



HAL
open science

Modélisation des besoins en eau des plantes dans la vallée de la Durance

François Tilmant

► **To cite this version:**

François Tilmant. Modélisation des besoins en eau des plantes dans la vallée de la Durance. Sciences de l'environnement. 2011. hal-02595664

HAL Id: hal-02595664

<https://hal.inrae.fr/hal-02595664>

Submitted on 15 May 2020

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

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



Modélisation des besoins en eau des plantes dans la vallée de la Durance

Rapport de master recherche Hydrologie,
Hydrochimie, Sol, Environnement (H2SE)



Responsables de stage : Mme Isabelle BRAUD (Cemagref Lyon) et M. André CHANZY (UMR EMMAH, Avignon)

Remerciements

Je remercie M. Yves CONFESSON, directeur du Cemagref de Lyon, qui m'a permis de réaliser mon stage de fin d'études dans son centre de recherche et M. André PAQUIER, responsable de l'UR Hydrologie-Hydraulique, qui m'a accueilli dans son unité de recherche.

Je remercie également Isabelle BRAUD, directrice de recherche, qui a été ma responsable de stage pendant ces 6 mois au Cemagref. Elle a su se montrer disponible et n'a pas hésité à prendre de son temps pour me conseiller et m'expliquer tous les dessous du modèle SiSPAT. Je remercie aussi André CHANZY, directeur de recherche à l'UMR EMMAH (Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Systèmes) d'Avignon pour avoir suivi de près ce travail et nous avoir fourni les données utilisées dans ce travail. Nous avons pu avoir des discussions toujours fructueuses autour de mes résultats. Je tiens également à remercier Rémi LECERF, de l'UMR EMMAH, qui nous a fourni les sorties du modèle STICS et les informations nécessaires à leur exploitation.

Un grand merci enfin à Amandine, Gaylord, Thomas et Vivien, stagiaires au Cemagref, pour leur bonne humeur communicative et leur amitié tout au long du stage.

Résumé

Dans le cadre des études concernant l'impact du changement climatique sur les ressources en eau, il est important de bien quantifier les besoins en eau des plantes ainsi que le drainage sous la zone racinaire, qui conditionne la recharge des nappes. L'hétérogénéité des sols et la prise en compte des éléments grossiers posent également problème. Dans ce travail, nous avons étudié ces composantes du bilan hydrique sur deux sites de la plaine de la Crau, instrumentés à l'aide de mesures de flux de surface et de mesures dans le sol : une prairie humide et une prairie sèche. L'analyse comparative des deux sites à l'aide des données de flux montre une utilisation très différente de l'énergie disponible : sur la prairie humide, le rayonnement net est quasiment utilisé pour le flux de chaleur latente alors qu'il se partage entre les flux de chaleur sensible et latente sur la prairie sèche. Les deux sites ont été modélisés à l'aide du modèle SiSPAT. Ce modèle de simulation 1D simule les transferts couplés d'eau et d'énergie dans le continuum sol – végétation – atmosphère. En partant d'une première simulation s'appuyant sur des paramètres d'entrée issus de la littérature, nous avons progressivement amélioré les simulations du modèle à l'aide d'une analyse de sensibilité du modèle. Une version SiSPAT prenant en compte les éléments grossiers dans le sol a été testée et donne des résultats intéressants, mais qui doivent encore être approfondis. Cette dernière version a pu être comparée avec le modèle de culture STICS, qui prend en compte les éléments grossiers et utilise une représentation plus simple des transferts hydriques. Des différences de 245 mm ont été observées entre les deux modèles sur les composantes évapotranspiration et drainage sous la zone racinaire. Pour mieux comprendre ces résultats, il est nécessaire d'approfondir des mécanismes de simulations de STICS et de bien comparer les deux modèles dans des conditions les plus proches possibles.

Sommaire

Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Sommaire.....	4
Introduction.....	2
1. Contexte et objectifs de l'étude.....	4
1.1. Contexte de l'étude.....	4
1.2. Objectifs du stage.....	6
2. Matériels et méthodes.....	7
2.1. Le modèle SiSPAT.....	7
2.2. Le modèle STICS.....	11
2.3. Les sites d'étude.....	13
2.4. Les données disponibles et les traitements effectués sur ces données.....	16
2.5. La préparation des données pour SiSPAT.....	20
2.6. Stratégie de modélisation.....	23
3. Résultats.....	26
3.1. Analyse des données et comparaison des deux sites.....	26
3.2. Résultats des premières simulations SiSPAT.....	31
3.3. Analyse de sensibilité et obtention d'une simulation de référence.....	33
3.4. Développement du modèle pour la prise en compte des éléments grossiers.....	38
3.5. Simulation sur la prairie sèche.....	39
3.6. Comparaison avec STICS.....	41
4. Discussion et conclusions.....	44
Conclusion.....	47
Bibliographie.....	48
Table des illustrations.....	53
Annexes.....	55

Introduction

Le bassin de la Durance est un bassin versant où les enjeux de gestion de l'eau sont importants. La zone aval est en effet fortement anthropisée et de nombreuses cultures dépendent de l'eau d'irrigation provenant de l'amont du bassin, situé dans les Alpes, où les impacts attendus du changement climatique seront les plus forts (impact sur le stock neigeux notamment). (Leblois et al., 2003). La recharge de certains aquifères, notamment celui de la Crau est par ailleurs assuré en bonne partie par les eaux d'irrigation gravitaire de la zone. Les enjeux en terme d'impacts des changements globaux sur ce bassin sont donc importants. Ce bassin est plus particulièrement étudié dans le projet de recherche « Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050 » (R2D2 2050) dans lequel s'inscrit ce stage.

Le travail contribue au volet 2.3 « Modélisation des besoins et de la gestion /usages agricoles ». Il s'agit en particulier d'évaluer des approches simplifiées de simulation des bilans hydriques pour différents types de culture (y compris des cultures sous irrigation gravitaire) dans les modèles hydrologiques, en s'appuyant sur une modélisation à base physique décrivant de manière plus précise l'hétérogénéité verticale des sols et les bilans d'énergie. Nous ciblons en particulier les composantes évapotranspiration et drainage qui sont importantes pour mieux évaluer la demande agricole et estimer la recharge des aquifères. Par ailleurs, en zones méditerranéenne, les sols présentent souvent un taux de cailloux important. L'impact de ces éléments grossiers est peu pris en compte dans les modèles à base physique. Nous essaierons de proposer une stratégie pour prendre en compte ces éléments grossiers dans la modélisation.

L'objectif du stage est de mettre en place une modélisation à base physique des transferts de masse et d'énergie sur différents types de cultures caractéristiques de la zone d'étude qui puisse être utilisée pour évaluer des approches plus simples et plus faciles à spatialiser. Le stage se concentrera sur deux types de cultures contrastées typiques de la zone : les prairies sèches et humides de la plaine de la Crau pour lesquelles des données étaient disponibles. Pour y parvenir, nous utiliserons une modélisation sol – végétation – atmosphère (modèle SiSPAT), qui permet de prendre en compte l'hétérogénéité verticale des sols, les types de végétation, et certaines pratiques culturelles comme

l'irrigation. La comparaison sera menée avec des simulations réalisées à l'aide du modèle de culture STICS (Brisson et al., 1998) qui représente les transferts dans les sols de manière simplifiée, mais prend en compte les éléments grossiers.

Après avoir présenté le contexte de l'étude, je présenterai les modèles utilisés, les sites d'étude et les données collectées sur ceux-ci. Je m'intéresserai ensuite aux premières simulations puis aux analyses de sensibilité effectuées pour obtenir un jeu de paramètres qui permette de représenter au mieux la dynamique des observations. Enfin, je donnerai les résultats de la comparaison entre les résultats issus du modèle SiSPAT et ceux issus des simulations avec le modèle STICS (Brisson et al., 1998) afin d'évaluer l'impact de la représentation simplifiée du sol sur les flux simulés. On comparera en particulier les taux de drainage sous la zone racinaire dans ces deux conditions extrêmes d'irrigation, ainsi que les différences en terme d'évapotranspiration des couverts végétaux. Nous terminerons par une discussion générale sur les résultats.

1. Contexte et objectifs de l'étude

1.1. Contexte de l'étude

Aujourd'hui, certains bassins d'alimentation en eau sont périodiquement sensibles à la sécheresse. Avec des variations climatiques plus fortes, les disparités entre territoires pourraient s'accroître. Ainsi, pour bien évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau, il est important de bien quantifier les besoins en eau des plantes et la composante évapotranspiration du bilan hydrique. La quantification du drainage sous la zone racinaire, qui conditionne la recharge des nappes, est aussi un terme important de ce bilan qu'il est nécessaire de quantifier dans un contexte de changements globaux.

Le projet « Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050 » a pour objectif de répondre à ces problèmes des changements globaux en envisageant d'optimiser la gestion de l'eau à l'échelle du bassin de la Durance ($S \approx 13000 \text{ km}^2$). Il prévoit la création d'une représentation fidèle de l'hydrosystème de ce bassin. Il souhaite également établir et tester des projections climatiques et des scénarios socio-économiques territoriaux en étroite relation avec les acteurs de terrain impliqués dans la gestion de l'eau pour répondre aux besoins en eau des usagers à l'horizon 2050.

La question à laquelle nous nous intéresserons est la quantification des flux de drainage et d'évapotranspiration à l'échelle de la basse vallée de la Durance avec des modèles simplifiés. En effet, dans le contexte qui nous intéresse, la basse vallée de la Durance, une partie de la recharge des nappes est assurée par l'irrigation gravitaire (nappe de la Crau) et une bonne représentation de ces termes est donc importante. Pour parvenir à répondre à cette question, une étape préalable est nécessaire : l'évaluation de la qualité de modèles de calcul de bilan en s'appuyant sur des sites bien instrumentés (dans le cadre du stage : prairies sèches et irriguées de la plaine de la Crau) et des modélisations à base physique. C'est ce que nous abordons dans ce mémoire.

Le cas de la plaine de la Crau nous permet de nous pencher sur le problème qu'est l'impact des éléments grossiers et de la couche indurée (taparas) sur les flux et les transferts hydriques. Cette question de la prise en compte des éléments grossiers est d'ailleurs une question pertinente pour une

bonne partie des zones méditerranéennes. En effet, 60% de cette zone est constituée de sols avec un fort taux de pierrosité (Poesen, 1990, cité par Cerda, 2001).

De nombreux modèles existent pour simuler les interactions entre le sol, la végétation et l'atmosphère et calculer des bilans d'eau et d'énergie. Il s'agit le plus souvent de modèles unidimensionnels dont les représentations des processus peuvent être plus ou moins complexes. Prenons comme exemple :

- le modèle ISBA (Noihlan et Planton, 1989) et sa nouvelle version spatialisée (SURFEX, Martin et al., 2007) qui sont utilisés dans les applications développées par Météo-France, notamment la chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM). Celle-ci permet des simulations de l'état hydrique des sols à l'échelle de la France (Habets et al., 2008),
- le modèle de culture STICS (Brisson et al., 2003) développé par l'INRA qui permet de simuler le cycle de croissance des cultures avec une représentation simplifiée des transferts d'eau et d'énergie.

Ces modèles intègrent une représentation simplifiée des transferts dans les sols, certains ne prenant notamment pas en compte l'hétérogénéité verticale des sols, ce qui peut limiter la précision de la simulation du drainage sous la zone racinaire et l'évaporation (Yang et al., 2005).

La combinaison de l'utilisation de modèles de Transfert Sol Végétation Atmosphère (TSVA) et l'assimilation de données satellitaires pour estimer certains des paramètres (indice foliaire, date des irrigations, dates de fauche, etc..) (Oliosio et al., 2005 ; Courault et al., 2010) aboutit à des modèles s'appuyant généralement sur une description assez grossière des sols (utilisation de la classification FAO dans SIM ; texture, fraction d'éléments grossiers dans STICS). Des fonctions dites de pédo-transfert permettent de décrire les sols mais ces fonctions sont en général uniquement valides sur la gamme de valeurs ayant servi à les calibrer et des adaptations aux conditions locales sont souvent nécessaires.

Les effets des éléments grossiers sont controversés, les études plutôt théoriques concluant à une diminution de la capacité d'infiltration des sols (Novak et al., 2011), alors que les études de terrain concluent plutôt à un effet d'augmentation de l'infiltration dans les sols avec l'augmentation du taux d'éléments grossiers (Cerda, 2001; Mandal et al., 2005). L'explication avancée par ces derniers

auteurs est une augmentation de la porosité et des chemins préférentiels pour l'eau lorsque le taux d'éléments grossiers augmente (Fiès et al., 2002 ; Urbanek et Shakesby, 2009).

1.2. Objectifs du stage

L'objectif du stage est de proposer une stratégie d'évaluation des modélisations simplifiées qui seront mises en place pour spatialiser les bilans d'eau et d'énergie à l'échelle de la basse vallée de la Durance pour quantifier les composantes évapotranspiration et drainage sous la zone racinaire. Ceci permettra de mieux évaluer les besoins en eau des plantes d'une part, et la recharge des aquifères d'autre part. Nous dirigerons le travail sur la représentation de l'hétérogénéité des sols et de leurs propriétés hydrodynamiques et thermiques. Nous utiliserons une modélisation à base physique, représentant de manière détaillée les transferts d'eau et de chaleur dans les sols comme outil de référence. La démarche proposée sera mise en place sur deux cultures contrastées, une prairie irriguée et une prairie sèche pour lesquelles des données sont disponibles.

De manière spécifique, nous nous sommes fixés 3 objectifs dans le cadre de ce stage.

- 1) Le premier est la comparaison des bilans d'eau et d'énergie sur les deux sites en s'appuyant sur l'analyse des données micrométéorologiques et de données sur le sol collectées sur les deux sites d'étude d'une part et la modélisation d'autre part.
- 2) Le second objectif est la mise en œuvre, la calibration et l'évaluation d'un modèle de transfert sol-végétation- atmosphère à base physique sur ces deux sites instrumentés. Le modèle choisi est le modèle SiSPAT (Braud et al., 1995) qui représente de manière détaillée les transferts d'eau et d'énergie dans les sols et l'hétérogénéité verticale du sol. Le modèle sera aussi adapté pour qu'il prenne en compte les éléments grossiers.
- 3) Le troisième objectif est la comparaison des résultats de ce modèle avec ceux du modèle de culture STICS (Brisson et al., 1998) qui utilise une représentation plus simple des transferts hydriques. La comparaison se focalisera sur les estimations du drainage sous la zone racinaire et de l'évapotranspiration sur le site de prairie irriguée où des résultats de simulation étaient disponibles.

2. Matériels et méthodes

2.1. Le modèle SiSPAT

2.1.1. Présentation générale

Le modèle utilisé (SiSPAT pour Simple Soil Plant Atmosphere Transfer, Figure 1) est un modèle de simulation 1D des transferts couplés d'eau et d'énergie dans le continuum sol – végétation (ou sol nu) – atmosphère à l'échelle de la parcelle. Le modèle est décrit en détails dans Braud et al. (1995), Braud (2000, 2002). Nous ne présentons ici que les principes généraux du modèle qui essaie de :

- donner une représentation aussi physique que possible des processus principaux impliqués : infiltration et transferts d'eau et de chaleur dans la zone non saturée du sol, extraction racinaire, transferts turbulents au-dessus et dans la canopée, interception de la pluie par la végétation, ruissellement en surface et drainage sous la zone racinaire
- parvenir à un degré de simplification équilibré entre les différents compartiments du modèle.

Le modèle est forcé par des variables climatiques (rayonnement solaire et grande longueur d'ondes incidents, température et humidité spécifique de l'air, vitesse du vent, précipitations) avec un pas de temps inférieur à l'heure. Il opère un couplage des transferts d'eau et de chaleur dans le sol, incluant les phases liquide et vapeur (Milly, 1982) et un terme puits pour l'extraction racinaire (Federer, 1979). Il peut prendre en compte un sol verticalement hétérogène, constitué de plusieurs horizons de sol. Il calcule deux bilans d'énergie: l'un pour le sol nu, l'autre pour le couvert végétal. Des calculs de transferts radiatifs sont réalisés dans la canopée pour partitionner l'énergie entre la surface du sol et la végétation. Ils requièrent des valeurs pour l'albédo et l'émissivité de la végétation et de la surface du sol, cette dernière dépendant de l'humidité de la surface du sol. Les résistances aérodynamiques peuvent être calculées selon les formulations proposées par Shuttleworth et Wallace (1985) ou Taconet et al. (1986)

L'évolution de la végétation est prise en considération avec la spécification des variables suivantes : la hauteur de la végétation, l'indice foliaire (LAI) et les profils racinaires.

Les variables calculées dans le sol sont les profils verticaux de température et la pression de l'eau. Cette approche requiert, pour chaque horizon de sol, des informations sur les propriétés

hydrodynamiques et thermiques du sol telles que les courbes de rétention, de conductivité hydraulique et de conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.

Les transferts d'eau et de chaleur entre le sol, la végétation et l'atmosphère ainsi que l'extraction de l'eau du sol par les racines suivent une analogie électrique (Figure 1). La résistance stomatique est décrite comme une fonction du déficit de pression de vapeur, du rayonnement incident et du potentiel foliaire.

