



Centre Eau Terre Environnement

Rapport technique: Présentation des travaux et résultats obtenus

Calibrage du simulateur de croissance STICS pour l'estimation de la biomasse et des rendements de maïs à l'échelle régionale par intégration d'imagerie Radar à ouverture de synthèse satellite

Projet SOAR-Éducation # 5490

Rapport INRS # R1929

Rapport présenté à l'Agence Spatiale Canadienne par :

Charles Gignac, Stagiaire postdoctoral

Karem Chokmani, Professeur

Yves Gauthier, Professionnel de recherche

Québec, Québec

Le jeudi 23 avril 2020

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2021
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-953-1 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2021
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2021

Table des matières

ACRONYMES ET UNITÉS DE MESURES UTILISÉES	1
ACRONYMES UTILISÉS DANS LE DOCUMENT	1
INTRODUCTION ET CONTEXTE	1
BUT ET OBJECTIFS POURSUIVIS	3
SITE D'ÉTUDE	5
ÉTAT DE L'ART	7
LIER L'INDICE DE SURFACE FOLIAIRE (LAI) AUX OBSERVATIONS RSO	7
LE MODÈLE DE CULTURE STICS	8
ASSIMILATION DES DONNÉES RSO DANS LES MODÈLES DE CULTURE	11
DONNÉES	13
DONNÉES CLIMATIQUES : DONNÉES DE LA STATION MÉTÉOROLOGIQUE DU CHAMP #14	13
LES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES DAYMET	13
DONNÉES SUR LES PRATIQUES CULTURALES ET SUR LES SOLS : AAAC	14
DONNÉES TERRAIN SUR LE LAI ET LA BIOMASSE AAAC	15
DONNÉES SATELLITAIRES D'HUMIDITÉ DU SOL DE SMOS	16
DONNÉES SATELLITAIRES ARCHIVÉES DE RADARSAT-2	17
DONNÉES SUR LES TYPOLOGIES DES SOLS AAAC	19
ANALYSES ET RÉSULTATS	21
OBJECTIF 1 : LIER LES OBSERVATIONS RSO AU LAI	21
OBJECTIF 2 : DÉVELOPPER, TESTER ET OPTIMISER UNE APPROCHE D'ASSIMILATION DES DONNÉES RSO DANS UNE CONFIGURATION RS2+STICS	23
OBJECTIF 3 : TESTER ET ÉVALUER LA FAISABILITÉ DES APPROCHES D'ASSIMILATION RSO ET DE FORCAGE LAI _{RSO} À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE	27

OBJECTIF 4 : TESTER ET ÉVALUER LA FAISABILITÉ DES APPROCHES D’ASSIMILATION RSO ET DE FORÇAGE LAI_{RSO} À L’ÉCHELLE RÉGIONALE	29
CONSTATS ET PERSPECTIVES	35
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	37
RÉFÉRENCES	39
COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS	43
ANNEXES ET SUPPLÉMENTS	45
ANNEXE A : FORÇAGE DU LAI OBTENU PAR INVERSION DU WCM DANS STICS	47
ANNEXE B : CODES MATLAB POUR LA PRÉPARATION DES FICHIERS DAYMET	51
RADIATION SOLAIRE (SRAD_EXPORT.M)	51
PRESSION DE VAPEUR (VP_EXPORT.M)	51
PRÉCIPITATIONS (PRCP_EXPORT.M)	52
TEMPÉRATURES MAXIMALES ET MINIMALES (TEMP_EXPORT.M)	53
ANNEXE C : EXEMPLE DE FICHIER DE DESCRIPTION DE SOL – OTTAWAF14REVISED	55
ANNEXE D : CODE XML DE CONVERSION SMOS VERS GEOTIFF AVEC SNAP	59
ANNEXE E : FORMULATION MATLAB DU MODÈLE WCM ET AJUSTEMENT	61
ANNEXE F : LISTE DES FICHIERS ET DOSSIERS ARCHIVÉS DU PROJET	65

