual rangelands. *Journal of Applied Ecology*, 33 (2), 387-399.
- Ichoua, A., 2000. Dynamique et productivité des structures forestières contractées des plateaux de l'Ouest nigérien. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 231 pp.
- Jacobs, A. F. G., Ronda, R. J., Holtlag, A. A. M., 2003. Water vapour and carbon dioxide fluxes over bog vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116 (1-2), 103-112.
- Jacobs, C. M. J., 1994. Direct impact of atmospheric CO₂ enrichment on regional transpiration. Ph.D. Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 179 pp.
- Jacobs, C. M. J., Van den Hurk, B. J. J. M., de Bruin, H. A. R., 1996. Stomatal behaviour and photosynthetic rate of unstressed grapevines in semi-arid conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80 (2-4), 111-134.
- Jarvis, P. G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 273 (927), 593-610.
- Ji, X., Kang, E., Zhao, W., Zhang, Z., Jin, B., 2009. Simulation of heat and water transfer in a surface irrigated, cropped sandy soil. *Agricultural Water Management*, 96 (6), 1010-1020.
- Lacaze, X., 2003. Modélisation du bilan hydrique sur une zone de forte infiltration au Sahel — Cas du bassin versant de Wankama. DEA, ENGREF, France, 66 pp.
- Le Houérou H. N., 1997. Biodiversité végétale et ressources génétiques en Afrique. *Sécheresse*, 8 (2), 117-22.
- Lebel, T. C., 2009. AMMA-Catch studies in the Sahelian region of West-Africa: an overview. *Journal of Hydrology*, 375 (1-2), 3-13.
- Lebel, T. et Ali, A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, 375 (1-2), 52-64.

- Leblanc, M. J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S. O., Loireau, M., Cappelaere, B., 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel : SW Niger. *Global and Planetary Change*, 61 (3-4), 135-150.
- Leduc, C., Favreau, G., Schroeter, P., 2001. Long-term in a Sahelian water-table: the Continent Terminal in South-West Niger. *Journal of Hydrology*, 243 (1-2), 43-54.
- Leuning, R., 1995. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthetic model for C₃ plants. *Plant Cell and Environment*, 18 (4), 339-355.
- Lynn, B. et Carlson, T. N., 1990. A stomatal resistance model illustrating plant versus external control of transpiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52 (1-2), 5-43.
- Massuel, S., 2005. Evolution récente de la ressource en eau consécutive aux changements climatiques et environnementaux du sud-ouest Niger: Modélisation des eaux de surface et souterraine du bassin du kori de Dantianou sur la période 1992-2003. Thèse de Doctorat, Université Montpellier 2, France, 220 pp.
- Massuel, S., Cappelaere, B., Favreau, G., Leduc, C., Lebel, T., Vischel, T., 2011. Integrated surface water-groundwater modelling in the context of increasing water reserves of a regional Sahelian aquifer. *Hydrological Sciences Journal*, 56 (7), 1242-1264.
- Mastachi-Loza, C., 2010. Adaptación de un modelo de balance hídrico a un ambiente semiárido (Adaptation d'un modèle de bilan hydrique à un environnement semi-aride). Thèse de doctorat, Université de Quérétaro, Mexique, 256 pp.
- Monteith, J., 1995. A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant Cell and Environment*, 18 (4), 357-364.
- Moret, D., Braud, I., Arrué, J., 2007. Water balance simulation of a dryland soil during fallow under conventional and conservation tillage in semiarid Aragon, Northeast Spain. *Soil and Tillage Research*, 92 (1-2), 251-263.
- Noilhan, J. et Planton, S., 1989. A simple parameterisation of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117 (3), 536-549.
- OCDE/CSAO, 2008. Climat, changements climatiques et pratiques agro-pastorales en zone sahélienne. Synthèse régionale. 8 pp.

- Overgaard, J., Rosbjerg, D., Butts, M.B., 2006. Land-surface modelling in hydrological perspective - a review. *Biogeosciences*, 3 (2), 229-241.
- Pieri, C., 1989. Fertilité des terres de savanes: bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara. Ministère de la Coopération, CIRAD-IRAT, Paris, France, 44 pp.
- Redelsperger, J.-L., Diedhiou, A., Flamant, C., Janicot, S., Lafore, J.-P., Lebel, T., Polcher, J., Bourles, B., Caniaux, G., De Rosnay, P., Desbois, M., Eymard, L., Fontaine, B., Geneau, I., 2006. AMMA, une étude multidisciplinaire de la mousson ouest-africaine. *La Météorologie*, 54, 22-32.
- Rivalland, V., 2003. Amélioration et validation du modèle de fonctionnement de la végétation ISBA-A-gs: Stress hydrique et flux de CO₂. Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 (Paul Sabatier), France, 232 pp.
- Rockström, J. et de Rouw, A., 1997. Water nutrients and slope position in on-farm pearl millet cultivation in the Sahel. *Plant and Soil*, 195 (2), 311-327.
- Ronda, R. J., De Bruin, H. A. E., Holtslag, A. A. M., 2001. Representation of the canopy conductance in modelling the surface energy budget for low vegetation. *Journal of Applied Meteorology*, 40 (8), 1431-1444.
- Seghieri, J., Simier, M., Mahamane, A., Hiernaux, P., Rambal, S., 2005. Adaptative above-ground biomass, stand density and leaf water potential to droughts and clearing in Guiera senegalensis, a dominant shrub in Sahelian fallows (Niger). *Journal of Tropical Ecology*, 21, 203-213.
- Séguis, L., Cappelaere, B., Milesi, G., Peugeot, C., Massuel, S., Favreau, G., 2004. Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment. *Hydrological Processes*, 18 (17), 3401-3413.
- Sellers, P. J., Bounouaa, L., Collatz, G. J., Randall, D. A., Dazlich, D. A., 1996. Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate. *Science*, 271, 1402-1406.
- Sellers, P. J., Mintz, Y., Sud, Y. C., Dalcher, A., 1986. A Simple Biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43 (6), 505-530.

- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., Portmann, F. T., 2010. Groundwater use for irrigation — A global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7 (3), 3977-4021.
- Stewart, J. B., 1988. Modelling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43 (1), 19-35.
- Taconet, O., Bernard, R., Vidal-Madjar, D., 1986. Evapotranspiration over an agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 25 (3), 284-307.
- Torou, B. M., Favreau, G., Barbier, B., Pavelic, P., Illou, M., Sidibé, F., 2013. Constraints and opportunities for groundwater irrigation arising from hydrologic shifts in the Iullemmeden Basin, south-western Niger. *Water International*, 38 (4), 465-479.
- Turner, M., 2000. Drought, Domestic Budgeting and Wealth Distribution in Sahelian Households. *Development and Change*, 31 (1), 1009-1035.
- Turner, M. D., Hiernaux, P., Schlecht, E., 2005. The Distribution of Grazing Pressure in Relation to Vegetation Resources in Semi-arid West Africa : The Role of Herding. *Ecosystems*, 8 (6), 668-681.
- Valentin, C., Rajot, J.-L., Mitja, D., 2004. Responses of soil crusting, runoff and erosion to fallowing in the sub-humid and semi-arid regions of West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104 (2), 287-302.
- Van de Griend, A. A. et Van Boxel, J. H., 1989. Water and surface energy balance model with a multilayer canopy representation for remote sensing purposes. *Water Resources Research*, 25, 949-971.
- Van Heemst, 1986. Potential crop production. In: H. Van Keulen et J. Wolf (Eds), Modelling of agricultural production: weather, soil and crops. Simulation Moographs. Pudoc, Wageningen.
- Velluet, C., 2014. Modélisation et analyse pluriannuelles du fonctionnement hydrologique et énergétique de deux écosystèmes dominants au Sahel agropastoral (Sud-Ouest Niger). Thèse de doctorat, Université Montpellier 2, France, 286 pp.
- Velluet, C., Demarty, J., Cappelaere, B., Braud, I., Issoufou, H. B.-A., Boulan, N., Ramier, D., Mainassara, G., Charvet, G., Boucher, M., Chazarin, J.-P., Oï, M., Yahou, H., Maidaji, B.,

- Arpin-Pont, F., Benarrosh, N., Mahamane, A., Nazoumou, Y., Favreau, G., Seghieri, J., 2014. Building a field- and model-based climatology of local water and energy cycles in the cultivated Sahel — Annual budgets and seasonality. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 4753-4808.
- Verhoef, A., 1995. Surface Energy Balance of Shrub Vegetation in the Sahel. PhD-thesis, Department of Meteorology, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 247 pp.
- Verhoef, A. et Allen, S. J., 2000. A SVAT scheme describing energy and CO₂ fluxes for multi-component vegetation : calibration and test for a Sahelian savannah., . *Ecological modelling*, 127 (2-3), 245-267.
- Vischel, T., 2006. Impact de la variabilité pluviométrique de méso-échelle sur la réponse des systèmes hydrologiques sahéliens : modélisation, simulation et désagrégation. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, France, 289 pp.
- Wezel, A., Rajot, J.-L., Herbrig, C., 2000. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-systems in semi-arid Niger. *Journal of Arid Environments*, 44 (4), 383-398.

Liste des figures

Figure 1 : Schéma des interactions Cycle hydro-énergétique — Végétation — Climat	3
Figure 2 : Localisation des différents types de climat et de végétation en Afrique de l’Ouest (gradient éco-climatique latitudinal) et des différents sites AMMA-CATCH (extrait de Velluet, (2014)).....	5
Figure 3 : Photographies illustrant chacun des principaux couverts végétaux présents sur le site AMMA-Catch Niger, prises sous deux angles de vue différents : vue aérienne (source : J.-L. Rajot) et vue frontale (source : équipe AMMA-Catch Niger, HSM) (extrait de Velluet, (2014))	7
Figure 4 : Description des échanges d’énergie au sein du module d’interface Sol-Plante-Atmosphère (extrait de Velluet (2014))	13
Figure 5 : Schéma d’une coupe transversale d’une feuille au niveau d’un stomate (a) et les différents types de résistance intra et extra-foliaire à la diffusion du CO ₂ (b) (adapté de Lövenstein et <i>al.</i> (1995)).....	15
Figure 6 : Évolution plausible du LAI d’un champ de mil sous l’effet de l’arrache des espèces associées.....	17
Figure 7 : Évolution plausible du LAI d’une jachère arbustive sous l’effet du broutage par le bétail	18

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs standards des paramètres du modèle A-gs (extrait de Calvet <i>et al.</i> (1998) ; d'après Jacobs, (1994))	18
--	----

Liste des acronymes

ACN : AMMA-CATCH Niger

AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

AMMA-Catch : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine — Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique

CSAO : Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest

EFEDA : ECHIVAL Field Experiment in Desertification-threatened Areas

FAO : Food and Agriculture Organization

GWP : Global Soil Wetness Project

HAPEX-Sahel : Hydrologic-Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel

HSM : HydroSciences Montpellier

ISBA : Interaction entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère

ISBA-CC : Interaction entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère — Carbon Cycle