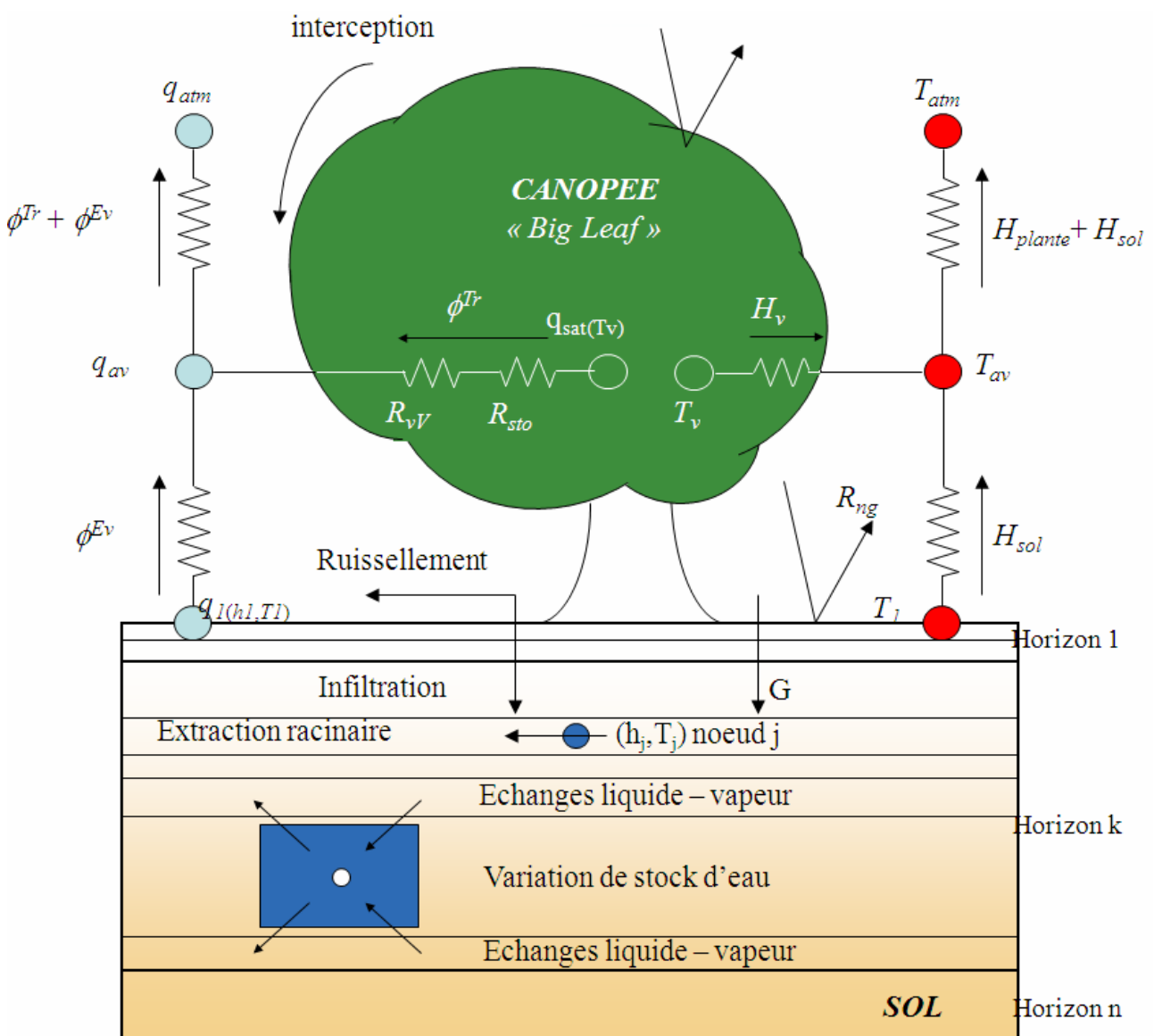


Figure 1 : Schéma du modèle SiSPAT (d'après Braud (2010))

2.1.2. Paramètres du modèle et variables simulées

Les paramètres du modèle sont nombreux :

- Paramètres du sol
 - o Définition des horizons de sol (hétérogénéité verticale)
 - o Paramètres des courbes de rétention et de conductivité hydraulique pour chaque horizon.

Dans la suite, nous avons utilisé le modèle de Van Genuchten (1980) $\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^q \right]^{-m}$ pour

la courbe de rétention avec :

- $m = 1 - \frac{2}{q}$ avec q paramètre de forme,
- h_g est un facteur d'échelle,
- θ_{sat} la teneur en eau à saturation,
- θ_r la teneur en eau résiduelle,

et le modèle de Brooks et Corey (1964) pour la conductivité hydraulique $K(\theta) = K_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^c$ avec :

- K_{sat} la conductivité hydraulique à saturation,
- c est un facteur de forme.
 - o Conductivité thermique et capacité thermique volumique pour chaque horizon
- Paramètres de la végétation
 - o Evolution temporelle de l'indice foliaire, de la hauteur de végétation, profils de densité racinaire
 - o Potentiel foliaire critique, résistance stomatique minimale, résistance totale de la plante
- Paramètres de surface
 - o Albédo sol et végétation
 - o Emissivité du sol

Choix du modèle de résistance aérodynamique et définition des paramètres de rugosité

- Conditions initiales et à la limite
 - o Profil initial de température et de pression d'eau dans le sol
 - o Conditions à la limite inférieure pour le sol
 - o Forçage climatique (pas de temps horaire)

Le modèle simule l'évolution temporelle des variables suivantes :

- Dans le sol, il fournit un profil de pression d'eau dans le sol, de température, de teneur en eau volumique ainsi que le flux d'eau (liquide et vapeur) et les profils d'extraction racinaire,
- A l'interface avec l'atmosphère, il calcule les flux de surface : rayonnement net Rn , flux de chaleur sensible H et leurs composantes (sol nu et végétation), flux de chaleur latente LE et ses composantes (évaporation du sol nu, transpiration des plantes, interception par la végétation) ainsi que le flux de chaleur dans le sol G ,
- Pour la végétation, le modèle fournit le potentiel foliaire et la résistance stomatique.

2.1.3. Prise en compte des éléments grossiers

Pour représenter au mieux l'hétérogénéité du sol, il a été décidé de développer le modèle afin qu'il prenne en compte les éléments grossiers présents dans le sol. Cette problématique des éléments grossiers est typique de la zone d'étude et plus globalement de la région méditerranéenne.

Pour la prise en compte des éléments grossiers dans le modèle, nous nous sommes inspirés de ce qui est fait dans le modèle STICS pour lequel la porosité du sol fin Φ (et la réserve utile) sont réduits en fonction du taux de cailloux t_c .

$$\Phi_c = \Phi (1 - t_c)$$

où l'indice c fait référence à la porosité du sol avec éléments grossiers.

Dans le cas du modèle SiSPAT, d'autres propriétés du sol sont modifiées par le taux d'éléments grossiers :

- pour la courbe de rétention, nous nous sommes appuyés sur les travaux de Fiès et al. (2002) qui montrent que, pour les sols dont le taux d'argile est inférieur à 40% (ce qui est le cas de notre sol), on peut considérer que le contenu en eau et la densité sèche d'un sol avec éléments grossiers est identique à celui du sol fin à la même pression. Ceci nous conduit à ne modifier que les valeurs de teneur en eau à saturation et résiduelle en fonction du taux de cailloux et à conserver les mêmes valeurs pour les paramètres h_g et n :

$$\theta_{sc} = \theta_s(1 - t_c) \text{ et } \theta_{sr} = \theta_r(1 - t_c)$$

- pour la courbe de conductivité hydraulique, la littérature ne montrant pas de consensus sur l'effet des cailloux sur la valeur de K_s , (cf section 1.1), nous ne l'avons pas modifié
- la capacité calorifique volumique est obtenue comme une moyenne pondérée de celle du sol fin C_g et de celle des éléments grossiers C_{g_stones} :

$$C_{gs} = C_g(1 - t_c) + C_{g_stones}t_c$$

- pour la conductivité thermique, nous avons supposé, comme Verhoef (2004) pour les différentes phases du sol, que la conductivité thermique du mélange était une moyenne géométrique des conductivités thermique du sol, λ , et des éléments grossiers, λ_{stone} :

$$\lambda_c = \lambda^{(1-t_c)} \cdot \lambda_{stone}^{t_c}$$

2.2. Le modèle STICS

STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard) est un modèle de culture à l'échelle journalière. Ses entrées se rapportent au climat, au sol et au système de culture. Ses sorties sont la production (quantité et qualité), l'environnement et les variations des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture. STICS a été conçu comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. Son but principal est de simuler les effets des variations du milieu et du système de culture sur la production d'une parcelle. Il a aussi été conçu pour être utilisé comme outil avec lequel on peut travailler, collaborer et transférer des connaissances à d'autres domaines scientifiques étroitement liés.

Les principaux processus simulés sont la croissance de la culture et les rendements ainsi que les bilans d'eau et d'azote (Figure 2).

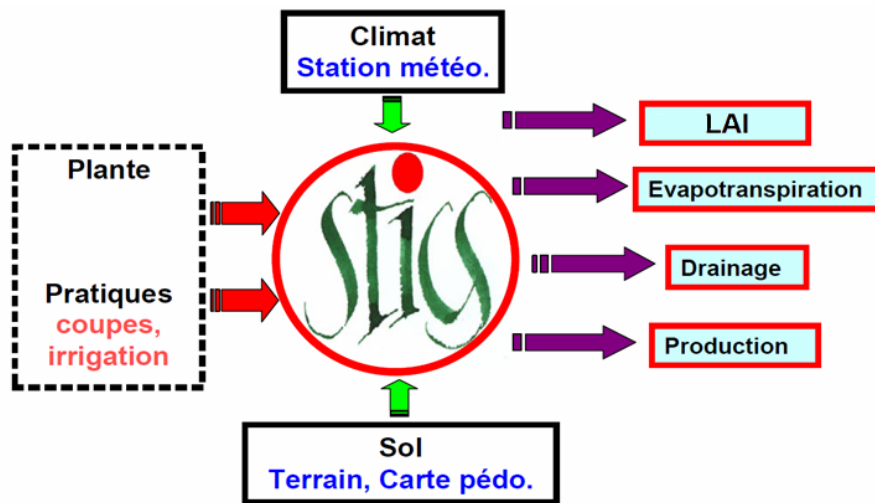


Figure 2 : Schéma utilitaire de STICS (d'après Pimienta (2009))

Les paramètres d'entrée (flèches rouges de la Figure 2) sont liés à l'action de l'homme. Toutes les entrées sont nécessaires pour faire tourner le modèle. On obtient ainsi des sorties (flèches violettes de la Figure 2). La condition limite supérieure est l'atmosphère, caractérisée par les variables climatiques standards (rayonnement, températures minimale et maximale, précipitations, évapotranspiration ou alternativement la vitesse du vent et l'humidité de l'air) et la condition limite inférieure correspond à l'interface sol/sous-sol. Les cultures sont généralement considérées en termes de teneurs en biomasse et en azote hors-sol, indice foliaire et le rendement. Le sol est considéré comme une succession de couches horizontales et chaque couche est caractérisée en termes de teneurs en eau, azote minéral et azote organique. Les interactions sol-culture se déroulent via les racines qui sont définies elles-mêmes par leur densité dans le sol.

Le sol est divisé en plusieurs horizons mais les calculs dans la microporosité sont réalisés par couche d'1 cm d'épaisseur. Le transport d'eau dans les micropores est calculé pour chaque couche d'1 cm en utilisant une approche par réservoirs. Les paramètres concernant les propriétés hydrodynamiques du sol sont renseignés pour chaque horizon : la capacité au champ, le point de flétrissement, la densité sèche, la teneur et le type des éléments grossiers et infiltrabilité.

Les réservoirs d'eau sont reversées, remplissant les couches jusqu'à la capacité au champ. Les constantes des couches d'1 cm (capacité au champ, point de flétrissement et densité sèche) et la teneur en eau initiale sont déduites de celles des 5 horizons décrivant le sol.

La macroporosité et les compartiments fissurés jouent un rôle sur le drainage et sur le ruissellement. Pour chaque horizon, un paramètre d'infiltration journalière est défini. Il permet de limiter la quantité d'eau infiltrée en remplissant les macropores des horizons.

Le bilan hydrique est utilisé pour calculer l'état hydrique du sol et de la plante (aussi bien le stress hydrique qui réduit la croissance des feuilles que la photosynthèse). Le calcul est basé sur l'estimation des besoins en eau du système sol-feuille d'une part et du système sol-racine d'autre part. L'évaporation du sol est calculée en 2 étapes : évaporation potentielle dépendante de l'énergie disponible au niveau du sol et l'évaporation actuelle reliée à la disponibilité en eau. Elle est ensuite distribuée sur les différents horizons. L'évaporation potentielle de la culture est calculée en considérant que ni la surface du sol, ni la surface des plantes ne sont limitées en eau. L'absorption racinaire et la transpiration des plantes sont supposées identiques. L'absorption racinaire totale est calculée et ensuite distribuée sur les couches de sol selon le profil de densité racinaire effectif.

2.3. Les sites d'étude

Le site d'étude est la plaine de la Crau (Figure 3). Il est situé dans le département des Bouches du Rhône et correspond à une zone géographique particulière: c'est une plaine triangulaire de 642 km² délimitée par les villes de Salon de Provence, Fos sur Mer et Arles. Les limites sont au nord le massif des Alpilles, à l'est l'étang de Berre et à l'ouest le bras du grand Rhône. La Crau est le seul biome steppique d'Europe Occidentale, malgré un climat méditerranéen, dû à la quasi-inexistence de réseau hydrographique superficiel naturel.

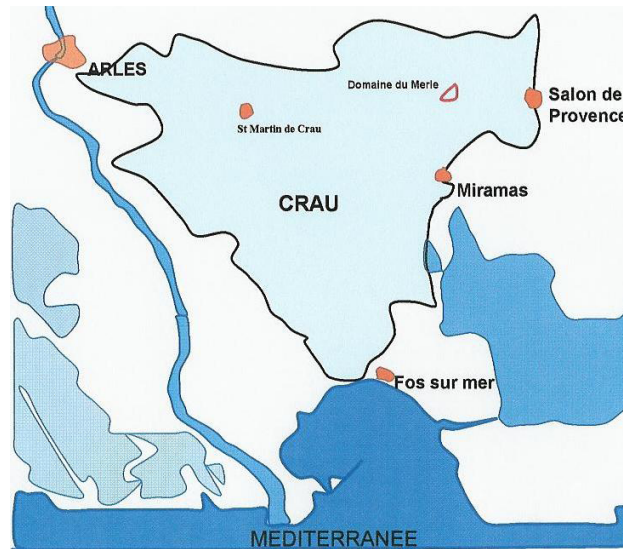


Figure 3 : Situation géographique de la plaine de la Crau (Saos, 2003)

Le climat de plaine de la Crau est un climat méditerranéen caractérisé par des étés chauds et secs, des hivers froids et doux avec des précipitations irrégulières pouvant être accompagnées de vents très violents. Les étés chauds et secs, caractéristiques de ce climat, impliquent une évapotranspiration potentielle élevée pendant 5 à 6 mois de l'année (aux alentours de 8 mm.jour^{-1}). Cette zone est également très exposée au vent. Le mistral souffle en moyenne 110 jours par an à une vitesse de 60 km.h^{-1} et souvent à plus de 100 km.h^{-1} (Mérot, 2007). Ce vent a une incidence sur le type d'irrigation. Il limite fortement l'irrigation par aspersion. L'irrigation gravitaire est donc une alternative obligatoire pour apporter l'eau nécessaire aux cultures.

La plaine de la Crau est quasiment dépourvue de réseau hydrographique de surface. La ressource en eau principale de cette région est la nappe de la Crau. C'est une nappe libre située dans les cailloutis perméables déposés à la fin de l'ère tertiaire. Elle s'écoule du nord-est vers le sud-ouest (Andrieux, 1981). Les prélèvements d'eau dans la nappe sont nombreux. On trouve différents usages de cette ressource : pompes agricoles, industriels et d'alimentation en eau potable des communes de la Crau.

La culture dominante de ce site est le foin de Crau certifié appellation d'origine contrôlée (AOC). Elle représente environ 12000 ha (Comité du foin de Crau).

Il existe en Crau deux types de sol :

- la Crau humide (Figure 4) correspondant à la zone irriguée et se trouvant sous les prairies.

- la Crau sèche ou coussoul (Figure 5) correspondant au sol d'origine et étant utilisé pour une activité pastorale,



Figure 4 : Prairie humide (gauche) et prairie sèche (droite) (Photos F.Tilmant)

Les éléments grossiers retrouvés en Crau sont de nature variable (grès, granite...) et reflètent la diversité des terrains traversés par la Durance. Ils ont été cimentés dans une matrice carbonatée formant un poudingue appelé taparas. La cimentation est importante en surface car les eaux de ruissellement provenant des Alpilles étaient chargées en carbonates. L'épaisseur du poudingue peut atteindre plusieurs dizaines de mètres en certains endroits (Andrieux, 1981). Le taparas est recouvert d'un sol de faible épaisseur dont la teneur en galets varie de 5% à 70%.

Situé au nord-est de la Crau à proximité de Salon de Provence, le Domaine du Merle est une exploitation expérimentale de l'école d'ingénieur Sup'Agro Montpellier. Sur une superficie de 400 ha, l'exploitation du Domaine du Merle se consacre à deux ateliers agricoles majeurs, la production de foin de Crau et l'élevage ovin. 250ha de coussouls (sol caillouteux extrêmement pauvre en végétation) et 150 ha de prairies irriguées, l'apport d'eau se faisant exclusivement par irrigation gravitaire.

L'irrigation gravitaire est la technique d'irrigation la plus ancienne utilisée par l'homme. Il existe 2 types d'irrigation gravitaire : l'irrigation par ruissellement et l'irrigation par submersion. Dans le cas de la prairie irriguée du domaine du Merle, c'est l'irrigation par ruissellement qui est utilisée.

Dans la région de la Crau, on pratique traditionnellement l'irrigation dite «au calan». La parcelle cultivée est bordée par un canal le long duquel sont disposées des martelières qui jouent le rôle de vannes permettant de fermer le canal et donc de provoquer le débordement de l'eau sur la parcelle.

L'eau s'écoule sur la parcelle et l'excédent est évacué à l'extrémité opposée de la parcelle par un canal appelé colature (Figure 6). La portion de parcelle arrosée par le débordement du segment de canal entre deux martelières est appelée un calan.

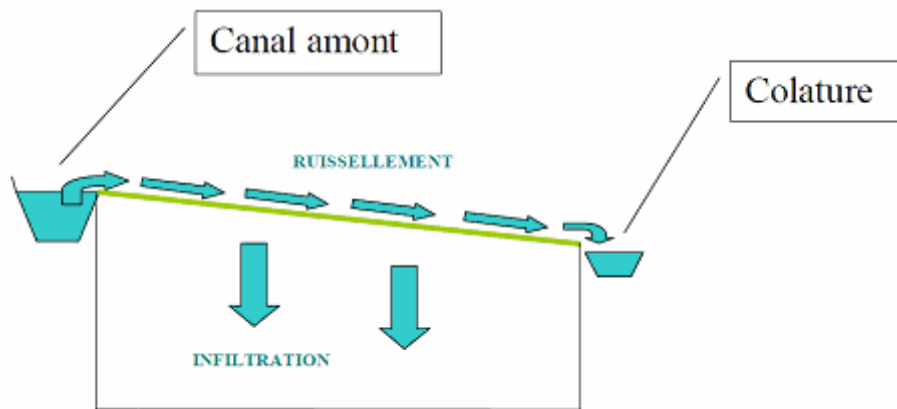


Figure 5 : Schéma représentatif de l'irrigation gravitaire (schéma personnel)

Dans le cadre du stage, deux sites vont être étudiés. Le premier est la parcelle 1J, une prairie humide en production depuis plus de 10 ans qui a été resurfacée en 2002. Sa superficie est de 5,1 ha (435m de long pour 90m de large). Elle a été choisie car elle est en expérimentation depuis longtemps ce qui rend possible l'accès à des données sur plusieurs années, nécessaire à la modélisation (Chabas, 2003, Saos, 2006, Mérot, 2007). Le second site est représentatif de la prairie sèche. La végétation y est beaucoup moins dense et le sol est recouvert de cailloux. Sur ce site, l'instrumentation est beaucoup plus récente. Elle a été mise en place vers mi-mars 2010.