Acronymes et unités de mesures utilisées

Acronymes utilisés dans le document

AAAC : Agriculture et Agro-Alimentaire Canada

ACIA : Agence Canadienne d'Inspection des Aliments

ASC : Agence Spatiale Canadienne

ESA : European Space Agency, en Français, Agence Spatiale Européenne

LAI : *Leaf Area Index*, en Français, Indice de Surface Foliaire

RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture

SMOS : *Soil Moisture and Ocean Salinity mission*

STICS : Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standards

TDR : *Time Domain Reflectometry*, en Français, Réflectométrie Temporelle

WCM : *Water Cloud Model*

Introduction et contexte

Le maïs (*Zea Mays*) est la troisième culture en importance au Canada pour lequel on rapporte plus de 32 000 fermes sur une superficie de 1,63 million d'hectares [Hamel and Dorff, 2014]. Les principaux acteurs du marché étaient et sont toujours l'Ontario et le Québec qui représentent respectivement 60 et 30% de la production nationale. Dans le contexte des changements climatiques qui affectent notre planète et l'occurrence accrue des événements extrêmes, le développement d'outils efficaces d'estimation et de prédiction des rendements agricoles est de plus en plus pertinent, que ce soit pour la gestion courante ou pour se préparer à faire face aux changements à venir.

Différents outils permettent de suivre l'évolution de l'état d'une culture. À l'échelle du champ, les modèles de culture, comme STICS [Brisson, Mary et al., 1998], permettent de simuler l'évolution d'un cultivar considérant une connaissance préalable des pratiques culturales, des informations sur la nature du sol et sur le climat durant la période à l'étude. Parmi les variables d'état d'une culture simulée par les modèles de croissance de cultures, notons le rendement (t/ha), la masse sèche des fruits (t/ha) et le LAI (m^2/m^2) qui constituent, d'une certaine manière, des proxys de la "performance générale" d'une culture.

Ces outils, quoique dans l'ensemble performants, ne peuvent, même lorsque les

paramètres initiaux sont parfaitement connus, garantir une estimation parfaite du rendement ou des autres variables d'état. Ces dérives par rapport au résultat final observé au champ en culture peuvent être entre autre liées aux résolutions spatiales ou

Cultivar: Un cultivar est une variété de plant choisi pour ses caractéristiques réputées uniques.

LAI: L'indice de surface foliaire, ou en anglais «*Leaf Area Index*», est une mesure qui exprime la surface foliaire d'un plant par rapport à une unité de surface au sol.

STICS: Modèle de culture modulaire dont l'acronyme signifie «*Simulateur Multidisciplinaire pour les cultures standard*».

temporelles variées des données utilisées comme intrants ou aux lacunes des certains mécanismes internes de la simulation.

Basé sur ce constat, l'usage de données auxiliaires telles les données de télédétection multispectrales ou RADAR, s'avère une stratégie pertinente pour guider les simulations et palier aux potentielles faiblesses listées précédemment [Maas,1988, Bouman,1995, Fischer, Kergoat et al.,1997, Bach,1998, Prévot, Chauki et al.,2003]. Les modèles de croissance permettent une estimation des rendements en intégrant des informations sur le climat, les sols et les pratiques culturales tandis que l'imagerie tirée de la télédétection permet de spatialiser l'information sur les rendements des cultures. L'usage des modèles de culture s'appuie sur leur capacité à intégrer des données de sources multiples et à simuler mécaniquement l'impact sur les cultures de la température et des facteurs abiotiques. En pratique, des difficultés récurrentes et majeures liées à la qualité des données surviennent en lien avec le fait que les variations spatio-temporelles affectant les estimations de rendement ne sont pas prises en compte aux échelles intra-parcellaire ou régionale.

C'est dans ce cadre que ce projet propose d'évaluer le potentiel des données RSO de RADARSAT-2 pour améliorer les estimations du rendement à l'échelle de la parcelle en culture et de transposer cette approche de la parcelle vers l'échelle régionale pour en tirer un rendement moyen régional.

But et objectifs poursuivis

À la lumière des constats tirés en introduction, le but de ce projet SOAR-E est de démontrer la pertinence de l'utilisation des données RADARSAT-2 afin d'améliorer la performance du modèle de culture STICS pour l'estimation de la biomasse et des rendements de champs de maïs en culture.