LTHE : Laboratoire d'études des Transferts en Hydrologie et Environnement

MODIS : MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

MOA : Mousson Ouest Africaine

MUREX : Monitoring the Usable soil Reservoir Experimentally

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économiques

ONERA : Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales

ORE : Observatoire de Recherche pour l'Environnement

PAR : Photosynthetically Active Radiation

ReSeDa : Remote Sensing Data Assimilation

SALSA : Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere

SiSPAT : Simple Soil-Plant-Atmosphere Transfer model

SMOSREX : Surface Monitoring Of the Soil Reservoir EXperiment

SVA : Sol-Végétation-Atmosphère

SVAT : Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer

TSVA : Transfert Sol-Végétation-Atmosphère

VPD : Vapour Pressure Deficit

Liste des symboles

ε	Emissivité du sol et de la végétation	—
Γ	Point de compensation	$\mu\text{mol}.\text{mol}^{-1}$
ρ_a	Densité de l'air au voisinage de la surface	$\text{kg}.\text{m}^{-3}$
$A_{m,\max}$	Taux de photosynthèse nette maximale de la végétation	$\text{mg}_{\text{CO}_2}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
A_n	Taux de photosynthèse nette de la végétation	$\text{mg}_{\text{CO}_2}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
C_i	Concentration intra-stomatique en dioxyde de carbone	ppm
C_{min}	Valeur de C_i en condition de stress atmosphérique extrême	ppm
C_s	Concentration atmosphérique en dioxyde de carbone à la surface des feuilles	ppm
D_{max}	Déficit maximum de saturation en vapeur d'eau toléré par la plante	$\text{g}.\text{kg}^{-1}$
D_s	Déficit de saturation en vapeur d'eau	$\text{g}.\text{kg}^{-1}$
ET_0	Évapotranspiration annuelle de référence	mm/an
f	Coefficient de plasticité de la végétation	$\text{m}^2.\text{kg}^{-1}$
f_0	Rapport optimal entre les concentrations C_i et C_s	—
g_a	Conductance aérodynamique	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
g_c	Conductance cuticulaire	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
g_m	Conductance mésophyllienne	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
g_s	Conductance stomatique	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
g_{sc}	Conductance stomatique pour le CO_2	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
h_f	Potentiel hydrique foliaire	m
h_{fc}	Potentiel hydrique foliaire critique	m
I_a	Rayonnement global incident photosynthétiquement actif	$\text{W}.\text{m}^{-2}$
LAI	Leaf Area Index (indice foliaire)	$\text{m}^2.\text{m}^{-2}$
M_{air}	Masse de l'air	$\text{g}.\text{mol}^{-1}$
M_{H2O}	Masse de l'eau	$\text{g}.\text{mol}^{-1}$
R_G	Flux radiatif solaire incident	$\text{W}.\text{m}^{-2}$
R_s	Résistance stomatique	$\text{s}.\text{m}^{-1}$
$R_{st\ max}$	Maximum de résistance stomatique	$\text{s}.\text{m}^{-1}$
$R_{st\ min}$	Minimum de résistance stomatique	$\text{s}.\text{m}^{-1}$
T_s	Température de surface	$^{\circ}\text{C}$
T_1	Température de référence dans les équations de photosynthèse	$^{\circ}\text{C}$
T_2	Température de référence dans les équations de photosynthèse	$^{\circ}\text{C}$

Glossaire

Conductance cuticulaire (g_c) : La cuticule est une couche cireuse recouvrant les cellules épidermiques des feuilles, peu perméables au CO₂ et à l'eau. La conductance cuticulaire correspond à la résistance à la diffusion de vapeur d'eau et de CO₂ au travers de la cuticule foliaire, en dehors de la voie stomatique normale (Rivalland, 2003).

Conductance mésophylienne (g_m) : La conductance mésophylienne décrit le transport du CO₂ entre la cavité stomatique et les sites de carboxylation, c'est-à-dire les tissus internes des feuilles comportant des cellules photosynthétiques à chloroplastes à granum (Rivalland, 2003).

Conductance stomatique (g_s) : Les stomates sont des pores situés sous l'épiderme des feuilles permettant les circulations gazeuses entre l'extérieur de la feuille et les cavités séparant les cellules mésophyliennes. Les pores sont formés de cellules de garde capables de réguler leur ouverture ou fermeture. La conductance stomatique permet de décrire la diffusion gazeuse au travers des pores stomatiques. Sa valeur est fonction de l'ouverture ou de la fermeture de ces pores et contrôle l'essentiel des échanges de gaz, principalement CO₂ et H₂O entre la feuille et l'air (Rivalland, 2003).

Plante en C₃ : Plante pour laquelle, durant les processus de photosynthèse, la première molécule formée à partir du gaz carbonique contient trois atomes de carbone (Rivalland, 2003).

Plante en C₄ : Plante pour laquelle, durant les processus de photosynthèse, la première molécule formée à partir du gaz carbonique est un acide à quatre atomes de carbone (Rivalland, 2003).

Point de compensation (Γ) : Le point de compensation correspond à la concentration en CO₂ au-dessus de laquelle la plante est incapable de fixer le CO₂ atmosphérique. Il est d'autant plus élevé que la photorespiration est active. Il est très faible chez les plantes en C₄ (Rivalland, 2003).

Technique de « zaï » : La méthode des poches d'eau, encore appelée zaï (ou zay), est une technique traditionnelle réhabilitée au Yatenga (nord du Burkina Faso) entre 1982 et 1984, à la suite des années de sécheresse. Le zaï signifie en moré « se lever tôt et se hâter pour préparer sa terre » ou encore « casser et émietter la croûte du sol avant les semis ». Des micro-bassins de 10 à 20 cm ou encore 20 à 40 cm de diamètre, de 10 à 15 cm de profondeur et distants de 0,5 à 1 m sont creusés en saison sèche, enrichis en fumier, recouverts d'une pellicule de terre et ensemencés lors des premières pluies. L'eau qui se concentre et s'infiltre offre aux graines un sol humide : la plante germe, lève rapidement et s'enracine bien ; à l'état de plantule, elle est protégée contre le vent. Cette technique est aussi un

moyen d'éviter les croûtes de battance (la formation d'une croûte de battance supprime toute infiltration des eaux de pluie et déclenche rapidement le ruissellement) (OCDE/CSAO, 2008).

Technique de la demi-lune : La technique de la demi-lune est une variante de la méthode des zaï : un trou en contre-pente est creusé, les déblais donnent le remblai arqué à l'amont suivant les courbes de niveau. Les demi-lunes sont disposées en courbes de niveau, en quinconce et recueillent le ruissellement de l'eau qui s'infiltre. Elles sont réalisées sur des glacis recouverts d'une croûte dure de quelques centimètres, qui empêche l'eau de s'infiltre. Elles permettent de collecter les eaux de ruissellement et sont ainsi bien adaptées aux zones semi-arides et arides. Les demi-lunes permettent une amélioration des réserves hydriques du sol ainsi qu'une augmentation de la profondeur d'humectation de 20 à 40 cm et un accroissement potentiel de la production agricole (OCDE/CSAO, 2008).