2.4. Les données disponibles et les traitements effectués sur ces données

Les données ont été acquises par l'UMR EMMAH d'Avignon qui les a mises à notre disposition. Sur la prairie humide, nous disposons des données sur les sols et sur les flux de surface ainsi que des données climatiques. Les données sur la prairie sèche sont quand à elles bien plus restreintes. Nous avons des données sur les flux de surface mais aucune sur le sol ou le climat. Compte tenu de la proximité des deux sites distants d'un kilomètre environ, nous considérerons par la suite que le forçage climatique est identique pour les deux parcelles.

2.1.4. Les différentes données mesurées

Les variables climatiques que nous avons utilisées sont les suivantes :

- le rayonnement global incident RG ($W.m^{-2}$)
- le rayonnement global réfléchi aRG ($W.m^{-2}$)
- le rayonnement atmosphérique RA ($W.m^{-2}$)
- le rayonnement atmosphérique réfléchi aRA ($W.m^{-2}$)
- la température du sol à 2.5 et 5 cm de profondeur ($^{\circ}C$)
- la teneur en eau moyenne entre 0 et 5 cm de profondeur
- la température de l'air à 2m ($^{\circ}C$)
- l'humidité relative à 2m (-)
- la pression atmosphérique (hPa)
- la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre sonique ($m.s^{-1}$)
- la direction du vent ($^{\circ}$)
- les précipitations au niveau de la station météo (mm)

Sur la prairie humide, nous disposons de valeurs de teneur en eau à différentes profondeurs (-60, -45, -30 et -15 cm) ainsi que de température du sol à différentes profondeurs (-45, -15 et -5 cm). Deux sites sont instrumentés, respectivement au Nord et au Sud de la parcelle d'étude.

Les variables du fichier de données sur les flux que nous avons utilisées sont les suivantes :

- le rayonnement net Rn ($W.m^{-2}$)
- le flux de chaleur dans le sol à 5 cm de profondeur G_{5cm} ($W.m^{-2}$)
- le stockage de chaleur entre la surface et 5cm de profondeur S ($W.m^{-2}$)
- le flux de chaleur sensible H_{final} ($W.m^{-2}$)
- le flux de chaleur latente LE ($W.m^2$)
- la hauteur de mesure (m)
- la hauteur de canopée (m)

2.1.5. La critique des données

Les fichiers que nous avons récupérés avaient subi un premier filtrage pour enlever les valeurs clairement fausses. Nous avons apporté un second regard critique à ces fichiers pour éliminer les mauvaises données persistantes. Pour reconstruire les données manquantes (mauvaise mesure, absence de mesure), nous avons utilisé une fonction d'interpolation linéaire. Celle-ci a comblé quelques lacunes dans les observations lorsque les séries de données manquantes ne

dépassaient pas 5 éléments. Enfin, nous avons ajusté le pas de temps des données observées au pas de temps du modèle (de 30 minutes initialement à 1 heure).

Les données climatiques ont été acquises toutes les 30 minutes à l'exception des précipitations pour lesquelles le pas d'acquisition est d'une heure.

Les données sur le sol ne sont disponibles qu'à partir du 31/08/2010 et ont été acquises au pas de temps de 5 minutes. La première étape a consisté en la mise bout à bout des 4 fichiers de données. Les données de teneur en eau exprimées en mV ont été converties à l'aide de la formule suivante :

$$\begin{aligned} \text{Teneur en eau } \left(\frac{m^3 \text{ eau}}{m^3 \text{ sol}} \right) \\ = 2.97 \cdot e^{-9} \cdot mV^3 - 7.36 \cdot e^{-6} \cdot mV^2 + 6.69 \cdot e^{-3} \cdot mV - 1.92 \end{aligned}$$

avec mV, valeur de la mesure en mV.

Les données ont été agrégées à 30 minutes pour une comparaison avec les autres observations puis à 1 heure pour une comparaison avec le modèle.

La période de comparaison entre les données de ce fichier et les données acquises tout au long de l'année 2010 des fichiers sur le climat et sur les flux est donc restreinte. La superposition des courbes représentant les précipitations et l'évolution de la teneur en eau dans le sol montre une adéquation entre ces deux variables (Figure 7). Ainsi, une pluie importante conduira à une augmentation de la teneur en eau dans le sol. Cette superposition a également conduit à la mise en place du calendrier d'irrigation.

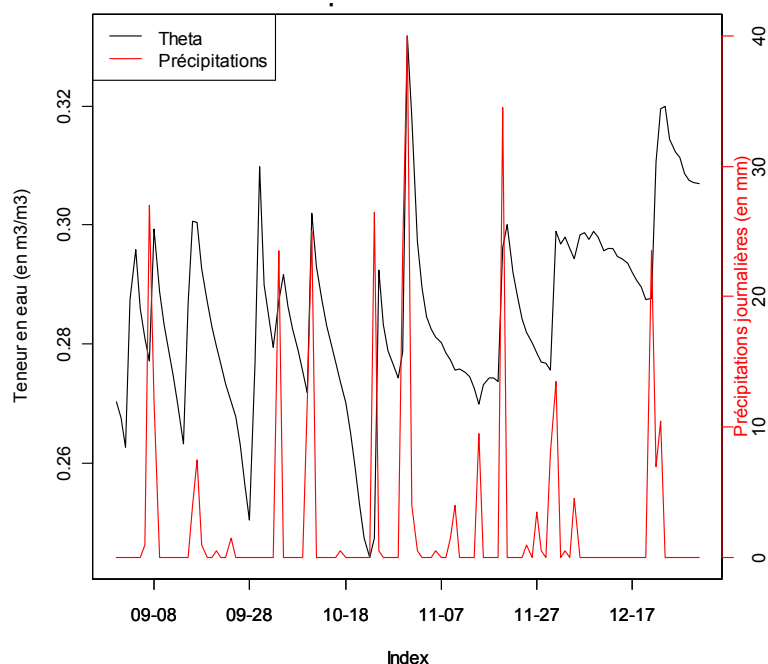


Figure 6 : Représentation de la teneur en eau et des précipitations à partir du 31/08/10

Sur la Figure 8, on se rend compte de l'adéquation entre les 2 courbes. On peut dire par exemple qu'une irrigation a eu lieu le 29/09/10 puisque la courbe de teneur en eau présente un pic alors que la courbe de précipitations indique qu'il n'a pas plu ce jour là. Nous avons procédé ainsi pour mettre à jour le calendrier des irrigations.

Tableau 1 : Dates utilisées pour la gestion de la prairie humide

Date de fauchage	Irrigations estimées Jusqu'au 04/07/10 (Recherche de pics sur la courbe de teneur en eau en absence de précipitations)	Calendrier des irrigations A partir du 04/07/10 (Fourni par l'INRA)
07/05/10	21/03/10	04/07/10
06/07/10	10/04/10	11/07/10
23/08/10	22/04/10	20/07/10
01/10/10	01/05/10	04/08/10
	26/05/10	12/08/10

	11/06/10	26/08/10
	22/06/10	03/09/10
		15/09/10
		29/09/10

Le Tableau 1 résume les principales dates qui ont été utilisées dans le modèle pour la gestion de la prairie humide tant au niveau des irrigations que des fauchages. On y retrouve les différentes dates de fauchage du foin de la Crau. A l'aide des données sur la hauteur de canopée, on distingue 3 dates de fauchage. Un dernier fauchage peut être considéré vers le 01/10/2010. Après discussion avec les personnes en charge des mesures, il s'avère que ce dernier fauchage est réalisé par les moutons qui sont mis en pâture en fin d'année.

Le Tableau 1 présente également les dates retenues pour les irrigations. Nous avons obtenu le calendrier d'irrigation de la parcelle pour l'année 2010 qu'à partir du 04/07/10. Or, les irrigations commencent dès le 23/03/10. La comparaison entre la teneur en eau et les précipitations en début d'année en recherchant les pics sur la courbe de teneur en eau en absence de précipitations nous a permis de déterminer les dates d'irrigations antérieures au 04/07/10.

2.5. La préparation des données pour SiSPAT

2.5.1. Données d'entrée et paramètres du modèle

Le modèle a tout d'abord besoin d'un fichier de forçage atmosphérique qui comprend les variables suivantes : rayonnements solaire et grandes longueurs d'onde incidents, température et humidité spécifique de l'air, vitesse du vent, précipitations, pression atmosphériques et les apports d'eau (irrigations). Les données ont été agrégées à 1 heure. L'irrigation a été ajoutée à la surface du sol dans le modèle. Une irrigation correspond à 150mm d'eau répartis sur 6 heures.

Pour la description du sol, il faut d'abord définir le maillage. On divise le sol en plusieurs horizons aux propriétés hydrodynamiques et thermiques différentes. Ces horizons sont ensuite divisés en couches et nœuds de calcul avec un maillage resserré près des interfaces. A l'aide d'informations présentes dans la thèse d'Anne Mérot (2007), il a été possible de découper le sol de la prairie humide en 4 horizons et de leur affecter un taux de cailloux. Nous étudierons 2 cas : un cas avec prise en compte des cailloux et un autre sans prise en compte des cailloux. Le découpage a été réalisé de la manière suivante :

- de 0 à 20 cm de profondeur : horizon 1 avec un taux de cailloux de 5%,
- de 20 à 60 cm de profondeur : horizon 2 avec un taux de cailloux de 20%,
- de 60 à 85 cm de profondeur : horizon 3 avec un taux de cailloux de 70%,
- de 85 cm à 1 m de profondeur : horizon 4 avec un taux de cailloux de 70%.

On doit aussi fixer les conditions initiales et aux frontières. Les flux de masse et de chaleur sont calculés par le modèle à la frontière supérieure. Pour la frontière inférieure, on a retenu un flux d'eau gravitaire et une température sinusoïdale imposées. Pour les conditions initiales, on interpole linéairement les mesures de température et de pression sur le maillage du modèle.

Pour la définition des propriétés hydrodynamiques des différents horizons, en l'absence de données in situ, nous avons, dans un premier temps, utilisé les fonctions de pédo-transfert de Rawls et Brackensiek (1985). Les relations statistiques proposées par Rawls et Brackensiek permettent d'évaluer le paramètre d'échelle de pression h_{bc} (cm), le paramètre de forme de rétention de Brooks and Corey λ , la teneur en eau résiduelle θ_r (m^3/m^3) et la conductivité hydraulique à saturation K_s (cm/h) en fonction des pourcentages de sable et d'argile et de la porosité (m^3/m^3) sur le domaine de texture suivant : $5\% < \text{argile} < 60\%$ et $5\% < \text{sable} < 70\%$ (Annexe 1). On peut ensuite en déduire les paramètres pertinents pour le modèle de Van Genuchten.

De même, faute de mesures disponibles, nous avons utilisé le modèle de Van de Griend et O'Neill (1985) pour la conductivité thermique.

Pour la description de la végétation, on prescrit dans le modèle l'évolution de la hauteur du couvert (mesurée), de l'indice foliaire ainsi que celle des profils racinaires. La prairie étant pérenne, nous avons pris un profil racinaire constant avec une profondeur maximale de 60 centimètres. Dans un premier temps, nous avons utilisé les mesures d'indices foliaires de l'année 2006 sur la prairie humide (Mérot, 2007). A partir des valeurs maximales et minimales et des dates de fauchage, nous avons pu retracer l'évolution de l'indice foliaire sur l'année 2010 que nous avons utilisée comme paramètre d'entrée du modèle SiSPAT (Annexe 2). Une fois la simulation avec le modèle STICS correspondant à notre site et notre période d'étude récupérée, nous avons utilisé l'indice foliaire simulé par STICS.

Enfin, il est nécessaire de renseigner des paramètres décrivant la surface : albédo, émissivité, rugosité pour lesquels nous avons utilisé des valeurs de la littérature ou les mesures (albédo). Nous avons aussi évalué les deux choix possibles pour la formulation des résistances aérodynamiques (Shuttleworth et Wallace, 1985 ; Taconet et al, 1986).

2.5.2. Données de validation

Pour évaluer la qualité des simulations de SiSPAT, nous avons utilisé au maximum les données collectées sur les sites et retenu les trois critères suivants :

- le biais : $\overline{Mod} - \overline{Obs}$
- la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) : $\sqrt{\frac{1}{n} \times \sum (Mod - Obs)^2}$
- l'efficacité : $1 - \frac{\sum (Mod - Obs)^2}{\sum (Obs - \overline{Obs})^2}$

avec :

Mod : valeurs des simulations

Obs : valeurs des observations

\overline{Mod} : moyenne des valeurs simulées

\overline{Obs} : moyenne des valeurs observées

n = nombre d'observations

Ces trois critères sont complémentaires et ce sont des critères classiques d'étude statistique. De plus, ils sont quantitatifs, ce qui est intéressant pour comparer les résultats obtenus pour les différentes simulations. Le biais correspond au défaut systématique du modèle. Il permet de mettre en évidence une sous-estimation ou une surestimation du modèle. La racine de l'erreur quadratique moyenne permet de juger de la dispersion du nuage de points de coordonnées ($x = \text{Observation}$, $y = \text{Modélisation}$) par rapport à la droite $y = x$. Enfin, une efficacité proche de 1 indique une bonne adéquation du modèle aux observations. Une valeur nulle ou négative indiquerait que le modèle est autant ou moins performant qu'un modèle de simulation qui proposerait comme valeur modélisée la moyenne des observations.

Les données d'évaluation du modèle sont les flux de surface (Rn , H , G et LE), les teneurs en eau et températures du sol à différentes profondeurs. Nous nous intéresserons aussi au bilan hydrique sur la parcelle et à l'évolution du potentiel foliaire même si cette grandeur n'a pas été mesurée sur le terrain. Le bilan hydrique nous donnera un aperçu de la répartition de l'eau sur la parcelle. Le potentiel foliaire va nous permettre de déterminer d'éventuelles périodes de stress hydrique pour la végétation.

2.6. Stratégie de modélisation

Le modèle SiSPAT n'avait jamais été appliqué dans un contexte d'irrigation aussi important et peu de choses étaient encore connues sur les sols de la Crau. Nous avons donc cherché à établir une simulation de référence représentant de manière satisfaisante à la fois les flux de surface et les teneurs en eau et température dans le sol sur la prairie humide.

La première étape du travail a consisté en la réalisation de plusieurs simulations avec un jeu de paramètres tiré de la littérature ou des mesures si elles existaient.

Différentes situations ont été retenues pour la prairie humide:

- avec ou sans prise en compte du 4^{ème} horizon (taparas),
- avec ou sans prendre en compte les éléments grossiers.

Le cas à 3 horizons (sans la prise en compte du 4^{ème} horizon de sol) a été abandonné rapidement car sur la prairie humide, ce cas n'était pas satisfaisant dès les premières

simulations. Surtout, il nous semblait pertinent de pouvoir représenter explicitement un éventuel effet de barrière de l'horizon induré.

Dans le cas à 4 horizons, une fois les premières simulations réalisées, nous avons pu identifier 2 paramètres qui étaient clairement responsables des mauvais résultats observés : la densité racinaire maximale et les conductivités hydrauliques des différents horizons. La deuxième étape du travail a donc consisté en des analyses de sensibilité sur ces paramètres. Nous avons adopté une analyse de sensibilité consistant à faire évoluer un paramètre sur une gamme de valeurs assez large en maintenant les autres paramètres constants (analyse OAR (One at a Time), Van Griensven et al., 2006). Les analyses de sensibilité ont permis de définir des plages de valeurs plausibles pour ces 2 paramètres.

Au fur et à mesure que la comparaison entre modèle et observation donnait des résultats de plus en plus satisfaisants grâce aux analyses de sensibilité, nous avons mené une analyse plus fine sur les options du modèle SiSPAT. Nous avons ainsi observé le comportement du modèle à une variation de la fonction d'albédo appliquée au modèle. L'albédo du sol nu a été calculé à l'aide d'une fonction de l'albédo total, de l'albédo de la végétation et du facteur d'atténuation du rayonnement, ceci afin d'assurer que le rayonnement global réfléchi soit égal à celui mesuré. On obtient l'albédo mesuré à partir du rapport entre le rayonnement global réfléchi et le rayonnement global incident de 11h à 14h.

Nous avons fait de même pour les résistances aérodynamiques en testant l'approche de Taconet et al. (1986) en prenant une valeur constante du rapport $\frac{z_{om}}{z_{oh}} = 10$ avec z_{om} , la longueur de rugosité au transfert de quantité de mouvement et z_{oh} , la longueur de rugosité au transfert de chaleur. Nous avons ensuite fait varier ce rapport entre 5 et 20 pour voir son action sur la simulation.

Enfin, nous avons joué sur le coefficient d'extinction a_{bl} (issu de la formule $\sigma_s = 1 - \exp(-a_{bl} LAI)$ où σ_s est la fraction de couvert végétal) avec une gamme de valeur allant de 0.5 à 0.8.

Nous avons utilisé ce jeu de paramètres de référence et testé l'impact de la prise en compte des éléments grossiers selon la méthodologie présentée en 2.1.3

Comme mentionné précédemment, pour la comparaison avec STICS, nous avons utilisé l'indice foliaire simulé par STICS comme entrée pour le modèle SiSPAT. Pour les taux d'éléments grossiers de chaque horizon, nous avons utilisé des taux différents. La simulation STICS présentait des taux respectifs de 10, 55 et 75% d'éléments grossiers pour ses 3 horizons depuis la surface jusqu'au taparas alors que nous avons pris des taux de 5, 20 et 70% d'éléments grossiers pour les 3 premiers horizons de la simulation avec le modèle SiSPAT. De plus, nous avons fixé une teneur en éléments grossiers de 70% pour l'horizon le plus profond (taparas). Les taux sont différents entre les deux modèles car nous nous sommes basés sur les études de sol de Mérot (2007) pour fixer ces taux. La simulation STICS a été réalisée par le personnel de l'INRA Avignon qui a pris des taux d'éléments grossiers plus élevés. Une simulation a de nouveau été lancée avec le modèle SiSPAT en prenant les taux d'éléments grossiers utilisés dans STICS.