Afin d'atteindre ce but, les objectifs scientifiques suivants ont été établis :

1. Relier les rétrodiffusions en polarisation croisée de RADARSAT-2 moyennées sur des champs de maïs en culture à un paramètre d'état (le LAI) du modèle de culture STICS;
2. Développer, tester et optimiser une approche d'assimilation des données RSO dans une configuration RS2+STICS afin de guider l'évolution du modèle de culture selon les observations tirées de RS-2;
3. Tester et évaluer la faisabilité des approches d'assimilation RSO à l'échelle de la parcelle;
4. Tester et évaluer la faisabilité des approches d'assimilation RSO à l'échelle régionale sur la Montérégie.

Les objectifs de formation suivants ont été établis.

1. La formation de chercheurs scientifiques possédant une compréhension poussée des données radar et des méthodes de traitement;

Site d'étude

Les essais d'intégration et d'assimilation des données RSO au simulateur de croissance STICS ont été réalisés sur des données obtenues par Agriculture et Agro-Alimentaire Canada (AAAC) sur le site de la ferme expérimentale de l'Agence Canadienne d'Inspection des Aliments (ACIA) située à Fallowfield, au sud-ouest de la ville d'Ottawa (Figure 1). La ferme se trouve dans l'écozone des plaines mixtes de l'est de l'Ontario.