Annexes

Liste des annexes

Annexe 1 : Synthèse des applications du modèle SiSPAT (extrait de Velluet (2014))	I
Annexe 2 : Fonctionnement du module de Jarvis (extrait de Braud (2000)).....	VI
Annexe 3 : Fonctionnement du modèle A-g _s (extrait de Rivalland (2003))	VII
Annexe 4 : Synthèse des applications du modèle couplé ISBA-A-g _s	XI
Annexe 5 : Valeurs de paramètres du modèle A-g _s , utilisées dans la littérature, en contexte sahélien	XIV
Annexe 6 : Calendrier prévisionnel de déroulement du stage	XV

Annexe 1 : Synthèse des applications du modèle SiSPAT (extrait de Velluet (2014))

❖ Expérience Soja'90 (FRANCE) (Braud *et al.*, 1995) :

Contexte : Champ de soja, près de Montpellier (7 jours de mesures dont 2 en conditions sèches et 5 en conditions humides)

Objectif de l'étude :

- Calage et validation du modèle SiSPAT

Conclusions :

- Première validation du modèle sur une parcelle de soja et une courte période sans précipitation.

❖ Expérience MUREX¹ (FRANCE) (Gonzales-Sosa *et al.*, 2001) :

Contexte : Jachère dans le sud-ouest de la France en climat tempéré (3 ans de données disponibles).

Objectifs de l'étude :

- Application du modèle sous des conditions climatiques très variées.
- Utilisation du modèle pour comprendre l'impact de la couche de résidus morts en surface (« mulch layer ») sur les processus physiques.

Conclusions :

- Le modèle reproduit correctement les réponses aux différentes conditions climatiques.

❖ Expérience Alpilles ReSeDA² (FRANCE) (Demarty *et al.*, 2004) :

Contexte : Champ de blé dans le sud-est de la France sous des conditions hivernales en climat tempéré.

Objectifs de l'étude :

- Recherche et quantification des paramètres d'entrée les plus influents sur les variables de sortie du modèle.
- Détermination de la capacité du modèle SiSPAT à être utilisé à partir de « quelques » informations a priori sur les paramètres d'entrée.

Conclusions :

- Les modèles TSVA, tels que SiSPAT, peuvent être utilisés à partir de quelques informations a priori sur les propriétés du sol.

¹ Monitoring the Usable soil Reservoir Experimentally

² Remote Sensing Data Assimilation

Étant donné que nous travaillerons sur le bassin versant de Wankama au Niger, voici quelques applications de ce modèle sous des conditions semi-arides :

❖ Expérience HAPEX-Sahel¹ (NIGER) (Braud *et al.*, 1997) :

Contexte : Jachère arbustive en climat aride au Niger (54 jours de données, dont 14 jours pour la calibration et 54 jours pour la validation)

Objectif de l'étude :

- Capacité du modèle à représenter les flux d'eau et d'énergie dans l'interface SVA en contexte semi-aride.
- Étude de la liaison entre l'humidité de surface et l'évapotranspiration réelle.

Conclusions :

- Les résultats montrent une bonne représentation des cycles diurnes et des dynamiques des flux d'eau et d'énergie
- Cette étude souligne l'importance des propriétés hydrodynamiques sur la prévision de ces deux quantités et notamment de l'impact des croûtes de surface sur l'infiltration de l'eau dans le sol

❖ Expérience EFEDA² (ESPAGNE) (Boulet *et al.*, 1997) :

Contexte : Végétation éparsse sous un climat semi-aride (11 jours de données)

Objectif de l'étude :

- Étude du processus d'évaporation en conditions très sèches.

Conclusions :

- Le modèle peut être utilisé comme un outil d'étude des échanges d'eau et des processus d'évaporation dans le sol sous des conditions très sèches.
- Cette étude montre l'importance de la prise en compte des transferts couplés et de la phase vapeur près de la surface du sol.

❖ Expériences MONSOON'90 (ARIZONA, USA), SALSA³'97 (MEXIQUE) (Boulet *et al.*, 1999) :

Contexte : Végétation arbustive éparsse en climat semi-aride, homogène dans le cadre du projet SALSA'97 (19 jours) et plus hétérogène dans le cadre de MOONSON'90 (13 jours).

Objectifs de l'étude :

- Analyser l'influence des zones de sol nu sous couvert épars.

¹ Hydrologic-Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel

² ECHIVAL Field Experiment in Desertification-threatened Areas

³ Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere

- Comparer deux configurations du modèle SiSPAT : « classique » et « mosaïque ».

Conclusions :

- Dans le cas d'une végétation éparse très hétérogène, la configuration « mosaïque » de SiSPAT est mieux adaptée, ce qui est le contraire dans le cas d'une végétation éparse relativement homogène, notamment pour la simulation des températures de surface.
- Dans une optique d'assimilation de données de télédétection, il est préférable d'utiliser la configuration « classique », plus simple.
- L'albédo du sol nu contrôle le partitionnement de l'énergie incidente entre le sol et la végétation et la résistance stomatique minimale, la répartition de l'énergie disponible entre les flux turbulents. L'optimisation de ces deux paramètres permet de restreindre la différence entre les flux simulés par les deux schémas du modèle.

- ❖ Expérience sur une zone de forte infiltration (NIGER) (Lacaze, 2003) :

Contexte : Bassin endoréique de Wankama (Niger) sous un climat semi-aride.

Objectifs de l'étude :

- Étude du rôle de la zone d'épandage sur l'alimentation de la nappe phréatique.

Conclusions :

- Il s'agit d'une première application de SiSPAT pour la simulation de l'infiltration et de la redistribution de l'eau sur une couche profonde (20 m).
- Cette étude a permis de mettre en évidence une zone préférentielle d'infiltration profonde en amont du bassin.

- ❖ Effets du labour sur le bilan d'eau (ESPAGNE) (Moret *et al.*, 2007) :

Contexte : Modélisation du bilan d'eau et impact du labour sur une jachère.

Objectifs de l'étude :

- Étudier l'effet d'une longue période de jachère (17-18 mois) sur le bilan d'eau en utilisant différents systèmes de labour (conventionnel, réduit, ou absent).

Conclusions :

- Le modèle est capable de simuler correctement les composantes du bilan d'eau sur une longue période de jachère.