Pour la prairie sèche, nous avons effectué un découpage en 3 horizons en supprimant le premier horizon de la simulation avec 4 horizons qui correspondent à la couche de limons (Martial, 1994). Dans les paramètres du modèle, nous avons repris des paramètres de sol identiques à ceux de la prairie humide. Les seules données dont nous disposions étaient les données sur les flux. N'ayant aucune donnée sur la végétation, il a fallu estimer un indice foliaire, une hauteur de canopée ainsi qu'une densité racinaire maximale pour l'année 2010. La visite sur le site au mois d'avril nous a montré que la végétation était peu développée sur la prairie sèche. Elle était composée de quelques arbustes et de touffes d'herbe (Figure 5). Nous avons fixé une densité racinaire de 5000 m de racine par m³ de sol. Les précipitations sont l'unique apport d'eau pour la prairie sèche. 638mm ont été mesurées sur l'année 2010.

Nous avons supposé que la végétation poussait linéairement de 0.02 m à 0.1 m du 01/01/10 au 03/05/10 puis du 03/07/10 au 01/11/10. Nous avons également fixé une croissance linéaire de l'indice foliaire de 0.55 à 1 sur ces mêmes périodes (Annexe 2). Ensuite, nous avons considéré une décroissance linéaire jusqu'à la fin de l'année 2010 pour ces deux paramètres de végétation avec pour valeurs 0.07m pour la hauteur de canopée et 0.55 pour l'indice foliaire au 31/12/10.

3. Résultats

3.1. Analyse des données et comparaison des deux sites

Nous avons représenté l'évolution des flux de surface à l'échelle journalière au cours de l'année 2010 (Figure 8) en calculant une moyenne journalière pour chaque flux. Ceci a été réalisé sur les 2 sites d'étude, la prairie irriguée et la prairie sèche.

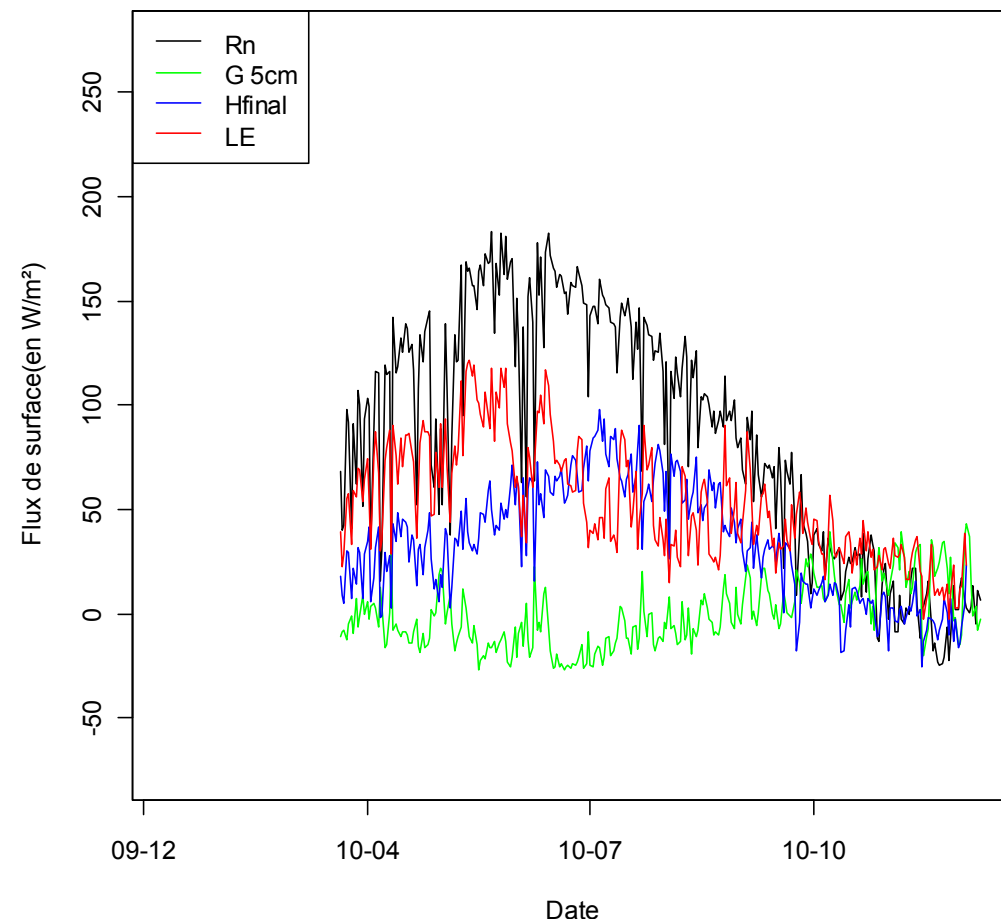
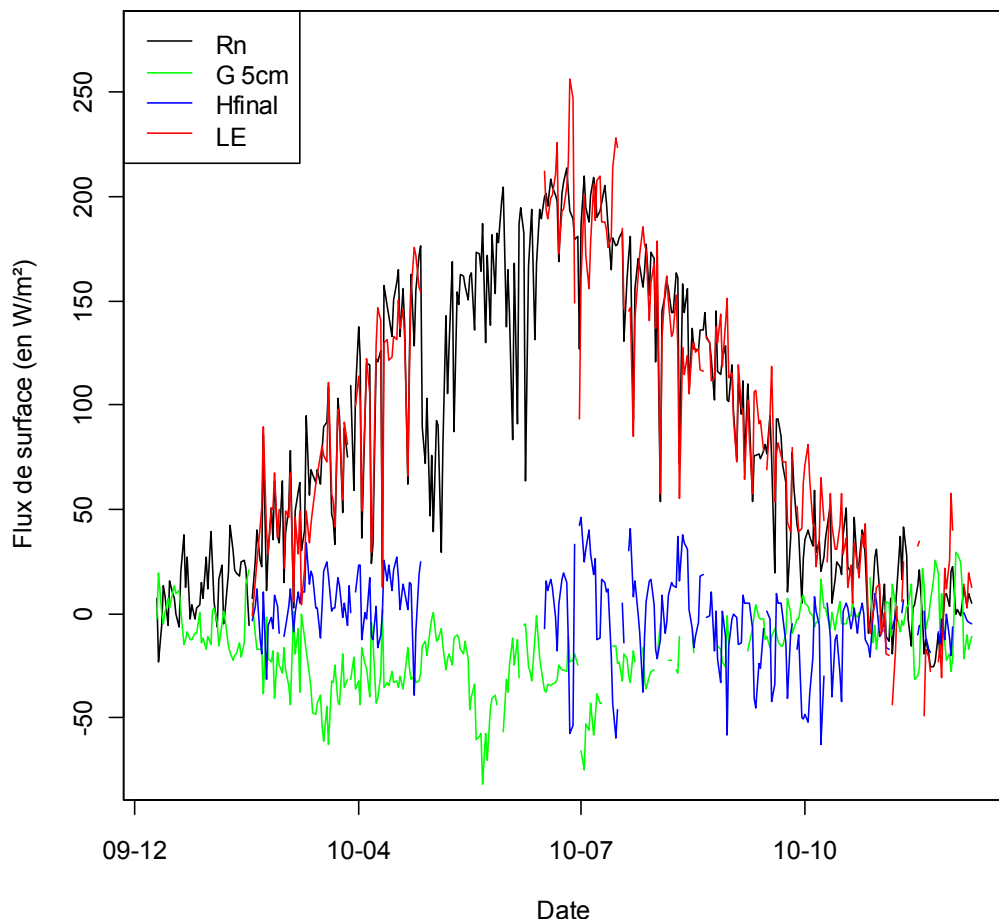


Figure 7 : Evolution temporelle des flux journaliers sur la prairie humide (à gauche) et sur la prairie sèche (à droite)

On remarque tout d'abord que le rayonnement net, correspondant à l'énergie disponible, est sensiblement le même sur les deux sites étudiés, avec des valeurs légèrement plus importantes sur la prairie humide. La différence majeure se situe au niveau du flux de chaleur latente. Pour la prairie humide, ce flux est très important et vaut quasiment la valeur du rayonnement net. Pour la prairie sèche, la partition entre les flux est totalement différente puisque ce flux est beaucoup moins important. On peut expliquer ceci par la densité de la végétation qui est totalement différente entre les deux sites. Ainsi, sur la prairie humide, on a une végétation dense et irriguée qui va conduire à une évapotranspiration plus importante et donc à un flux de chaleur latente plus élevé. La végétation étant plus éparse sur la prairie sèche, l'évapotranspiration sera beaucoup moins importante et le flux de chaleur latente sera donc plus faible.

Au contraire, le flux de chaleur sensible augmente considérablement sur la prairie sèche. Les échanges thermiques entre le sol et l'atmosphère sont plus importants en raison de la faible densité végétale d'où l'augmentation de ce flux.

Il est intéressant de remarquer que pendant une période relativement longue (du 23/08/10 au 23/12/10), le flux de chaleur sensible journalier est globalement négatif pour la prairie humide. On observe le même phénomène un peu plus tard sur la prairie sèche (du 30/10/10 au 25/12/10). Nous avons cherché à vérifier la cohérence de ce phénomène en observant la différence entre la température radiative recalculée à partir du bilan radiatif T_s et la température de l'air T_a . Celle-ci est négative sur cette période d'où le signe négatif du flux H puisqu'il est, en première approximation, proportionnel à $T_s - T_a$. Ces valeurs négatives du flux de chaleur sensible semblent donc plausibles. Nous avons également observé la direction du vent sur cette période. En effet, la prairie étant bordée par 2 haies d'arbres hauts de plusieurs mètres sur ses flancs Est et Ouest, lorsque le vent souffle dans ces directions, les valeurs de flux données par les capteurs peuvent être incorrectes. Mais nous avons pu constater qu'il n'en était rien et que la direction du vent était plutôt Nord-Sud sur ces périodes de flux de chaleur sensible négatif.

Nous avons ensuite étudié les données sur le sol (teneur en eau et température du sol à différentes profondeurs).

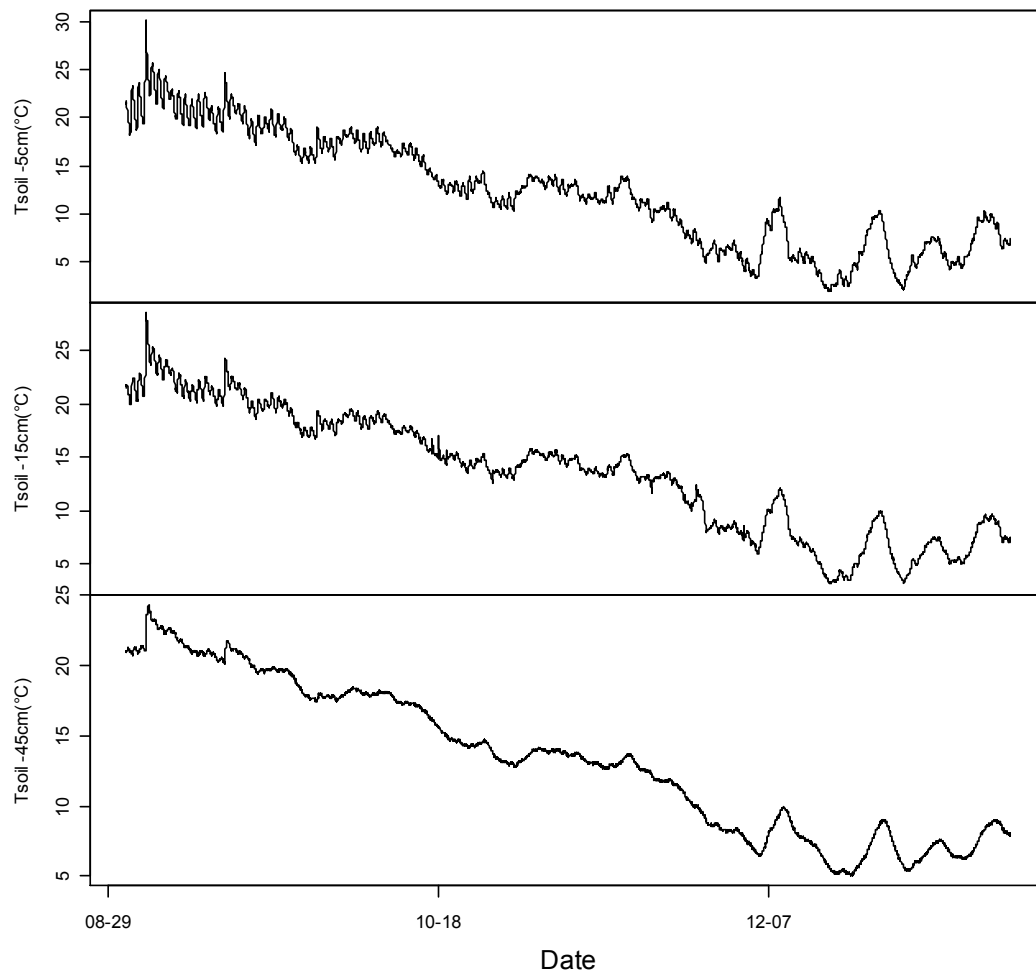


Figure 8 : Evolution de la température du sol à 5, 15 et 45 cm de profondeur (pas d'acquisition = 0.5 h) au Sud de la prairie humide

La Figure 8 présente l'évolution des températures du sol aux trois profondeurs. Nous remarquons un déphasage qui augmente avec la profondeur. Les variations périodiques des flux radiatifs à la surface du sol provoquent des fluctuations de température en profondeur qui sont réglées par l'équation générale de la chaleur. On remarque également l'amortissement progressif de l'onde thermique en profondeur. Cependant, les dynamiques d'évolution restent identiques quelle que soit la profondeur.

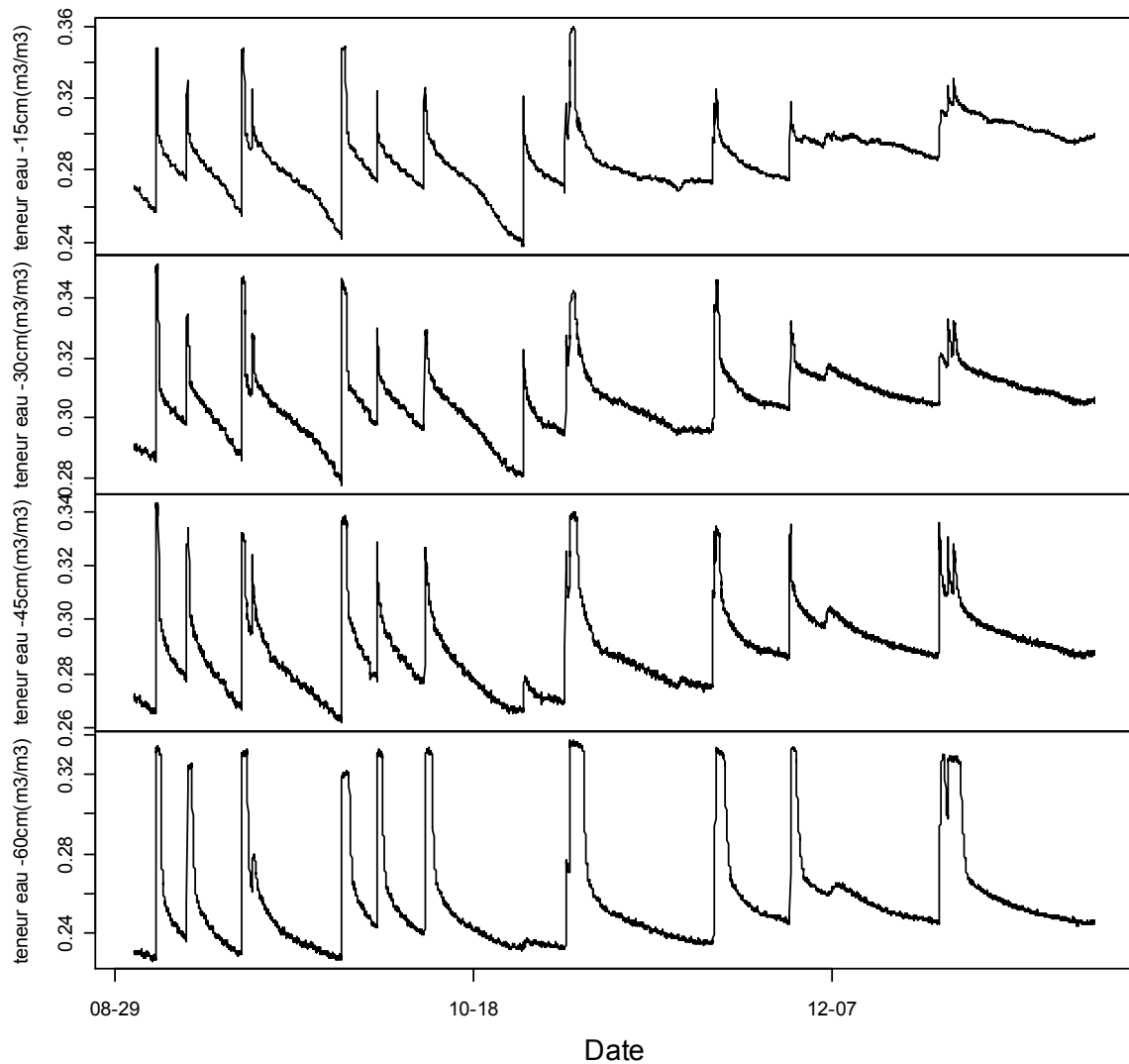


Figure 9 : Evolution de la teneur en eau dans le sol à 15, 30, 45 et 60 cm de profondeur (pas d'acquisition = 0.5 h) au Sud de la prairie humide

La Figure 9 présente l'évolution de la teneur en eau au Sud de la prairie humide. On remarque tout d'abord une forte croissance de la teneur en eau après une pluie ou une irrigation suivie d'une décroissance très rapide. Ceci peut s'expliquer par un taux d'infiltration élevé sur ces sols avec un drainage sous la zone racinaire important. Les conductivités hydrauliques à saturation doivent donc être élevées sur les différents horizons considérés.

3.2. Résultats des premières simulations SiSPAT

Le modèle a donc été lancé une première fois avec ce jeu de paramètres. A première vue, les résultats sur les flux de surface étaient plutôt satisfaisants et en adéquation avec les observations. La température du sol simulée à différentes profondeurs suivait également la même dynamique que les observations. Cependant, les résultats sur la teneur en eau se sont montrés très mauvais.