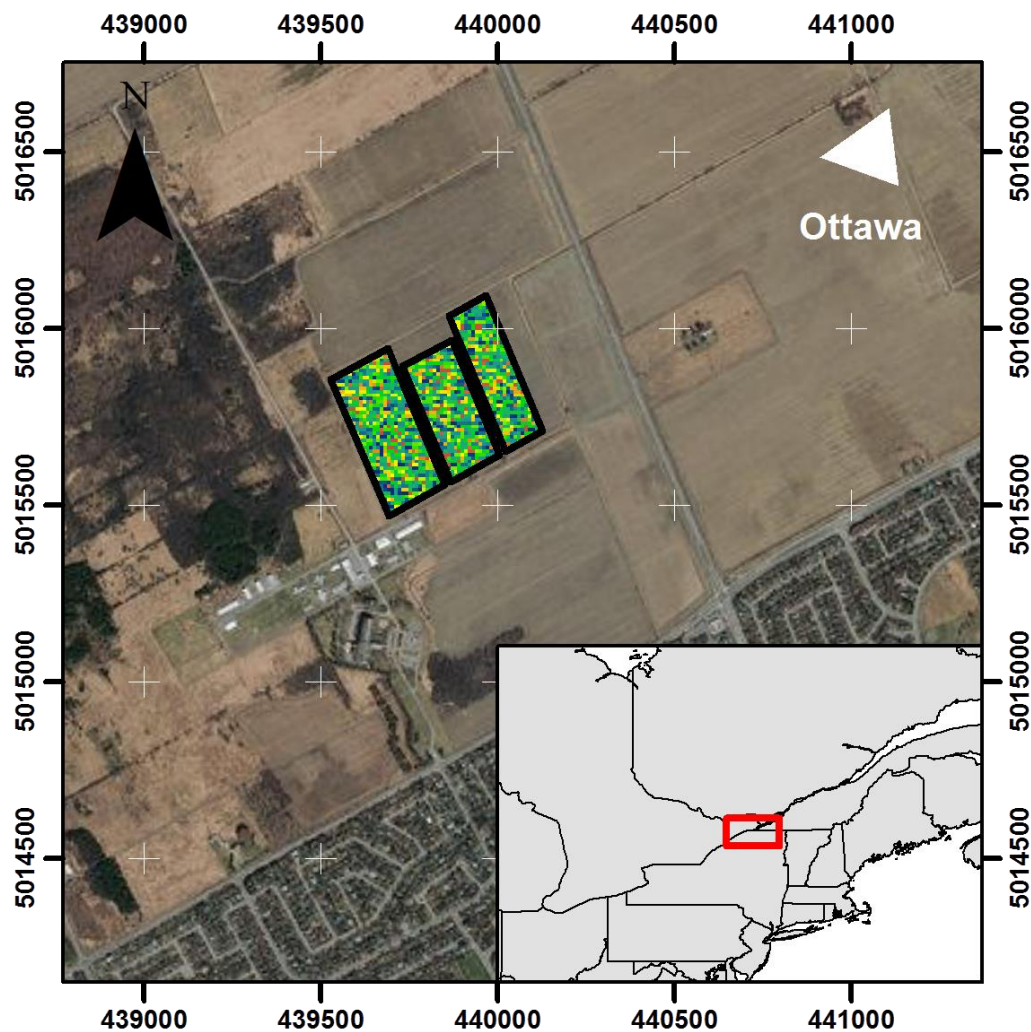


Figure 1 : Champ #14 de l'agence Canadienne d'Inspection des Aliments à Fallowfield, en banlieue sud de la ville d'Ottawa, Ontario, Canada. Le champ #14 était divisé en trois sous-sections en 2013 (tel que sur la figure) et en un seul champ, combinant les trois sous-sections, en 2017. Données et produits de RADARSAT-2 © MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. (2013) – Tous droits réservés. RADARSAT est une marque de commerce officielle de l'Agence Spatiale Canadienne.

État de l'art

Lier l'indice de surface foliaire (LAI) aux observations RSO

Les données RSO ont été utilisées dans le cadre de plusieurs études pour estimer la variable LAI [Jiao, McNairn et al.,2009, Jiao, McNairn et al.,2011, Liu, Shang et al.,2013, Wiseman, McNairn et al.,2014, Hosseini, McNairn et al.,2015]. Le WCM est un modèle de transfert radiatif développé pour simuler la rétrodiffusion radar (en unités de puissance) en tant que somme incohérente de la rétrodiffusion de la végétation ($\sigma^0_{VEGETATION}$) et du sol (σ^0_{SOL}), en tenant compte de l'atténuation du signal causée par la canopée τ^2 [Attema and Ulaby,1978].

$\sigma^0 = \sigma^0_{VEGETATION} + \sigma^0_{SOL}$	(1)
$\sigma^0_{VEGETATION} = AV_1 \cos(\theta) \times \left(1 - \exp\left(\frac{-2BV_2}{\cos(\theta)}\right)\right)$	(2)
$\tau^2 = \exp\left(\frac{-2BV_2}{\cos(\theta)}\right)$	(3)

Dans les équations précédentes (Éq. 1,2 et 3), A et B sont les paramètres du modèle, θ est l'angle d'incidence du SAR et V_1 et V_2 sont des descripteurs de la canopée. Dans cette étude, les descripteurs du couvert végétal V_1 et V_2 sont liés à l'indice de surface foliaire (LAI) par les équations suivantes, où L est le LAI et E_1 et E_2 sont les paramètres.

$V_1 = L_1^E$	(4)
$V_2 = L_2^E$	(5)

La dernière partie du modèle, la rétrodiffusion du sol σ_{SOL}^0 , peut être exprimée par l'équation suivante [Ulaby, Allen et al.,1984] où C est la sensibilité du RSO à l'humidité du sol, D le coefficient de rétrodiffusion du sol sec et Mv est l'humidité du sol.

$\sigma_{SOL}^0 = CM_V + D$	(6)
-----------------------------	------------

Le modèle WCM complet est obtenu en fusionnant toutes les parties en une seule équation, comme suit:

$\sigma^0 = AV_1 \cos(\theta) \times \left(1 - \exp\left(\frac{-2BV_2}{\cos(\theta)}\right)\right) + (CM_V + D) \times \exp\left(\frac{-2BV_2}{\cos(\theta)}\right)$	(7)
--	------------

Le modèle de culture STICS

Le modèle de culture STICS offre un cadre général de simulation des bilans d'eau et d'azote à l'échelle de la parcelle en fonction de paramètres agronomiques relevant des sols (la partie de sol colonisée par les racines), du climat et des pratiques culturales tout en estimant les variables associées au rendement (biomasse sèche, date de floraison et de maturité, biomasse de fruits, rendement sec) [Brisson, Mary et al.,1998, Brisson, Gary et al.,2003].

À l'interne, le modèle STICS est structuré autour d'un schéma dynamique à un pas de temps journalier dans lequel la croissance des plants repose sur le fonctionnement carboné des plantes (Figure 2). La simulation est opérée via plusieurs modules, représentant chacun un processus écophysologique soit le développement phénologique, la croissance foliaire, l'interception du rayonnement et photosynthèse, l'élaboration du rendement et de la qualité, la croissance racinaire, le bilan hydrique, la transformation de l'azote du sol, le microclimat ainsi que les transferts de chaleur, eau et nitrates [STICS,2014].