- ❖ Effets de l'irrigation sur les échanges d'eau et d'énergie (CHINE) (Ji *et al.*, 2009) :

Contexte : Simulation des échanges d'eau et d'énergie pour une culture irriguée sur des sols sableux en région aride.

Objectifs de l'étude :

- Étalonnage-Validation du modèle SiSPAT dans un contexte d'irrigation.
- Étude de l'impact de l'irrigation sur l'utilisation de l'eau par les plantes à différents stades du développement de la culture (quelques jours).

Conclusions :

- Le modèle représente correctement les profils d'humidités et de températures dans le sol après irrigation pour toutes les expériences réalisées.
 - Le modèle peut être appliqué pour optimiser l'irrigation du sol, en fonction des besoins en eau de la culture, afin de réduire la consommation d'eau dans des régions arides.
- ❖ Modélisation du cycle de l'eau (MEXIQUE) (Mastachi-Loza, 2010 ; Gonzalez-Sosa *et al.*, 2012) :

Contexte : 3 sites de végétation arbustive en contexte semi-aride (3 ans de données).

Objectifs de l'étude :

- Quantifier et modéliser le processus d'interception des précipitations par la végétation.
- Quantifier et modéliser la répartition des composantes des bilans d'eau et d'énergie dans les zones d'études.

Conclusions :

- La vitesse du vent et l'intensité des précipitations ont un effet sur le processus d'interception des précipitations.
- Les composantes du bilan d'eau sont sensibles aux paramètres liés au sol et au LAI.
- L'évapotranspiration annuelle représente 90 à 130 % des précipitations. Le stock d'eau simulé dans la colonne de sol a diminué, ce qui n'est pas le cas des observations. Ceci montre les limites d'une simulation unidimensionnelle ne tenant pas compte des apports latéraux.

- ❖ Modélisation du fonctionnement hydrologique et énergétique de deux écosystèmes sahéliens (NIGER) (Velluet, 2014) :

Contexte : Deux écosystèmes dominants au Sahel agropastoral, une parcelle cultivée en mil et une parcelle en jachère, instrumentés sur le bassin de Wankama au Sud-Ouest du Niger (7 ans de données de 2005 à 2012, 2 ans de calage et 5 ans de validation).

Objectifs de l'étude :

- Déterminer les principaux traits de fonctionnement éco-hydrologiques et énergétique des deux écosystèmes.

- Comprendre les relations entre les processus impliqués dans les cycles de l'eau et de l'énergie, en confrontation avec le cycle de croissance de la végétation.
- Identifier et analyser les différences de fonctionnement entre ces deux écosystèmes.
- Identifier et analyser la variabilité interannuelle des processus prépondérants impliqués dans les cycles de l'eau et de l'énergie.

Conclusions :

- Le modèle a été capable de reproduire correctement une évapotranspiration plus forte pour la jachère que pour le mil sur une grande partie de la saison des pluies, avec un stock d'eau généralement plus faible.
- L'étude a montré que l'évapotranspiration représente plus de 80% des précipitations annuelles et près de la moitié du rayonnement global pendant le pic de mousson. Ces résultats soulignent l'intérêt d'une étude simultanée des cycles de l'eau et de l'énergie fortement couplés dans la région sahélienne.
- Pour les composantes hydrologiques des différences significatives ont pu être mises en évidence entre les deux écosystèmes. Pour les composantes énergétiques, les différences sont beaucoup plus limitées.
- L'étude souligne l'intérêt, à l'avenir, d'un modèle SiSPAT couplé à un modèle de fonctionnement de la végétation pour améliorer la représentativité du module végétation.

Annexe 2 : Fonctionnement du module de Jarvis (extrait de Braud (2000))

Dans SiSPAT, la résistance stomatique pour la canopée est exprimée comme suit :

$$R_{sto} = R_{st \min} \frac{f_{RG}(R_G)f_{hf}(h_f)f_{VPD}(VPD)}{LAI} \quad (\text{A2.1})$$

Dans l'équation (3.2), $R_{st \ min}$ représente le minimum de résistance stomatique qui correspond à l'absence de stress radiatif et/ou hydrique ; et RG le taux de radiation solaire incidente net. Le facteur f_{RG} représente l'influence des radiations photosynthétiquement actives (PAR¹) (Sellers *et al.*, 1986). Suivant (Noilhan et Planton, 1989), il a été pris tel que :

$$f_{RG}(R_G) = \frac{1 + f}{f + \frac{R_{st \ min}}{R_{st \ max}}} \text{ avec } f = 0,55 \frac{R_G}{R_{GL}} \frac{2}{LAI} \quad (\text{A2.2})$$

Où $R_{GL} = 100 \text{ W.m}^{-2}$ pour les cultures.

La fonction de VPD est définie comme:

$$f_{VPD}(VPD) = 1 + \mu VPD \quad (\text{A2.3})$$

Où μ est un paramètre qui contrôle l'augmentation de la résistance stomatique quand la VPD augmente.

Le facteur f_{hf} décrit l'influence d'un stress hydrique dans le sol. Certains auteurs expriment ce facteur en fonction de la teneur en eau du sol (Deardoff, 1978 ; Taconet *et al.*, 1986 ; Noilhan et Planton, 1989). Dans SiSPAT, comme préconisé par Sellers *et al.* (1986), Van de Griend et Van Boxel (1989) et Lynn et Carlson (1990), ce facteur est fonction du potentiel hydrique foliaire. La formulation générale proposée par Campbell (1985) et citée par Flerchinger et Pierson (1991) est utilisée avec la valeur de 5,5 fixée par Choudhury et Idso (1985) pour l'exposant :

$$f_{hf}(hf) = 1 + \left(\frac{h_f}{h_{fc}} \right)^{5.5} \quad (\text{A2.4})$$

Le paramètre h_{fc} correspond au potentiel hydrique foliaire critique. Quand $|h_f| > |h_{fc}|$, la résistance stomatique augmente très rapidement, réduisant considérablement la transpiration. Typiquement h_{fc} peut varier entre -100 m et -150 m d'eau.