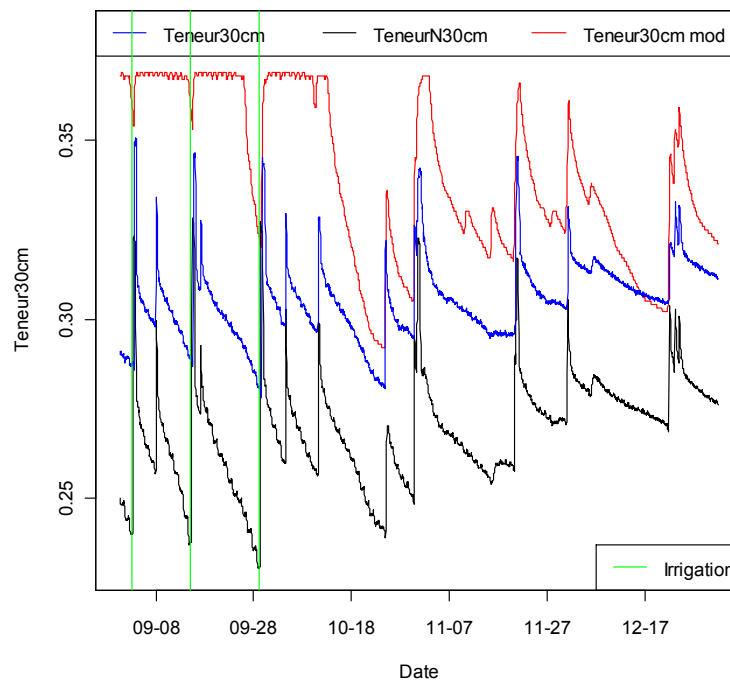


Figure 10 : Représentation des teneurs en eau modélisée (courbe rouge) et observées (courbes bleue (Sud) et noire (Nord))

En effet, dès les premiers horizons, il y avait saturation du sol en eau et la teneur en eau se maintenait à la teneur en eau à saturation, fixée dans les paramètres du modèle, pendant plusieurs jours. Cette constatation est en contradiction avec les teneurs en eau observées (courbes bleue (Sud) et noire (Nord) de la Figure 10).

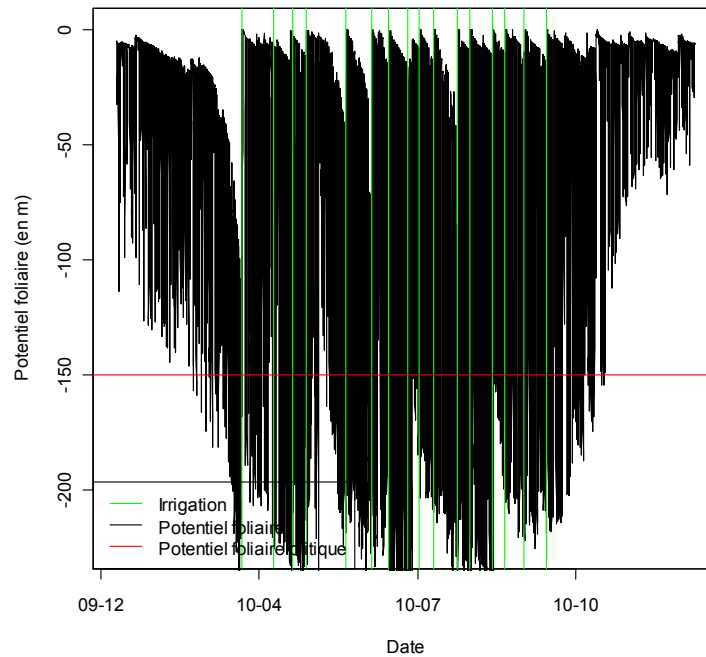


Figure 11 : Représentation du potentiel foliaire simulé (gris).

La valeur de -150m est la valeur critique au-delà de laquelle le stress hydrique croit rapidement. Les traits verticaux en verre représentent les dates des irrigations

De plus, la courbe représentative de l'évolution temporelle du potentiel foliaire (Figure 11) montre que la végétation présente un état de stress hydrique important. En effet, une pression inférieure à -150m correspond à un stress hydrique de la végétation. Ceci peut notamment s'expliquer par une inadéquation entre l'indice foliaire plutôt élevé lorsque la végétation a poussé et la densité racinaire initialement choisie dr_{max} plutôt faible (5000 m de racine par m^3 de sol). Les agriculteurs maîtrisent la pratique de l'irrigation et font en sorte que la végétation ne soit jamais soumise à un stress hydrique qui risquerait de diminuer le rendement de la parcelle. Simuler un stress hydrique important n'est donc pas cohérent avec ces pratiques.

En représentant le potentiel foliaire en fonction du temps sur la prairie sèche, on remarque que la végétation est en stress hydrique quasiment tout au long de l'année. En y superposant les précipitations, on constate que les jours de pluie, la végétation n'est plus en état de stress hydrique mais ceci ne dure que le jour de la pluie.

3.3. Analyse de sensibilité et obtention d'une simulation de référence

Pour la suite de notre étude, nous avons décidé de continuer sur le cas de la prairie irriguée sans prendre en compte les éléments grossiers afin de nous focaliser sur les estimations des paramètres jouant sur la dynamique globale. Le peu de données disponibles pour évaluer les simulations sur la prairie sèche nous ont dissuadés d'aller très loin dans l'analyse de sensibilité sur ce site. De plus, nous ne disposions pas de simulations avec le modèle STICS sur ce site.

Nous avons donc réalisé une analyse de sensibilité sur la densité racinaire maximale et les conductivités hydrauliques des différents horizons afin d'évaluer leurs effets sur la simulation. L'analyse de sensibilité sur ces paramètres présente un double objectif :

- empêcher l'apparition d'un stress hydrique. En effet, les agriculteurs maîtrisent la pratique de l'irrigation et l'adaptent pour qu'il n'y ait pas d'apparition de stress hydrique pour la végétation,
- éviter la saturation du sol en eau. Des expériences ont été menées sur la lame d'eau lors de l'irrigation et ont montré que l'eau s'infiltrait rapidement sans créer de saturation (Albergel, 2004). Ces conclusions sont confortées par la représentation de l'évolution des teneurs en eau.

Pour mettre en évidence les effets sur la simulation de chacun des paramètres étudiés, nous avons représenté l'évolution de la teneur en eau à 15 cm de profondeur ainsi que le potentiel foliaire qui indique si la plante est en état de stress hydrique ou non. Ceci nous a permis de mettre clairement en évidence les valeurs optimales des différents paramètres.

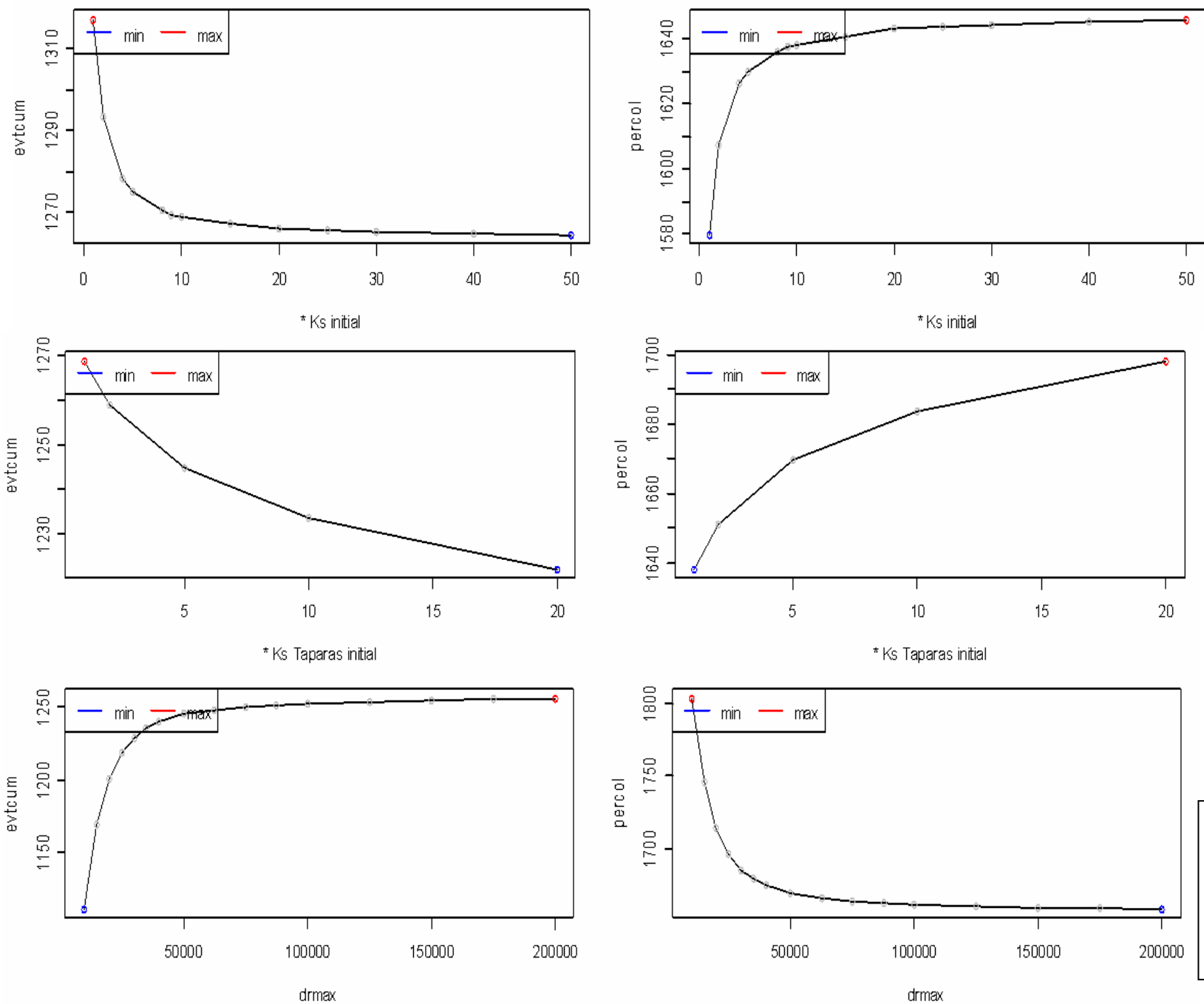
Le premier paramètre étudié a été la conductivité hydraulique à saturation des trois premiers horizons. Les valeurs obtenues à l'aide de la fonction de pédo-transfert de Rawls – Brakensiek se sont montrées clairement trop basses dans les premières simulations (10^{-7}m.s^{-1} environ). La conductivité hydraulique du dernier horizon, mesurée sur le terrain, s'est révélée bien plus élevée ($8,3 \cdot 10^{-6} \text{m.s}^{-1}$, Andrieux, 1981). Nous avons donc décidé de multiplier ce paramètre pour les trois premiers horizons par différents facteurs pour observer la réactivité du système

à celui-ci. Dès qu'il a été multiplié par 5, nous avons observé que la saturation du sol en eau n'était plus autant marquée. A partir d'un facteur 10, la saturation du sol en eau est infime. C'est à partir d'un facteur 30 que les périodes de saturation disparaissent définitivement.

Nous avons également fait évoluer la conductivité hydraulique du quatrième horizon en prenant une densité racinaire de 50000 m de racine par m³ de sol et une valeur de 10 fois les conductivités hydrauliques calculées avec la fonction de pédo-transfert de Rawls – Brakensiek. L'évolution des composantes évapotranspiration et drainage sous la zone racinaire du bilan hydrique pour cette analyse de sensibilité sur le dernier horizon est similaire à celle de l'analyse de sensibilité sur les conductivités hydrauliques des 3 premiers horizons.

Ensuite, on a testé le paramètre «densité racinaire maximale». La valeur de départ était de 5000 m de racine par m³ de sol. Nous avons fait évoluer progressivement cette valeur jusqu'à une valeur maximale de 200000 m de racine par m³ de sol. Nous avons observé l'évolution du potentiel foliaire simulé en fonction de la densité racinaire maximale choisie. Plus la densité racinaire maximale augmente, moins la végétation est en état de stress. L'extraction racinaire est en effet plus importante, ce qui permet à la plante de pouvoir consommer les ressources en eau dont elle a besoin.

La Figure 12 représente l'évolution des composantes évapotranspiration et drainage pour les différentes analyses de sensibilité. Elle permet de se rendre compte des effets de ces analyses de sensibilité sur la partition du bilan hydrique.



Légende :
 evtcum : Evapotranspiration (en mm)
 percol : Drainage (en mm)

Figure 12 : Analyse de sensibilité sur la conductivité hydraulique des 3 premiers horizons (en haut), la conductivité hydraulique du dernier horizon (au milieu) et la densité racinaire maximale (en bas)

En augmentant la conductivité hydraulique à saturation des trois premiers horizons, on remarque qu'au delà d'un facteur 20, un palier est atteint pour les composantes du bilan hydrique :

- 1640 mm pour le drainage qui augmente avec la conductivité hydraulique. On explique ceci par le fait que l'augmentation de la conductivité hydraulique à saturation favorise l'infiltration et donc le drainage sous la zone racinaire
- 1260 mm pour l'évapotranspiration qui diminue avec la conductivité hydraulique.

Cependant, les variations sur les composantes du bilan hydrique sont peu marquées lorsque la conductivité hydraulique à saturation varie (un maximum de 60mm entre valeurs minimale et maximale observées pour le drainage). Nous avons vu qu'un facteur 30 permettait d'éviter la saturation du sol en eau. Il sera donc judicieux pour la suite de l'étude de prendre une conductivité hydraulique à saturation supérieure à 30 fois la valeur initiale calculée avec la fonction de pédo-transfert de Rawls et Brakensiek.

Au delà de 100000 m de racine par m³ de sol, les composantes du bilan hydrique se maintiennent à un palier :

- 1250 mm pour l'évapotranspiration qui augmente avec la densité racinaire. En augmentant la densité racinaire, on augmente l'extraction racinaire. Les plantes vont donc avoir tendance à consommer plus d'eau d'où l'augmentation de la composante évapotranspiration
- 1650 mm pour le drainage sous la zone racinaire qui diminue avec la densité racinaire. L'eau étant moins disponible dans le sol, le drainage sera moins important.

Ce paramètre joue un rôle plus important que la conductivité hydraulique. Les évolutions sont en effet plus marquées avec ce paramètre (de 150 à 200 mm entre valeurs minimale et maximale de chaque composante).

Pour l'analyse de sensibilité sur la conductivité hydraulique à saturation du dernier horizon, comme pour les deux analyses de sensibilité précédentes, on remarque une forte évolution pour les facteurs les moins élevés. Au delà d'un facteur 10, l'évolution est moins marquée.

Nous avons mené différentes modifications sur le jeu de paramètres pour voir s'il était possible d'améliorer la simulation une fois les principaux paramètres (densité racinaire maximale et conductivité hydraulique) plus justement estimés. Ainsi, après une modification de la fonction d'albédo appliquée au modèle infructueuse, nous avons fait évoluer les résistances aérodynamiques et le coefficient d'extinction et avons pu obtenir un jeu de paramètres nous fournissant une simulation de référence (résistances aérodynamiques calculées selon la formule de Taconet et al. (1986) avec un rapport $\frac{R_{am}}{R_{oh}} = 5$ et un coefficient d'extinction de 0.8). Nous utiliserons ce jeu de paramètres dans le cadre du développement du modèle prenant en compte les éléments grossiers.

Après discussion avec le personnel en charge des données sur le site d'étude, nous avons appris qu'une fois coupé, le foin peut être laissé sur la parcelle pour sécher pendant 1 à 2 jours. Ceci joue temporairement un rôle très important sur les différents flux ainsi que sur différents paramètres tels que l'albédo ou la conductivité thermique du sol. Nous avons créé un 5^{ème} horizon de 2cm d'épaisseur susceptible de caractériser ce foin coupé. Nous lui avons conféré une conductivité thermique très faible. Malheureusement, cette représentation n'a pas fourni de résultats intéressants. Le foin coupé n'est présent que quelques jours dans l'année et la création de ce 5^{ème} horizon équivaut à une présence permanente à la surface du sol de ce foin fauché. Le modèle n'étant pas adapté à la prise en compte de cette couche d'herbes, nous avons décidé de ne pas tenir compte des valeurs simulées dans les 3 jours suivants la date de fauchage pour le calcul des critères statistiques présentés en section 2.5.2. Les résultats sur les flux sont légèrement améliorés sur le flux de chaleur dans le sol G .

Dans les lignes 2 et 3 du Tableau 2, on compare notamment les efficacités calculées pour les flux de surface pour la première simulation et la simulation de référence sur la prairie humide avec le modèle initial. On remarque que dès la première simulation les résultats sur le rayonnement net Rn sont très bons (efficacité de 0.99). Le flux de chaleur latente LE est lui aussi relativement bien simulé. On a tout de même progressé sur la simulation de ce flux à l'aide de l'analyse de sensibilité. Les évolutions importantes sont illustrées par les efficacités des flux de chaleur sensible H et de chaleur dans le sol à 5 cm de profondeur, G_{5cm} avec le passage d'une efficacité négative à une efficacité de 0.76. Nous avons représenté les valeurs simulées en fonction des valeurs observées (Annexe 3).

3.4. Développement du modèle pour la prise en compte des éléments grossiers

Nous avons lancé peu de simulations avec la version du modèle prenant en compte les éléments grossiers, présentée en section 2.1.3. Les simulations effectuées avec le modèle développé montrent (ligne 4 du Tableau 2) une légère dégradation sur les flux de chaleur sensible H et le flux de chaleur latente LE . Le rayonnement net Rn est toujours très bien simulé. La grosse difficulté réside dans le flux de chaleur dans le sol à 5cm G_{5cm} pour lequel les résultats deviennent très mauvais.

Au niveau des composantes évapotranspiration et drainage sous la zone racinaire, on note une diminution de la part d'évapotranspiration de la simulation avec le modèle prenant en compte les éléments grossiers de 115 mm environ. Cette différence se retrouve sur la composante drainage avec une augmentation de 115 mm par rapport à la simulation de référence du modèle initial.

Nous avons joué sur la conductivité thermique des cailloux. Dans un premier temps, nous avons considéré que les éléments grossiers étaient constitués de quartz et avons donc choisi une conductivité thermique de $7.7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Nous avons ensuite modifié cette conductivité thermique à $1.3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, les éléments grossiers étant des grès (Andrieux, 1981). Les résultats sur les flux de surface sont plus intéressants. On progresse notamment dans la simulation du flux de chaleur dans le sol même si l'efficacité reste toujours négative.

En prenant en compte des teneurs en éléments grossiers identiques à celles prises pour le modèle STICS, on dégrade encore plus la qualité de la simulation notamment sur le flux de chaleur sensible H .

Ainsi, la prise en compte des éléments grossiers par le modèle a permis de débiter un travail sur la caractérisation plus précise de l'hétérogénéité des sols à l'aide de différentes fonctions, prenant en compte la teneur en éléments grossiers, appliquées sur les paramètres du modèle. Certaines propriétés, comme la conductivité thermique, semblent jouer un rôle déterminant dans le calcul des bilans. On remarque une augmentation du drainage sous la zone racinaire avec ce modèle. Cependant, nous n'avons pas pris en compte l'influence des éléments

grossiers sur la conductivité hydraulique. Celle-ci pourrait être augmentée en créant des chemins préférentiels pour l'eau et ainsi accentuer la part du drainage dans le bilan hydrique.