Globalement, tel que mentionné plus haut, STICS nécessite trois grands types d'intrants que sont les données climatiques, les données sur le régime cultural et les données sur les sols tandis qu'en sortie STICS génère deux grandes catégories de variables, soit les variables environnementales (e.g. évaporation et radiation solaire cumulées sur la saison) et les variables agricoles (e.g. rendement, biomasse, densité de plants).

Principes de fonctionnement de STICS (1)

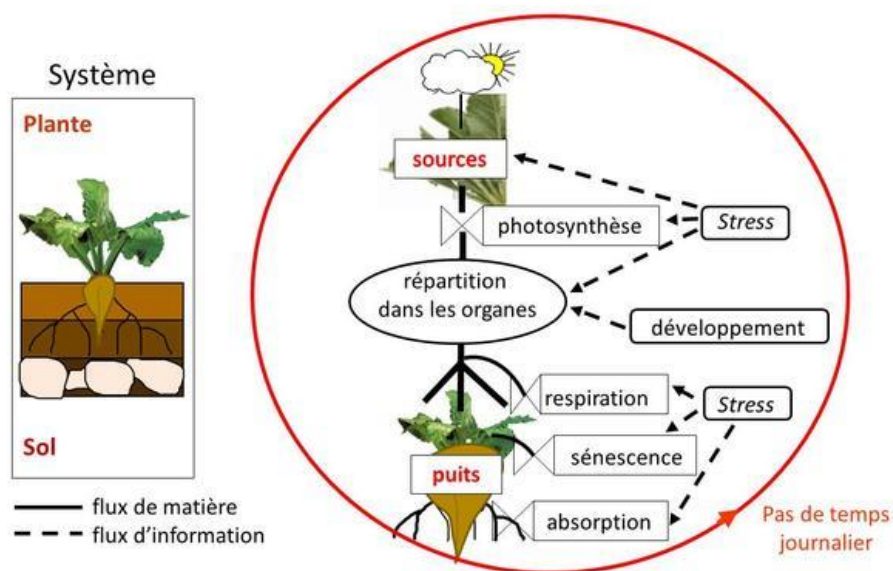


Figure 2 : Schématisation des principes de fonctionnement internes des STICS [STICS,2014]

Des données météorologiques journalières sont nécessaires pour la simulation (du semis à la récolte) afin de caractériser l'atmosphère au voisinage du système cultural simulé. Parmi les variables d'entrée décrivant le climat citons les températures minimales et maximales, le rayonnement, le cumul des précipitations journalières. Ces données agissent donc comme des forcages sur le système simulé car elles guident les simulations à chaque pas de temps (Figure 3).

Principes de fonctionnement de STICS (2)

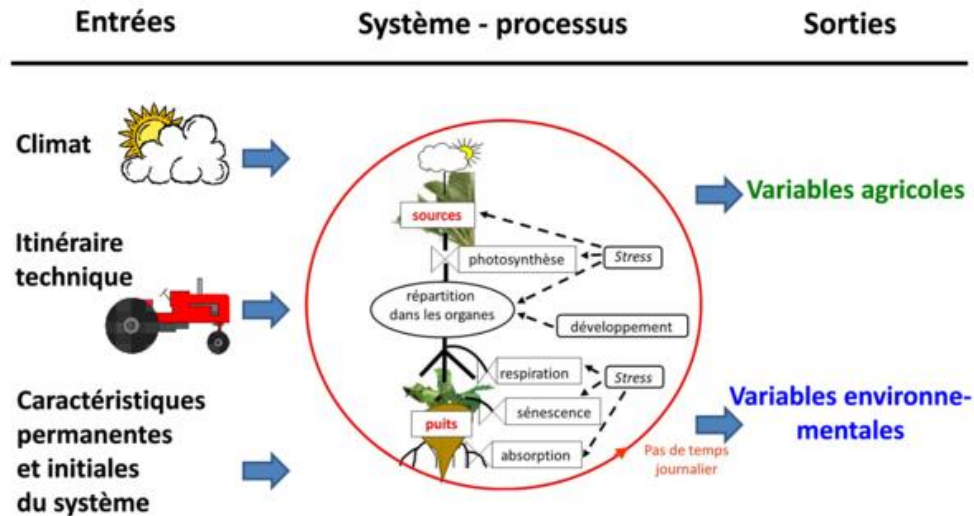


Figure 3 : Schématisation des principes de fonctionnement globaux de STICS [STICS,2014]

Les plantes n'exploitent le stock en eau du sol qu'entre deux valeurs [CIRAD,2002] :

Point de flétrissement (s_{pF}) : Teneur en eau en dessous de laquelle la culture ne parvient plus à transpirer.