¹ Photosynthetically Active Radiation

Annexe 3 : Fonctionnement du modèle A-g_s (extrait de Rivalland (2003))

Assimilation nette carbonée

Cette partie du modèle de Jacobs est basée sur l'approche proposée par Goudriaan *et al.* (1985). La photosynthèse ou assimilation nette carbonée (A_n) est calculée en fonction des différentes variables limitantes de l'environnement et en tenant compte des caractéristiques physiologiques des différentes espèces. Le modèle peut être utilisé pour décrire la réponse photosynthétique de plante en C₃ ou C₄ (Jacobs *et al.*, 1996). L'approche de modélisation est basée sur la prise en compte de trois facteurs limitants essentiels :

- la concentration en CO₂ intracellulaire,
- la part de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR),
- la température de surface foliaire.

Réponse au CO₂ et à l'éclairement

La conductance des stomates et par le fait, la photosynthèse est hautement corrélée aux flux de photons atteignant les feuilles (Leuning, 1995). Seule une fraction de ce flux total incident correspond aux longueurs d'ondes pour lesquelles la photosynthèse est efficace (0,4-0,7μm). Cette part de rayonnement dit photosynthétiquement actif (PAR), est prise supposée égale à 48% du rayonnement global incident soit :

$$I_a = 0,48 \times R_G \quad (\text{A3.1})$$

Lorsque seul le PAR est limitant pour la photosynthèse (A_n), celle-ci est considérée comme lui étant linéairement reliée (Jacobs *et al.*, 1996) :

$$A_n = \varepsilon I_a - R_d \quad (\text{A3.2})$$

ε est appelé efficacité photosynthétique (mg de CO₂ fixés par joule de PAR absorbé). R_d représente le taux de respiration nocturne dite de maintenance que l'on retrouve en l'absence de lumière. $-R_d$ correspond donc à l'ordonnée à l'origine de cette droite, tandis que ε représente la pente de la courbe de réponse de A_n à la lumière. On peut montrer que ε peut être calculé selon la formulation de Goudriaan *et al.* (1985) :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{C_i - \Gamma}{C_i + 2\Gamma} \quad (\text{A3.3})$$

Où ε_0 est la valeur maximum que peut prendre ε et C_i la concentration en CO₂ intracellulaire. Γ est le point de compensation de concentration en CO₂. Il introduit l'effet de la photorespiration dans le calcul de ε , et la rend dépendante de la température (Jacobs *et al.*, 1996).

Cette courbe de réponse de l'assimilation nette à l'intensité lumineuse est toutefois limitée dans les fortes valeurs et tend asymptotiquement vers une valeur maximale notée A_m :

$$\lim_{I_a \rightarrow +\infty} A_n = A_m \quad (\text{A3.4})$$

A faibles concentrations C_i , A_m est relié à la concentration en CO₂ selon Goudriaan *et al.* (1985) par :

$$A_m = g_m(C_i - \Gamma) \quad (\text{A3.5})$$

Où g_m est la conductance mésophylienne. g_m représente donc la pente de la courbe de réponse au CO₂ à lumière saturante.

La valeur maximale de l'assimilation est limitée par le déficit en CO₂ intra-stomatique au travers de l'équation de saturation suivante :

$$A_m = A_{m,max} \left[1 - \exp \left(-g_m \frac{(C_i - \Gamma)}{A_{m,max}} \right) \right] \quad (\text{A3.6})$$

$$\lim_{C_i \rightarrow +\infty} A_m = A_{m,max} \quad (\text{A3.7})$$

Finalement, l'assimilation nette est limitée par la quantité de lumière disponible selon l'équation empirique de saturation :

$$A_m = (A_m + R_d) \left[1 - \exp \left(\frac{\varepsilon I_a}{A_m + R_d} \right) \right] - R_d \quad (\text{A3.8})$$

La respiration de maintenance de la biomasse active, R_d est paramétrée selon Van Heemst (1986) :

$$R_d = \frac{A_m}{9} \quad (\text{A3.9})$$

Réponse en température

Dans l'approche A-g_s, un certain nombre de paramètres clés de la photosynthèse est fonction de la température. Le point de compensation Γ (ppm), la conductance mésophylienne g_m (mm.s⁻¹) et l'assimilation nette maximale $A_{m,max}$ (mg.m⁻².s⁻¹) évoluent en fonction de la température de surface des feuilles. La dépendance de ces trois variables du modèle, à l'égard de la température de la feuille (T_s) est décrite, selon une fonction en Q₁₀ :

$$X(T_s) = X(@25) \times Q_{10}^{T_s - 25/10} \quad (\text{A3.10})$$

Où $X(T_s)$ et $X(@25)$ sont les valeurs de variables considérées aux températures T_s et 25°C, respectivement. Dans l'équation (A3.10), une augmentation de 10°C de la température s'accompagne d'un accroissement de X d'un facteur Q_{10} . Cette fonction est directement utilisée pour décrire l'évolution de Γ , tandis que pour g_m et $A_{m,max}$, l'équation (A3.10) est modifiée par les fonctions d'inhibition données par Collatz *et al.* (1992) :

$$X(T_s) = \frac{X(@25) \times Q_{10}^{T_s - 25/10}}{[1 + \exp\{0,3(T_1 - T_s)\}][1 + \exp\{0,3(T_s - T_2)\}]} \quad (\text{A3.11})$$

Dans l'équation (A3.11), la variable X est ramenée à zéro pour des valeurs soit faibles soit élevées de la température, selon les températures de référence T_1 et T_2 . Les températures T_1 et T_2 , ainsi que $X(@25)$, dépendent de l'espèce végétale considérée, notamment de l'appartenance au groupe des C₃ ou des C₄.