3.5. Simulation sur la prairie sèche

Sur la prairie sèche, nous n'avons aucune information sur le sol donc il n'a pas été possible de comparer les teneurs en eau et les températures du sol. Cependant, d'après la simulation réalisée, le sol peut être très sec (teneur minimale de 0.12 m^3 d'eau par m^3 de sol). Nous avons également regardé l'évolution de la température du sol. Jusqu'à 15cm de profondeur, la température du sol suit les évolutions de la température de l'air. Ainsi, en début et en fin d'année 2010, les 5 premiers centimètres du sol gèlent. Plus en profondeur, les évolutions de températures sont moins marquées et à une profondeur de 45cm, la température du sol est comprise entre 10 et 20°C tout au long de l'année.

On remarque que les flux de surface sont très mal représentés sur la prairie sèche (ligne 5 du Tableau 2). Le rayonnement net Rn reste bien simulé alors que les autres flux le sont beaucoup moins. Des efficacités négatives sont même calculées pour le flux de chaleur sensible H et le flux de chaleur dans le sol à 5 cm $G_{5\text{cm}}$. D'après les courbes de valeurs simulées en fonction des valeurs observées, on remarque que :

- pour le rayonnement net, le nuage de points se situe bien autour de la droite d'équation $y = x$. On simule donc correctement ce flux,
- Pour le flux de chaleur sensible, le flux observé est beaucoup moins important que le flux simulé. On a donc tendance à le surestimer. Ainsi, on observe des valeurs maximales de l'ordre de 300 W.m^{-2} alors qu'on simule des valeurs jusqu'à 600 W.m^{-2} ,
- Pour le flux de chaleur dans le sol à 5 cm de profondeur, on observe plutôt un phénomène inverse à celui du flux de chaleur sensible, c'est-à-dire qu'on sous-estime ce flux. On observe des valeurs jusqu'à 150 W.m^{-2} et on simule des valeurs maximales de l'ordre de 100 W.m^{-2} .
- Pour le flux de chaleur latente, on a une concentration de points autour de 0 W.m^{-2} puis une dispersion aléatoire du nuage. On remarque tout de même que les valeurs simulées peuvent atteindre près de 700 W.m^{-2} alors qu'on observe des valeurs maximales de 400 W.m^{-2} .

Tableau 2 : Comparaison des efficacités calculées sur la prairie sèche et sur la prairie humide

	Rayonnement net R_n	Flux de chaleur sensible H	Flux de chaleur latente LE	Flux de chaleur dans le sol à 5cm G_{5cm}
Efficacité 1^{ère} Simulation Prairie humide	0.99	-0.34	0.63	- 1.09
Efficacité Simulation Prairie humide	0.99	0.76	0.87	0.76
Efficacité Modèle avec cailloux	0.99	0.48	0.72	- 0.65
Efficacité Simulation Prairie sèche	0.87	-1.24	0	- 1.38

Le Tableau 2 présente les efficacités calculées pour la simulation sur la prairie sèche, pour la première simulation et la simulation de référence sur la prairie humide avec le modèle initial et pour la simulation avec le modèle prenant en compte les éléments grossiers.

Sur les Figures 13 et 14, nous avons représenté, en pointillés, les composantes évapotranspiration et drainage sous la zone racinaire simulées sur la prairie sèche. Sur ces mêmes figures, la comparaison avec les données sur la prairie humide permet de montrer le contraste existant entre ces deux sites. Tout d'abord, au niveau de l'apport d'eau, l'irrigation représente un surplus de 2250 mm d'eau par rapport à la prairie sèche. La partition des composantes évapotranspiration et drainage est totalement différente. Sur la prairie humide, le drainage est très important (1775 mm) alors que sur la prairie sèche, ce dernier est très faible (33 mm). A l'inverse, la part d'évapotranspiration sur la quantité d'eau disponible est plus faible sur la prairie humide (1115 mm sur un apport de 2890 mm) que sur la prairie sèche (712 mm sur un apport de 638 mm). Sur la prairie sèche, le sol perd donc plus d'eau qu'il n'en reçoit puisque les précipitations représentent 638 mm d'eau. L'évaporation du sol nu

constitue la part principale de l'évapotranspiration simulée (667 mm sur les 712 mm d'évapotranspiration) alors que les parts de transpiration de la végétation et d'interception sont similaires (aux alentours de 25 mm chacune). La végétation a donc un rôle peu important sur la simulation sur la prairie sèche.

3.6. Comparaison avec STICS

L'un des objectifs du stage était la comparaison des simulations réalisées avec le modèle SiSPAT avec un autre modèle de culture, STICS. Au cours du stage, nous avons obtenu les résultats d'une simulation STICS correspondant à notre zone d'étude (parcelle 1J) et à notre période d'étude (année 2010) et pour laquelle les informations d'entrées climatiques et de gestion de la culture étaient similaires (date de fauchage, irrigations). Ainsi, les résultats du modèle STICS pouvaient être comparés à nos simulations avec le modèle SiSPAT prenant en compte les éléments grossiers. Parmi les sorties du logiciel STICS se trouvait l'indice foliaire de la culture. Nous avons donc utilisé ces données en entrée du modèle et ainsi se rapprocher des mêmes conditions.

Parmi les nombreuses sorties de STICS, nous avons conservé celles qui pouvaient être comparées aux sorties de SiSPAT : le drainage, l'évapotranspiration totale, l'évaporation au niveau des feuilles, l'évaporation au niveau du sol ainsi que les teneurs en eau et températures du sol à 2 profondeurs différentes (35 et 66 cm). Une troisième donnée à 116 cm de profondeur était disponible mais nous ne simulions qu'un sol d'1 m.

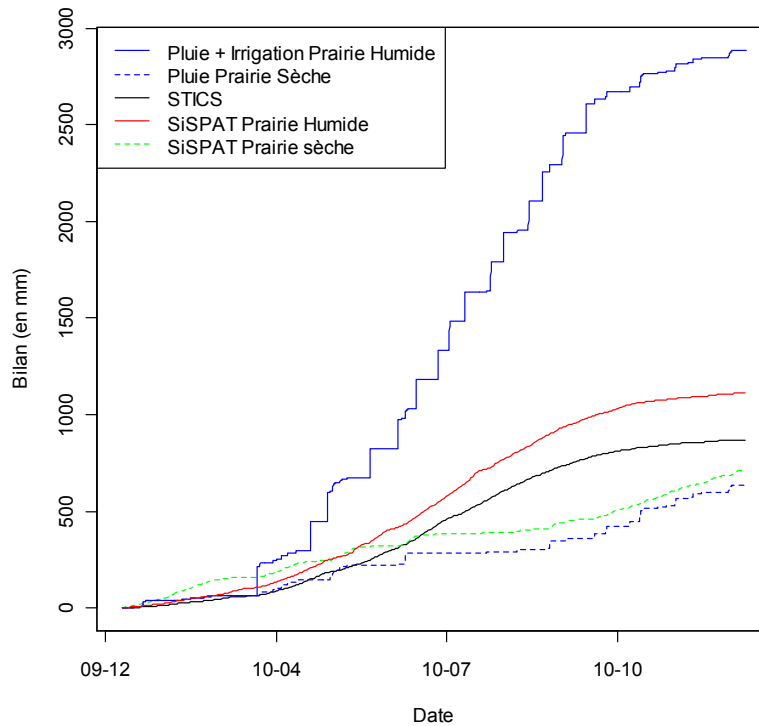


Figure 13 : Représentation de l'évapotranspiration simulée avec les modèles STICS (noir) et SiSPAT (rouge)

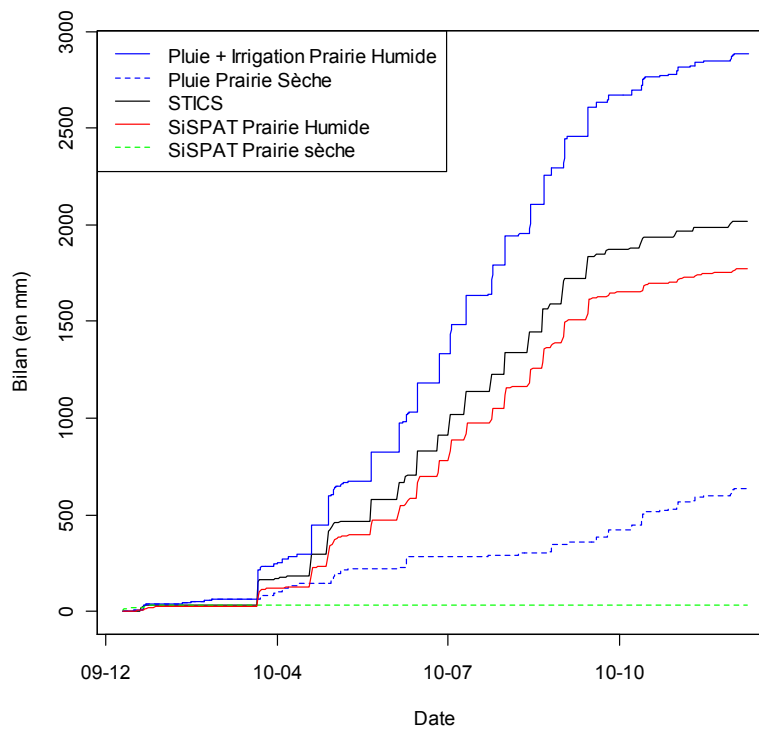


Figure 14 : Représentation du drainage simulé avec les modèles STICS (noir) et SiSPAT (rouge)

Les traits pleins des Figures 13 et 14 représentent l'évolution temporelle de l'évapotranspiration et du drainage sous la zone racinaire calculés avec les deux modèles.

On a également représenté l'apport d'eau (courbe bleu) sur la prairie humide au cours de l'année 2010. Les principales constatations que nous pouvons faire sur ces comparaisons sont :

- le drainage plus important avec STICS (2020 mm) qu'avec SiSPAT (1775 mm).
- l'évapotranspiration calculée est plus importante avec le modèle SiSPAT (1115 mm) qu'avec le modèle STICS (870 mm)

On observe donc une différence de 245mm d'eau entre les deux estimations de ces composantes du bilan hydrique. On a pu remarquer que STICS ne prend pas en compte l'évaporation directe de l'eau interceptée par les feuilles. SiSPAT la prend en compte avec une trentaine de millimètres évaporée sur l'année 2010. Les différences majeures entre les deux modèles en termes de drainage et d'évapotranspiration pourraient s'expliquer par les valeurs de conductivité hydraulique à saturation utilisées pour le modèle SiSPAT qui, bien que suffisamment élevées pour éviter toute saturation du sol en eau, sont encore trop basses pour calculer un drainage aussi important que celui calculé par STICS. Cependant, nous avons remarqué que l'augmentation de la conductivité hydraulique à saturation n'avait plus tellement d'effets au-delà d'une valeur de 20 fois celles calculées avec la fonction de pédo-transfert de Rawls et Brakensiek. Une autre explication pourrait être la densité racinaire trop élevée et qui aurait tendance à prélever trop d'eau et donc limiter le drainage sous la zone racinaire et à rejeter plus d'eau dans l'atmosphère. Une manière de s'en assurer serait de récupérer les profils racinaires calculés par STICS et de les utiliser dans le modèle SiSPAT, de la même manière que ce que nous avons fait pour l'indice foliaire. Mais nous n'avons pas pu obtenir cette sortie sur la durée du stage.

Nous pouvons également comparer les teneurs en eau simulées à différentes profondeurs.

La Figure 15 représente la comparaison des teneurs en eau calculées avec les modèles STICS (courbe noire) et SiSPAT (courbe rouge) sur les 35 premiers centimètres de sol.

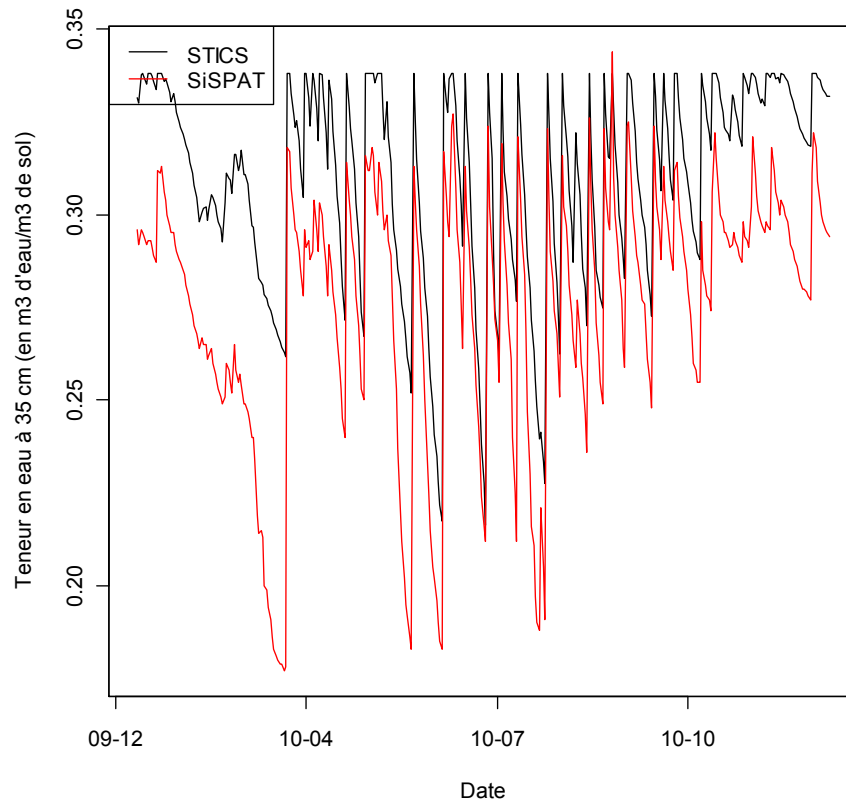


Figure 15 : Evolution des teneurs en eau simulées à 35cm avec STICS (noir) et SiSPAT (rouge)

Plus la profondeur augmente, plus la teneur en eau est grande avec le modèle STICS. A 116 cm de profondeur, on observe même une saturation du sol en eau permanente jusqu'au mois de mai. On remarque également que l'amplitude des pics est de plus en plus faible avec la profondeur (de 0.12 à 0.02 entre 35 cm et 116 cm de profondeur). Les évolutions de la teneur en eau calculée avec SiSPAT montrent une amplitude plus importante de 0.16 qui se maintient avec la profondeur. Cependant les deux modèles suivent la même dynamique. Ainsi, le fait d'avoir la même gestion de culture sur les deux modèles permet de fournir une représentation de la teneur en eau semblable, plus ou moins marqué selon le modèle d'étude.

4. Discussion et conclusions

Ainsi, le stage a répondu aux objectifs fixés. Il a tout d'abord permis d'analyser les données prélevées sur les différents sites d'étude. Bien qu'un premier filtrage ait été réalisé sur ces données, il était nécessaire d'apporter un deuxième regard plus critique et plus approfondi afin de pouvoir s'appuyer sur un jeu de données fiable. Les filtrages mis en place pourront être utilisés à nouveau pour une étude sur ce type de données. Le manque de données sur la

prairie sèche n'a pas permis de rentrer en profondeur dans l'étude de ce site. Compléter l'instrumentation d'un tel site par des mesures dans le sol (température, teneur en eau) permettrait de pouvoir caractériser plus précisément la dynamique de l'eau dans le sol mais les couches de sol, chargées en cailloux, sont un frein à cette mise en place d'outils de mesure. Une caractérisation de la végétation, via l'indice foliaire, serait aussi nécessaire pour limiter les incertitudes dans la simulation. Nous avons toutefois comparé les flux de surface sur la prairie humide et sur la prairie sèche et avons ainsi constaté que la partition des flux sur ces deux sites d'étude contrastés est totalement différente.

Ensuite, le modèle SiSPAT a pu être appliqué à notre site d'étude. Commencant par des simulations vraiment médiocres à partir de paramètres issus de la littérature, les simulations finales se sont avérées bien plus proches des observations pour ce qui est de la prairie humide. En effet, à l'aide d'analyses de sensibilité successives sur différents paramètres responsables de la dynamique globale du système, il a été possible de mieux estimer ces derniers afin d'améliorer la simulation du bilan hydrique sur la parcelle d'étude. Le développement du modèle pour la prise en compte des éléments grossiers a commencé à répondre à la question de l'effet de ceux-ci dans le sol. Les premières simulations avec ce modèle développé nous permettent de conclure que les flux de surface sont relativement bien représentés. Seul le flux de chaleur dans le sol, G , a été grandement dégradé. C'est ce flux qu'il va désormais falloir corriger en jouant sur différents paramètres pouvant potentiellement améliorer la simulation. Nous avons testé la conductivité thermique par exemple qui a légèrement amélioré la qualité de la simulation sur le flux de chaleur dans le sol.

Il faudra peut-être également revoir les équations utilisées pour prendre en compte les éléments grossiers ou mener des études plus précises sur les sols de la Crau pour connaître la nature de ces éléments grossiers, leur quantité mais aussi quelques propriétés du sol (taux d'infiltration, porosité...).

En effet, les résultats ne sont pas encore comparables à la version initiale qui, certes, ne tient pas compte de la présence de ces éléments grossiers dans le sol mais qui reproduit au mieux les observations que ce soit sur les flux de surface ou sur les teneurs en eau et températures du sol.

Une première simulation sur la prairie sèche a également été réalisée. En l'absence de données sur la végétation (indice foliaire, hauteur de canopée), nous avons estimé l'évolution de la végétation sur l'année 2010. L'absence de données sur les sols ne nous a pas permis de comparer le modèle aux observations sur ces variables. La comparaison sur les flux, assez médiocre, montre que des progrès sont encore à faire dans la paramétrisation du modèle pour aboutir à un résultat aussi satisfaisant que sur la prairie humide.

Les premiers résultats que nous pouvons tirer de cette simulation sont :

- sans apport d'eau hormis la pluie, la végétation sur la prairie sèche est constamment en état de stress hydrique,
- mauvaise représentation des flux de surface qui peut s'expliquer par une évolution de la végétation prescrite peut-être totalement fausse,
- une température du sol qui suit l'évolution de la température atmosphérique.