Concentration intra-stomatique en CO₂

Les plantes tendent à réguler leur concentration interne en CO₂ (C_i) dans la cavité sous stomatique par rapport à la concentration atmosphérique (C_s) de sorte à maintenir le rapport C_i/C_s constant pour un déficit de saturation en vapeur d'eau donné. Pour tenir compte du fait que la valeur minimum de C_i est Γ (le point de compensation) et que la photosynthèse tend à maintenir C_i à une valeur inférieure à C_s , le rapport f apparaît être un bon indicateur de l'activité photosynthétique :

$$f = \frac{C_i - \Gamma}{C_s - \Gamma} \quad (\text{A3.12})$$

Ce rapport varie en fonction du déficit de saturation selon :

$$f = \left(1 - \frac{D_s}{D_{max}}\right) + f_{min} \left(\frac{D_s}{D_{max}}\right) \quad (\text{A3.13})$$

Où f_o est la valeur de f lorsque $D_s = 0 \text{ g.kg}^{-1}$, soit la valeur potentielle du rapport des concentrations. D_{max} est la valeur maximale du déficit de saturation entre la feuille et l'air toléré par la végétation et f_{min} est la valeur de f lorsque $D_s = D_{max}$; sa formulation est la suivante :

$$f_{min} = \frac{g_c}{g_c + g_m} \quad (\text{A3.14})$$

f_{min} est fonction de la conductance cuticulaire g_c et de la conductance mésophyllienne g_m .

Conductance stomatique

Conductance stomatique au CO₂

La conductance stomatique au CO₂ (g_{sc}^*) est calculée en utilisant une relation de flux-gradient modifiée pour tenir compte des effets du déficit en vapeur d'eau de l'air sur l'ouverture stomatique :

$$g_{sc}^* = \frac{A_n - A_{min} \left(\frac{D_s}{D_{max}} \frac{A_n + R_d}{A_m + R_d} \right) + R_d \left(1 - \frac{A_n + R_d}{A_m + R_d} \right)}{C_s - C_i} \quad (\text{A3.15})$$

A_{min} représente le taux d'assimilation photosynthétique (à l'intensité lumineuse non limitante) lorsque tous les stomates sont fermés en raison d'un dépassement du déficit de saturation en vapeur

d'eau de l'air toléré par la plante ($D_s = D_{max}$). A ce moment, seul les transferts gazeux au travers des cuticules ont lieu et permettent de maintenir une assimilation résiduelle :

$$A_{min} = g_m(C_{min} - \Gamma) \quad (\text{A3.16})$$

C_{min} est la valeur de C_i dans les conditions de stress hydrique atmosphérique extrêmes citées :

$$C_{min} = \frac{g_c C_s + g_m \Gamma}{g_c + g_m} \quad (\text{A3.17})$$

Au final, la diffusion du CO₂ interagit avec la diffusion de la vapeur d'eau. Cet effet est pris en compte :

$$g_{sc} = g_{sc}^* + E \frac{M_{air}}{\rho_a M_{H_2O}} \frac{C_s + C_i}{2(C_s - C_i)} \quad (\text{A3.18})$$

E correspond à la transpiration foliaire calculée en (A3.20). M_{air} et M_{H_2O} sont respectivement, les masses molaires de l'air et de l'eau (28,9 et 18 g.mol⁻¹).

Conductance stomatique à la vapeur d'eau

Le rapport des conductances stomatiques à la vapeur d'eau (g_s) et au CO₂ (g_{sc}) tient compte du rapport des diffusivités de ces deux gaz. La conductance cuticulaire étant supposée identiquement perméable à la vapeur d'eau et au CO₂.

$$g_s^* = 1,6g_{sc}^* + g_c \quad (\text{A3.19})$$

La transpiration foliaire est alors calculée simplement par :

$$E = \rho_a g_s D_s \quad (\text{A3.20})$$

Annexe 4 : Synthèse des applications du modèle couplé ISBA-A-g_s

❖ Expérience en conditions de stress hydrique (Calvet, 2000) :

Contexte : Large jeu de données à l'échelle de la feuille (données physiologiques) et de la canopée (données micro-météorologiques) pour 63 cas d'étude (33 plantes herbacées C₃, 19 plantes ligneuses C₃ et 11 plantes C₄; données extraites de 28 publications).

Objectifs de l'étude :

- Calage du modèle ISBA-A-g_s en conditions non stressantes et validation en conditions de stress hydrique.
- Simulation de trois cycles annuels de végétation sur un site de jachère.
- Etude de l'effet du stress hydrique sur les paramètres du modèle (compréhension de la variation inter- et intra-spécifique des paramètres de conductance stomatique et de photosynthèse).

Conclusions :

- Première validation du modèle en conditions de stress hydrique.
- La variabilité interspécifique est aussi importante que la variabilité intra-spécifique.
- La sensibilité stomatique à l'humidité de l'air dépend du taux d'humidité du sol.

❖ Expérience sous serre (Calvet et Soussana, 2001) :

Contexte : Expérience d'enrichissement en CO₂ atmosphérique sur des plants de fétuque vivace (*Lolium perenne* L.) plantés dans 2251 pots remplis de sol argileux et placés sous tunnels plastiques hautement ventilés (microcosmes) (631 jours de données exploitées, issues de l'INRA¹ à Clermont-Ferrand).

Objectifs de l'étude :

- Adaptation du modèle ISBA-A-g_s à une expérience sous serre
- Modélisation des effets d'un enrichissement en CO₂ atmosphérique et/ou en fertilisants azotés, sur des plants de fétuques (6 conditions différentes de fertilisation azotée et de climat ([CO₂] + température))

Conclusions :

- Le modèle est capable de simuler des réponses contrastées d'indice foliaire à un enrichissement en CO₂ ou en azote.
- Le ratio entre indice foliaire et biomasse active dépend à la fois de la fertilisation azotée et du climat.

¹ Institut National de la Recherche Agronomique

❖ Expérience à l'échelle d'une forêt (Calvet *et al.*, 2004) :

Contexte : 32 jeux de données obtenues dans des bonnes conditions d'humidité du sol, et 4 jeux de données obtenues sous stress hydrique incluant des données sous climat actuel et sous hypothèse d'un doublement de la concentration en CO₂ atmosphérique, et ce pour deux espèces ligneuses, le pin maritime (*Pinus pinaster* Aiton) et le chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl) (données issues de la littérature).

Objectifs de l'étude :

- Utilisation du modèle ISBA-A-g_s pour modéliser la réponse d'une forêt, en termes de transpiration et de flux de CO₂, à un stress hydrique dans le sol.