Enfin, il a été possible de comparer les données simulées avec le modèle SiSPAT avec celle du modèle STICS. Ce dernier nous a fourni des informations intéressantes sur le LAI de la prairie humide. Nous avons ainsi pu corriger les données que nous avions sur cette variable. Nous avons pu comparer différentes sorties entre les 2 modèles, notamment le drainage sous la zone racinaire et l'évapotranspiration. Ces 2 composantes du bilan hydrique permettent de quantifier les quantités d'eau retournant à la nappe et les besoins en eau de la plante. Des différences importantes entre les deux modèles, de l'ordre de 250 mm sont obtenues entre les deux modèles. Il faudrait pouvoir approfondir la manière dont STICS réalise les simulations pour s'assurer de mener les comparaisons dans les conditions les plus proches possibles. Pouvoir utiliser les mêmes profils racinaires dans les deux modèles serait une première étape.

Conclusion

Après avoir traité les données prélevées sur les prairies sèche et humide et avoir comparé ces deux sites caractéristiques de la plaine de la Crau, le stage aura permis de mettre en place le modèle de transfert sol végétation atmosphère SiSPAT en place pour la prairie irriguée. En partant de paramètres d'entrée issus de la littérature et donc en désaccord probable avec les caractéristiques du site d'étude, le travail aura conduit à une amélioration du jeu de paramètres d'entrée du modèle SiSPAT pour obtenir des comparaisons entre simulations et observations intéressantes. Le développement du modèle pour la prise en compte des éléments grossiers aura permis d'avancer sur la prise en compte de cette hétérogénéité des sols, souvent peu considérée dans les modèles. Enfin, la comparaison entre les modèle SiSPAT et STICS nous a permis d'évaluer l'impact de la représentation simplifiée du sol sur les flux simulés. En comparant les composantes évapotranspiration et drainage sous la zone racinaire du bilan hydrique, on distingue une différence de 245 mm entre les deux modèles, sans pouvoir dire, pour le moment, quelle simulation est la plus réaliste.

Dans la suite de ce stage, plusieurs pistes pourraient être développées comme l'approfondissement des jeux de paramètres testés pour approcher encore plus de la réalité. La mise en place d'une calibration multi-objectifs, développée à l'UPMC (Paris 6), permettrait d'améliorer la simulation par la recherche d'un optimum global à l'aide d'algorithmes stochastiques itératifs. Ces algorithmes multi-objectifs, qui fournissent un ensemble de jeux de paramètres admissibles, peuvent aussi nous aider à quantifier les incertitudes sur les composantes du bilan hydrique. Cependant, pour pouvoir envisager ce genre de calibration, il faut avoir un jeu de paramètres qui approche cet optimum. De plus, le temps de calcul de cette méthode est très long car des dizaines de milliers de simulations devraient être exécutées, sachant qu'une simulation dure de l'ordre de 20 minutes. Il est donc nécessaire de partir d'une solution proche de l'optimum pour parvenir au plus vite à des solutions optimales.

On pourrait également envisager de comparer les résultats du modèle SiSPAT avec d'autres modèles agronomiques ou encore tester le modèle avec d'autres cultures.

Bibliographie

Albergel, C., 2004. Quantification des flux d'eau en irrigation gravitaire en zone de Crau : caibration d'un modèle mathématique de gestion de l'irrigation – Mémoire d'Ingénieur de l'ESA Purpan, 44pp.

Andrieux, P., 1981. Etude des sols du domaine du Merle – Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.

Braud, I., Dantas-Antonino, 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, 213-250.

Braud, I., 2000. SiSPAT users's manual, version 3.0., 106 pp.

Braud, I., 2002. SiSPAT User's Manual Update, version 4.0, 13 pp.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y. M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J. P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., and Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18, 309-332.

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Delecolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn, *Agronomie*, 18, 311–346.

Brooks, R.H., Corey, C.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper*, 3, Colorado State University, Fort Collins.

Cerdà, A., 2001. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, 52, 59-68.

Chabas, M., 2003. Quantification des flux d'eau en irrigation gravitaire en Crau – Bilans hydriques sur quatre parcelles expérimentales. Mémoire de fin d'étude DESS Hydrologie et environnement, Université Montpellier II.

Courault, D., Hadria, R., Ruget, F., Oliosio, A., Duchemin, B., Hagolle, O., Dedieu, G., 2010. Combined use of FORMOSAT-2 images with a crop model for biomass and water monitoring of permanent grassland in Mediterranean region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 1731–1744.

Federer, C.A., 1979. A soil-plant-atmosphere model for transpiration and availability of soil water. *Water Resources Research*, 555-562.

Fiès, J.C., De Louvigny, N., Chanzy, A., 2002. The role of stones in soil water retention. *European Journal of Soil Science* 53, 95–104.

Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.L, Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Segui, P., Rousset-Regimbeau, F., Viennot, P. 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *Journal of Geophysical Research*, 113: D06113.

Leblois E. et al. (2003) GICC-Rhône – Rapport final. Ministère de l'Écologie et du Développement Durable.

Mandal, U.K., Rao, K.V., Mishra, P.K., Vittal, K.P.R., Sharma, K.L., Narsimlu, B., Venkanna, K., 2005. Soil infiltration, runoff and sediment yield from a shallow soil with varied stone cover and intensity of rain. *European Journal of Soil Science*, 56, 435-443.

Martial, L., 1994. Etude préalable à la conception d'un nouveau réseau d'irrigation gravitaire au Domaine du Merle- Mémoire de D.A.A. option génie agronomique.

Martin E., Ducrocq V., Joly A., Joly B., Nuissier O., Quintana Seguí P., Ricard D., Sevault F., Somot S., Drobinsky P., 2007 : La Méditerranée, région témoin : de CYPRIM à HYMEX, La Houille Blanche, N°6/2007, 90-96.

Mérot, A., 2007. Analyse et modélisation du fonctionnement biophysique et décisionnel d'un système prairial irrigué : application aux prairies plurispécifiques de Crau en vue de l'élaboration d'un outil d'aide à la décision, Thèse Montpellier SupAgro, 200pp.

Milly, P.C.D., 1982. Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: a matric head-based formulation and a numerical model. *Water Resources Research*, 18, 498.

Noihlan, J., Planton, S., 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117, 536–549.

Novák, V., Knava, K., Simunek, J., 2011. Determining the influence of stones on hydraulic conductivity of saturated soils using numerical method. *Geoderma*, 161, 177-181.

Oliosio, A., Inoue, Y., Ortega-Farias, S., Demarty, J., Wigneron, J.-P., Braud, I., Jacob, F., Lecharpentier, P., Otlé, C., Calvet, J.-C., Brisson, N., 2005. Future directions for advanced evapotranspiration modeling: Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 377-412.

Pimienta, N., 2009. Etude préliminaire à l'évaluation de la part de la recharge d'une nappe phréatique par irrigation gravitaire- Mémoire de l'ENSAIA mention Agronomie et spécialité « Sciences des Technologies de l'Environnement », 54pp.

Poesen, J., Ingelmosanchez, F., Mucher, H., 1990. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer, 15, 653-671.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling, in: Jones, E.B. and Ward, T.J. (Eds.), *Watershed management in the eighties: proceedings of the American Society of Civil Engineers symposium*, New York, 293–299.

Saos, J.L., 2006. Quantification des flux d'eau en irrigation gravitaire en Crau. Rapport final, IRD-US DIVHA.

Shuttleworth, W.J., Wallace, J.S., 1985. Evaporation from sparse crops - an energy combinations theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111, 839-855.

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 climate and applied meteorology*, 25, 284-307.

Urbanek, E., Shakesby, R.A., 2009. Impact of stone content on water movement in water-repellent sand. *European Journal of Soil Science*, 60, 412-419.

Van de Griend, A.A., Camillo, P.J., Gurney, R.J., 1985. Discrimination of soil physical parameters, thermal inertia, and soil moisture from diurnal surface temperature fluctuations. *Water Resources Research*, 21, 997-1009.

Van Genuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892-898.

Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., Srinivasan, R., 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 324, 10-23.

Verhoef, A., 2004. Remote estimation of thermal inertia and soil heat flux for bare soil, *Agricultural and Forest Meteorology* 123, 221–236.

Yang, K., Koike, T., Ye, B.S., Bastidas, L., 2005. Inverse analysis of the role of soil vertical heterogeneity in controlling surface soil state and energy partition. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 110(D8).

Table des illustrations

Figure 1 : Schéma du modèle SiSPAT (d’après Braud (2010)).....	8
Figure 2 : Schéma utilitaire de STICS (d’après Pimienta (2009)).....	12
Figure 3 : Situation géographique de la plaine de la Crau (Saos, 2003).....	14
Figure 4 : Prairie humide (gauche) et prairie sèche (droite) (Photos F.Tilmant).....	1
Figure 5 : Schéma représentatif de l'irrigation gravitaire (schéma personnel).....	16
Figure 6 : Représentation de la teneur en eau et des précipitations à partir du 31/08/10.....	19
Figure 7 : Evolution temporelle des flux journaliers sur la prairie humide (à gauche) et sur la prairie sèche (à droite).....	1
Figure 8 : Evolution de la température du sol à 5, 15 et 45 cm de profondeur (pas d'acquisition = 0.5 h) au Sud de la prairie humide	29
Figure 9 : Evolution de la teneur en eau dans le sol à 15, 30, 45 et 60 cm de profondeur (pas d'acquisition = 0.5 h) au Sud de la prairie humide	30
Figure 10 : Représentation des teneurs en eau modélisée (courbe rouge) et observées (courbes bleue (Sud) et noire (Nord))	31
Figure 11 : Représentation du potentiel foliaire simulé (gris).	32
Figure 12 : Analyse de sensibilité sur la conductivité hydraulique des 3 premiers horizons (en haut), la conductivité hydraulique du dernier horizon (au milieu) et la densité racinaire maximale (en bas)	1
Figure 13 : Représentation de l'évapotranspiration simulée avec les modèles STICS (noir) et SiSPAT (rouge).....	42
Figure 14 : Représentation du drainage simulé avec les modèles STICS (noir) et SiSPAT (rouge).....	42
Figure 15 : Evolution des teneurs en eau simulées à 35cm avec STICS (noir) et SiSPAT (rouge).....	44
 Tableau 1 : Dates utilisées pour la gestion de la prairie humide.....	 19

Tableau 2 : Comparaison des efficacités calculées sur la prairie sèche et sur la prairie humide
..... 40

Annexes

Annexe 1 : Table des coefficients de la fonction de pédo-transfert de Rawls et Brakensiek (1985)

Annexe 2 : Mise en place d'une série d'indices foliaires pour l'année 2010

Annexe 3 : Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées sur les flux de surface

Annexe 1 : Table des coefficients de la fonction de pédo-transfert de Rawls et Brakensiek (1985)

Function type $f=c1 + c2.[argile] + c3.[sable] + c4.f + c5.[argile]^2 + c6.[argile].\Phi + c7.[sable]^2 + c8.[sable].\Phi + c9.\Phi^2 + c10.[argile].\Phi^2 + c11.[argile]^2.[sable] + c12[argile]^2.\Phi + c13.[argile].[sable]^2 + c14.[argile]^2.\Phi^2 + c15.[sable]^2.\Phi + c16.[sable]^2.\Phi^2$ avec [argile]=taux d'argile(%), [sable]=taux de sable(%) et Φ =porosité(m ³ /m ³)				
Coefficients	exp(f)	exp (f)	(f)	exp (f)
	Hbc	λ	θ_r	Ks
c1	5.3396738	-0.7842831	-0.01824820	-8.968470
c2	0.1845038	0	0.00513488	-0.028212
c3	0	0.0177544	0.00087269	0
c4	-2.48394546	-1.0624980	0.02939286	19.53480
c5	0.00213853	-0.00273493	-0.00015395	-0.0094125
c6	-0.61745089	0	0	0
c7	0	-0.00005304	0	0.00018107
c8	-0.04356349	-0.03088295	-0.00108270	0.077718
c9	0	1.11134946	0	-8.395215
c10	0.50028060	-0.00674491	-0.00235940	0
c11	0.00000540	0	0	-0.0000035
c12	0.00895359	0.00798746	0.00030703	0.0273300
c13	-0.00001282	-0.00000235	0	0.0000173
c14	-0.00855375	-0.00610522	-0.00018233	-0.0194920
c15	-0.00072472	0	0	0.0014340
c16	0	0	0	0
c17	0.00143598	0.00026587	0	-0.00298

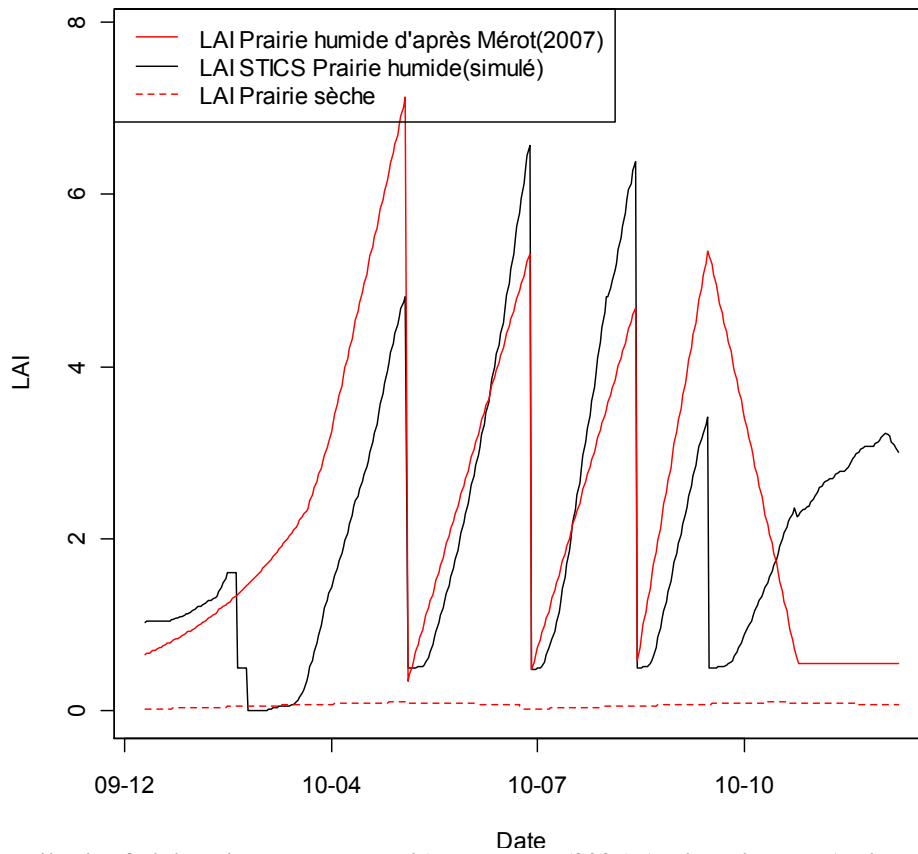
Table des coefficients de la fonction de pédo-transfert de Rawls et Brakensiek (1985)

Annexe 2 : Mise en place d'une série d'indices foliaires pour l'année 2010

Date	01/01/10	07/05/10 1 ^{er} fauchage	06/07/10 2 nd fauchage	23/08/10 3 ^{ème} fauchage	30/09/10 4 ^{ème} fauchage	13/11/10 Fin du fauchage
Valeur du LAI avant fauchage	0.64	7.1	5.3	4.7	5.3	0.55

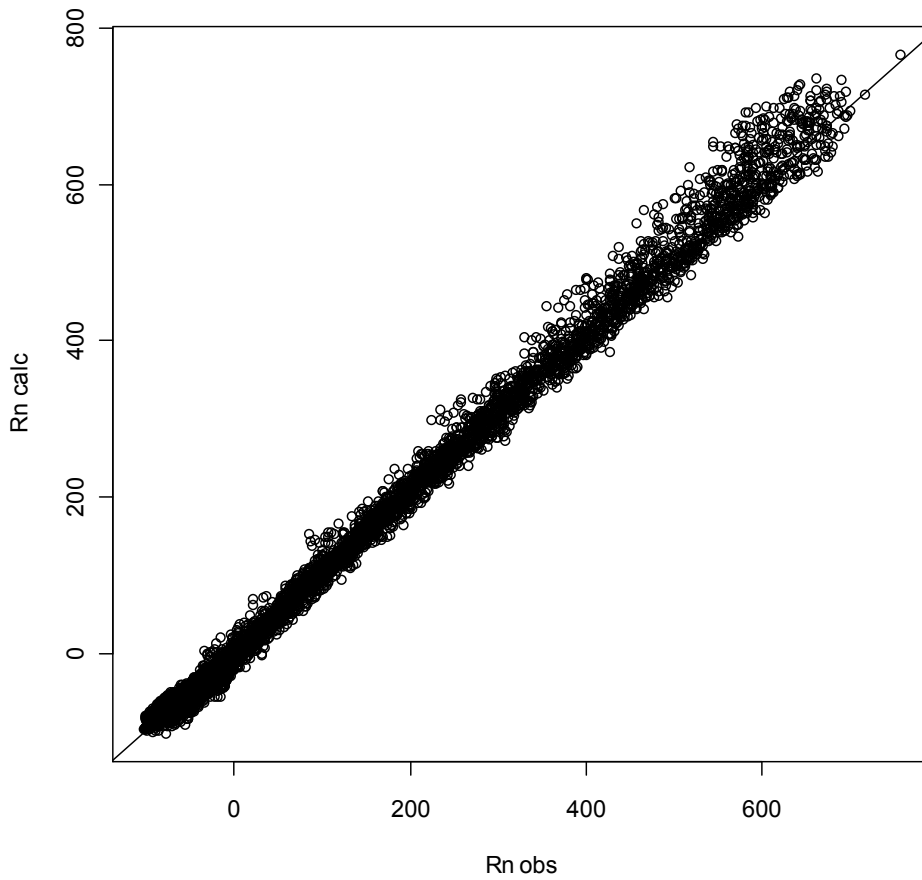
Les équations qui ont permis de tracer l'évolution du LAI sont :

- Du jour 0 au jour 80 : $LAI = 0.641 e^{0.0163t}$
- Du jour 81 au jour 89 : $LAI = 0.0766 t - 3.76$
- Du jour 90 au jour 127 : $LAI = 0.108 t - 6.59$
- Du jour 128 au jour 187 : $LAI = 0.084 t - 10.40$
- Du jour 188 au jour 238 : $LAI = 0.084 t - 15.31$
- Du jour 239 au jour 273 : $LAI = 0.14 t - 32.8$
- Du jour 274 au jour 316 : $LAI = 0.111 t + 35.87$
- Du jour 317 au jour 365 : $LAI = 0.55$