Conclusions :

- Deuxième application et validation du modèle à des conditions de stress hydrique.
- Deux types de réponses au stress hydrique sont identifiés : « drought-avoiding » pour le pin maritime et « drought-tolerant » pour le chêne sessile

❖ Expérience à échelle mondiale (Gibelin *et al.*, 2006) :

Contexte : Le modèle est forcé par des données météorologiques de GSWP¹-2 à une résolution de 1° sur la période de 1986 à 1995.

Objectifs de l'étude :

- Capacité du modèle à simuler correctement le LAI à une échelle mondiale. Les valeurs de LAI simulées sont comparées à 3 jeux de données dérivés de mesures satellites (données ISCLSCP² Initiative II, données MODIS³ et données ECOCLIMAP)

Conclusions :

- Le modèle capture bien le cycle saisonnier du LAI
- Certains processus doivent être amélioré ou inclus dans le modèle, en particulier, la dynamique neigeuse et le traitement de la végétation sur zone cultivée

❖ Expérience SMOSREX⁴ 1 (Calvet *et al.*, 2008) :

Contexte : 4 cycles annuels contrastés en termes de régime pluviométrique et de température atmosphérique, basés sur des mesures continues effectuées sur le site SMOSREX à Fauga-Mauzac, près de Toulouse.

¹ Global Soil Wetness Project

² International Satellite Land-Surface Climatology Project

³ MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

⁴ Surface Monitoring Of the Soil Reservoir EXperiment

Objectifs de l'étude :

- Utilisation de ISBA-A-g_s, pour tester la sensibilité à la concentration atmosphérique en CO₂ de 3 types de végétation (champs de blé, champs de maïs et forêt de conifères) pour des conditions climatiques rencontrées dans le Sud-Ouest de la France, via la simulation d'un scénario passé (1960) et futur (2050) auxquels correspondent une concentration en CO₂ respectivement de 320 ppm et 550 ppm.

Conclusions :

- Le modèle peut être utilisé pour la simulation de scénarios prospectifs
- L'effet de la concentration en CO₂ atmosphérique sur la végétation doit être pris en compte dans les modèles SVAT, pour éviter les biais saisonniers et diurnes dans les simulations.

❖ Expérience SMOSREX 2 (Albergel *et al.*, 2010) :

Contexte : Prairie tempérée de 3.2 ha, sur le site de l'ONERA¹ de Fauga-Mauzac, près de Toulouse (7 ans de données de 2001 à 2007)

Objectifs de l'étude :

- Utilisation de la version « Cycle du carbone » de ISBA, ISBA-CC² (Gibelin *et al.*, 2008), pour estimer le paramètre de respiration de l'écosystème (R_{eco}) utilisé dans la formulation simplifiée de la respiration écosystémique de ISBA-A-g_s.
- Modélisation de la respiration écosystémique et de la production primaire brute d'une prairie dans le Sud-Ouest de la France.

Conclusions :

- L'implémentation de la représentation de l'effet de l'humidité du sol dans la formulation de la respiration écosystémique dans ISBA-A-g_s augmente la corrélation entre l'échange de CO₂ net de l'écosystème observé et simulé.
- Le paramètre R_{eco} estimé à partir d'ISBA-CC peut être utilisé pour généraliser la paramétrisation simplifiée de la respiration écosystémique pour d'autres écosystèmes et d'autres climats où des mesures de flux de CO₂ ne sont pas disponibles.

¹ Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales

² Interaction entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère — Carbon Cycle

Annexe 5 : Valeurs de paramètres du modèle A-g_s, utilisées dans la littérature, en contexte sahélien

Espèces	Phénotype	Type	Paramètres	X(@ 25)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	Sources
<i>Guiera senegalensis</i> J. F. Gmel	Arbuste	C ₃	g_m (m.s ⁻¹) $A_{m,max}$ (mg.m ⁻² .s ⁻¹) $D_{s,max}$ (g.kg ⁻¹) f_0	0.0032 5.2 73.8 0.852	0 29 — —	30 48 — —	Verhoef (1995)
<i>Guiera senegalensis</i> J. F. Gmel	Arbuste	C ₃	g_m (m.s ⁻¹) $A_{m,max}$ (mg.m ⁻² .s ⁻¹) $D_{s,max}$ (mbar) f_0	0.0147 0.7 29.9 0.94	6 6 — —	37 37 — —	Verhoef et Allen (1999)
<i>Mitracarpus scaber</i> Zucc.	Vivace	C ₃	g_m (m.s ⁻¹) $A_{m,max}$ (mg.m ⁻² .s ⁻¹) $D_{s,max}$ (mbar) f_0	0.0013 1.6 59.1 0.96	3 3 — —	47 52 — —	Verhoef et Allen (1999)
<i>Digitaria gayana</i> (Kunth) Stapf ex A. Chev.	Herbacée	C ₄	g_m (m.s ⁻¹) $A_{m,max}$ (mg.m ⁻² .s ⁻¹) $D_{s,max}$ (mbar) f_0	0.0087 0.75 48 0.23	9 9 — —	41 43 — —	Verhoef et Allen (1999)
<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	Herbacée cultivée	C ₄	g_m (m.s ⁻¹) $D_{s,max}$ (g.kg ⁻¹)	0.00286 94.3	— —	— —	El-Sharkawy et al. (1984)

Notons que des conversions sont nécessaires pour le paramètre D_{s,max} et n'ont pas été réalisées ici.

Annexe 6 : Calendrier prévisionnel de déroulement du stage

	Mois	Février	Mars	Avril	Mai	Juin																	
	Semaine	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Etape 1	Approfondissement de la bibliographie. Rédaction finale de la synthèse bibliographique et de la démarche scientifique qui seront intégrées au rapport de stage																						
	Prise en main des outils de programmation (MatLab) et de modélisation (modèle SiSPAT)																						
Etape 2	Etalonnage et validation du modèle couplé SiSPAT/A-gs																						
	Rédaction de la première partie du rapport																						
Etape 3	Test des scénarios d'évolution des pratiques agropastorales																						
	Conclusions de l'étude et rédaction finale du rapport																						
Etape 4	Finalisation du rapport de stage																						
	Préparation de la restitution orale																						
	Préparation au concours de l'école doctorale SIBAGHE																						