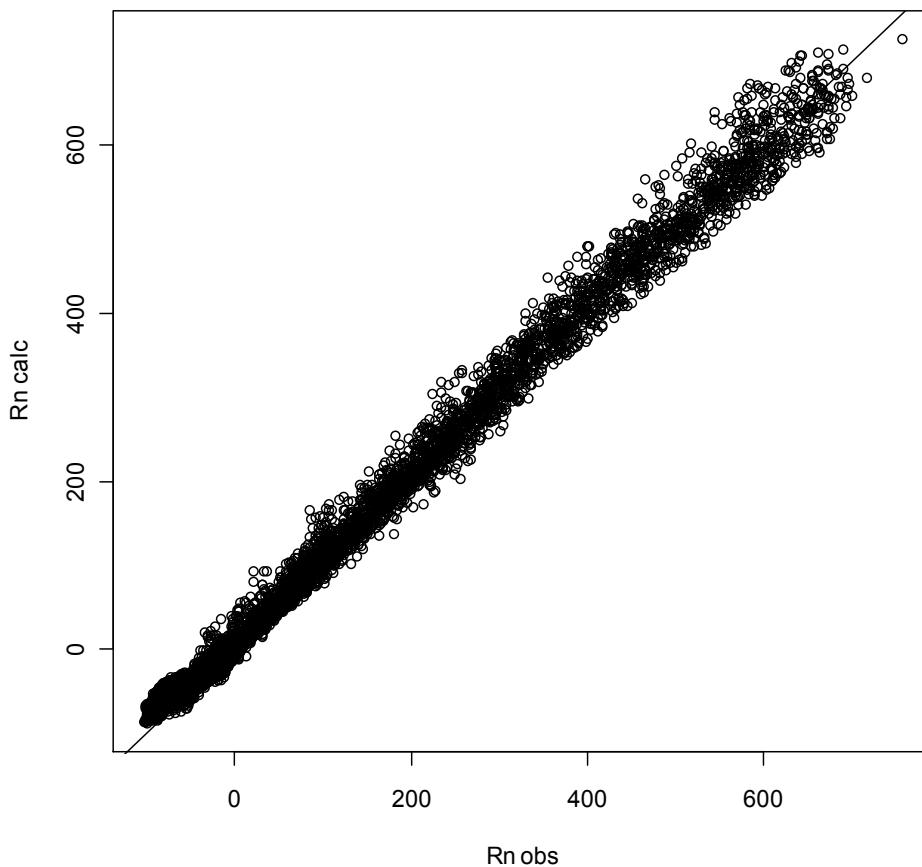


Evolution de l'indice foliaire d'après la thèse d'Anne Mérot (2007) (trait plein rouge), simulé par STICS (trait plein noir) sur la prairie humide et estimé personnellement sur la prairie sèche (trait pointillé rouge)

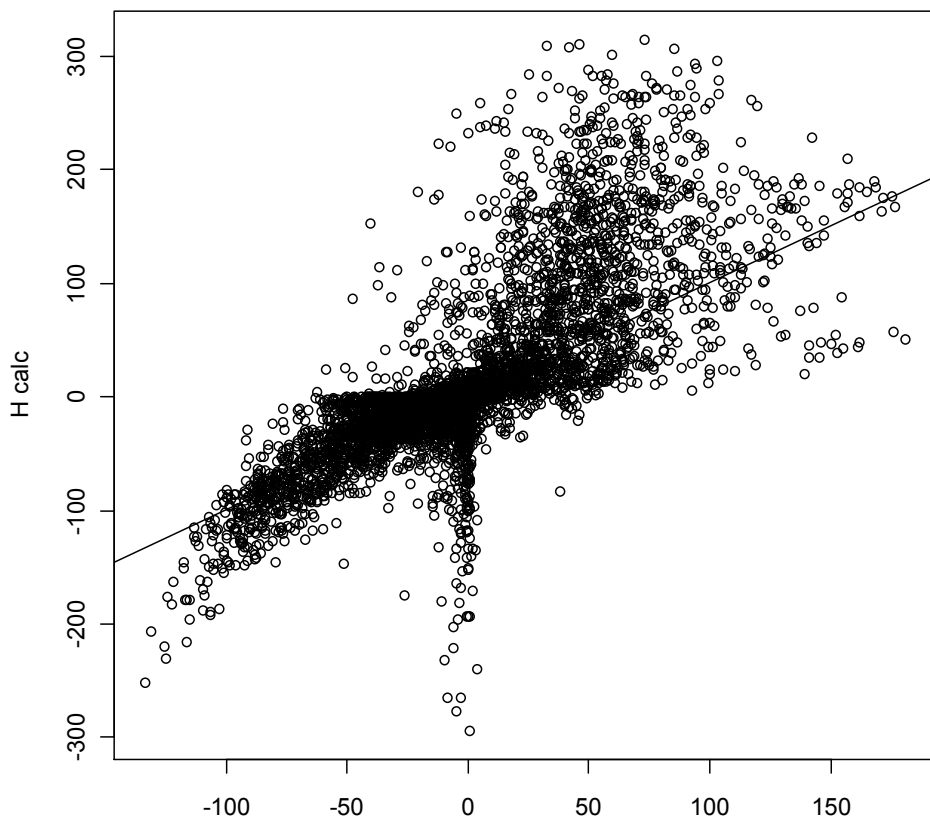
Annexe 3 : Comparaison des représentations des valeurs simulées en fonction des valeurs observées sur les flux de surface



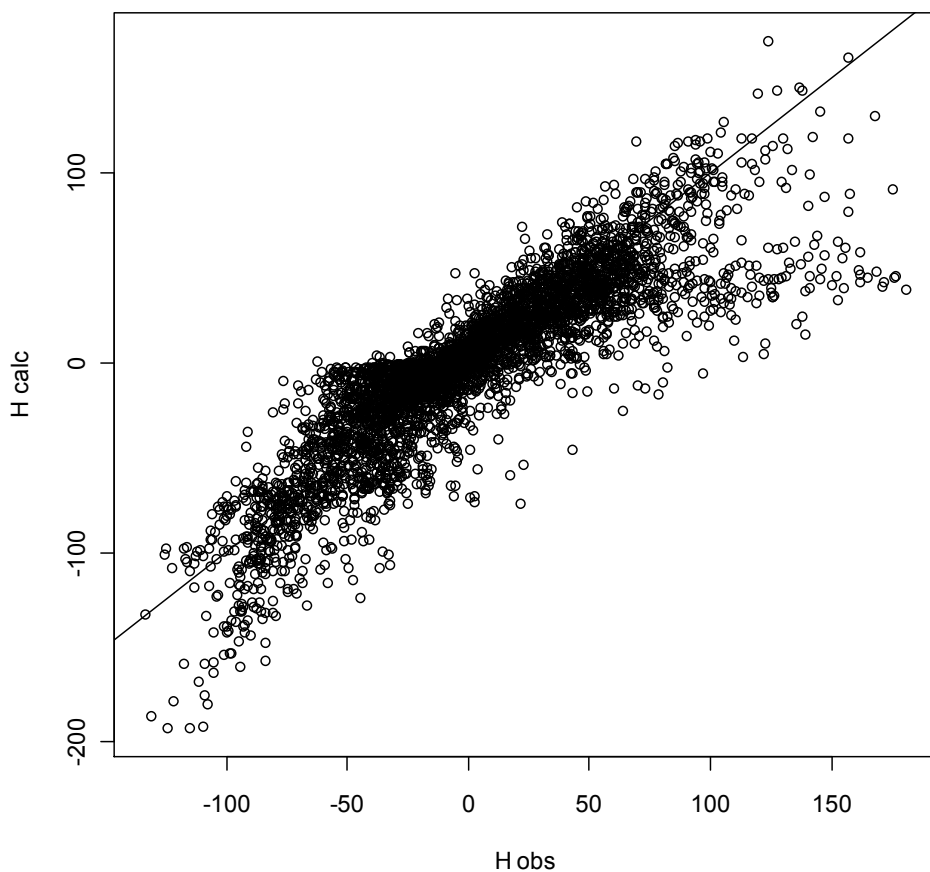
Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées sur le rayonnement net pour la première simulation



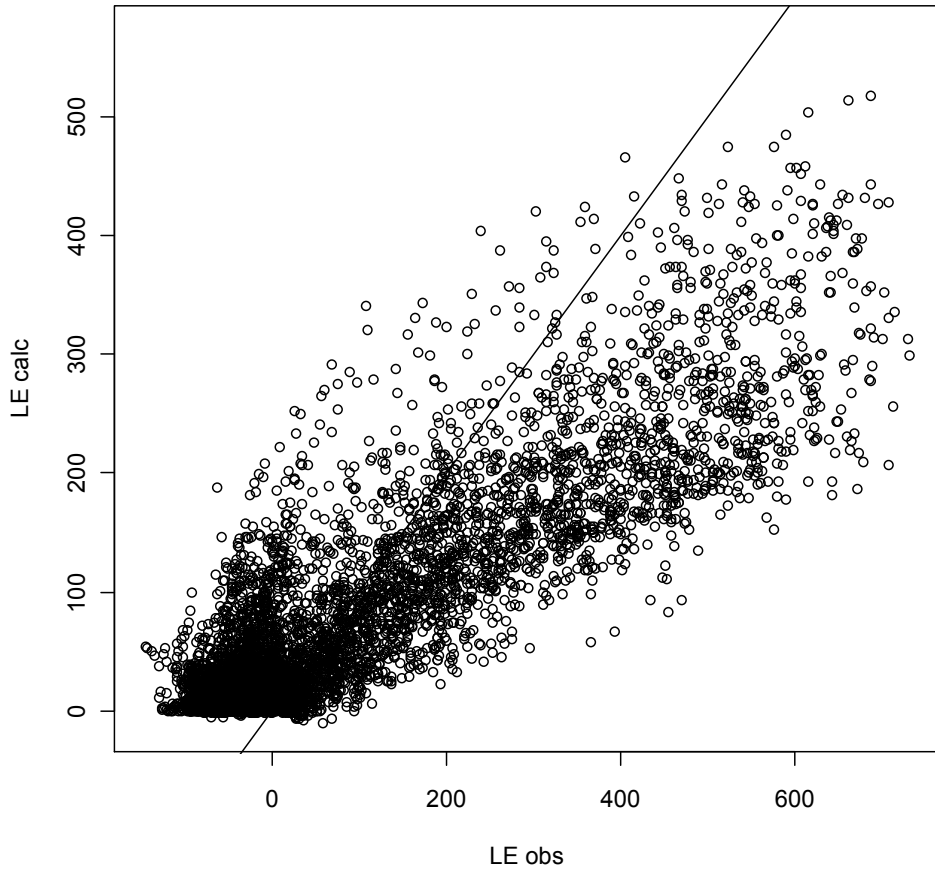
Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées sur le rayonnement net pour la simulation de référence



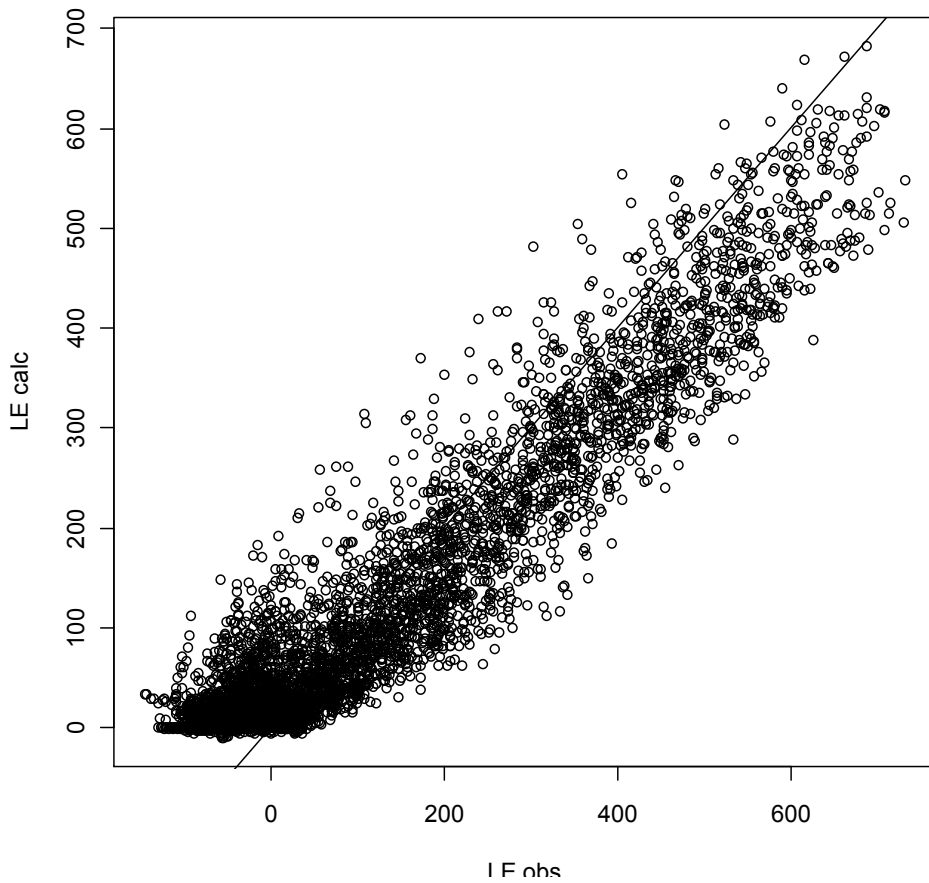
Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées sur le flux de chaleur sensible pour la première simulation



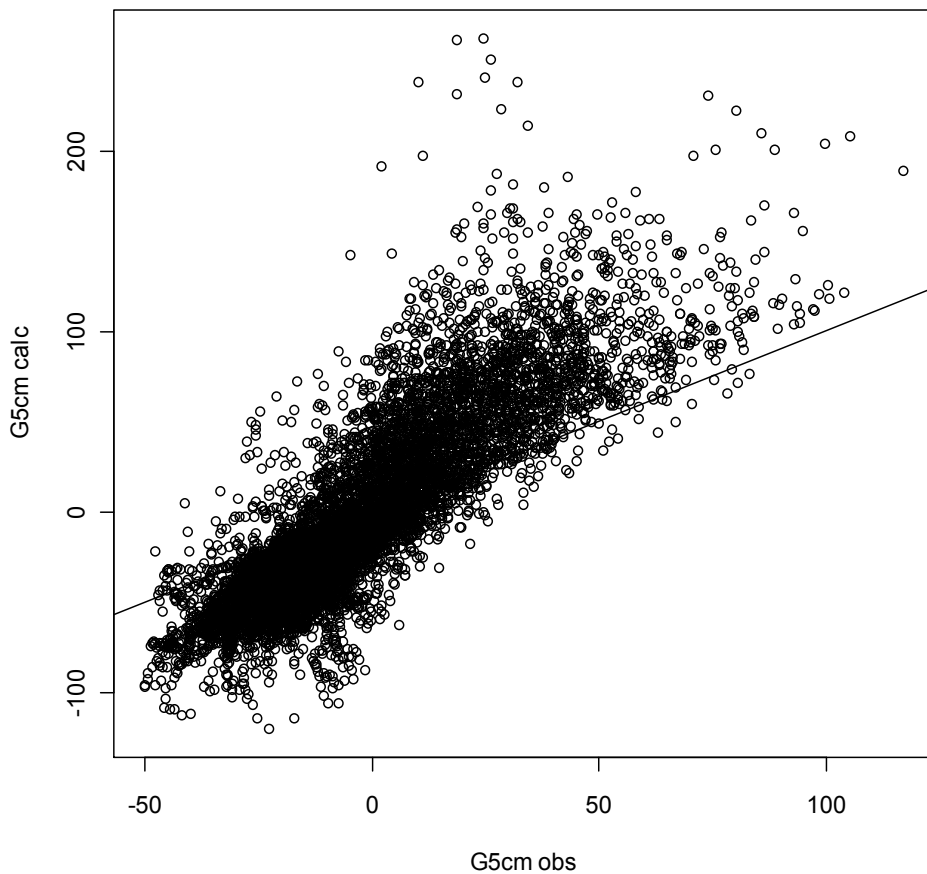
Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées sur le flux de chaleur sensible pour la simulation de référence



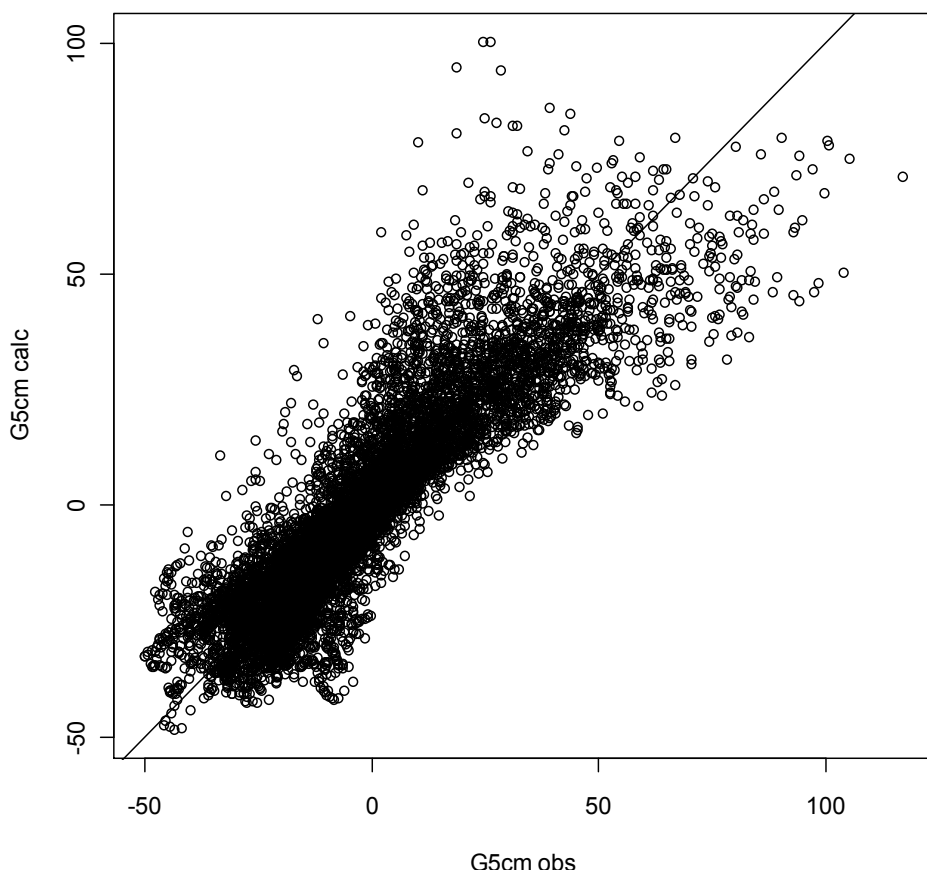
Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées sur le flux de chaleur latente pour la première simulation



Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées sur le flux de chaleur latente pour la simulation de référence



Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées sur le flux de chaleur dans le sol pour la première simulation



Représentation des valeurs simulées en fonction des valeurs observées sur le flux de chaleur dans le sol pour la simulation de référence