Capacité au champ (S_{cc}) : Teneur en eau maximale au-delà de laquelle l'eau

Au niveau des données sur les pratiques culturales, les données nécessaires permettent de caractériser les conditions initiales de la simulation liées à la culture (e.g. date et densité de semis, variété du cultivar) ou à caractériser des événements précis lors du cycle de croissance de la culture (e.g. fertilisation, irrigation, date de cueillette).

Enfin, les derniers intrants à intégrer dans STICS sont les informations sur les sols qui permettent à STICS de simuler les échanges de chaleur, de nutriments et d'eau entre les plants et leur milieu de croissance. Parmi les conditions initiales liées au sols essentielles

pour la simulation citons la teneur en eau du sol (S) au point de flétrissement (S_{pF}) et à la capacité au champ (S_{cc}) ainsi que les teneurs en nutriments dans le sol.

Plusieurs travaux réalisés au Canada ont démontré que STICS pouvait s'avérer efficace pour évaluer les rendements de cultures telles le soya, le blé et le maïs et ce dans le contexte spécifique de l'est du pays [Jégo, Pattey et al.,2011, Jégo, Pattey et al.,2012, Sansoulet, Pattey et al.,2014].

Le modèle présente une flexibilité de paramétrisation et aussi, fait fort pertinent pour ce projet, une capacité d'utiliser en forçage une variable d'état importante pour la croissance des cultures, l'indice de surface foliaire (LAI).

Assimilation des données RSO dans les modèles de culture

Depuis plusieurs décennies, les données de télédétection ont été intégrées dans des applications visant l'estimation des rendements agricoles. Par exemple, Statistiques Canada opère depuis plusieurs années un programme d'évaluation sur le rendement des cultures grâce à de l'imagerie de télédétection basse résolution permettant de quantifier et qualifier l'état des cultures, par province, et ce pour l'entièreté du pays [Germain and Julien,1988]. Grâce à ces données, il est possible de compléter le programme classique basé sur les sondages menés durant la saison de croissance auprès des agriculteurs.

Les travaux de Prévot, Chauki et al. (2003) ont permis de démontrer la faisabilité et la pertinence de l'assimilation de données RSO dans le modèle de culture STICS. L'assimilation des données peut être réalisée avec une approche directe ou avec une approche indirecte.

L'assimilation directe vise à utiliser le modèle WCM présenté précédemment afin de dériver, à partir d'une simulation de STICS et de la variable d'état simulée (LAI) une valeur de rétrodiffusion SAR. L'objectif poursuivi dans l'assimilation directe est de minimiser l'erreur entre les valeurs RSO observées et les valeurs RSO simulées en

répétant l'opération de simulation avec une multitude de combinaisons de paramètres initiaux différentes, la combinaison minimisant le RMSE étant la meilleure. C'est donc une utilisation directe, dans son sens strict, de l'équation calibrée du WCM. C'est cette méthode qui est présentée dans les prochaines sections.

Une autre approche, nommée assimilation indirecte, fait quant à elle appel à une inversion du modèle WCM. Le modèle est réputé comme « inversé » car on l'utilise pour retrouver une valeur de LAI et non une valeur de rétrodiffusion, ce qui est sa fonction originale. Les paramètres de simulation de croissance de culture restent ici fixes, ce qui implique qu'ils soient préalablement connus précisément. L'une des approches d'inversion est de procéder à de multiples simulations, en itérant d'un pas régulier le LAI, de manière à identifier la valeur de LAI qui, une fois utilisée avec le WCM, permet de reconstruire une rétrodiffusion se rapprochant de la valeur observée. Comme indiqué précédemment, l'un des désavantages de cette approche est qu'elle nécessite une connaissance préalable des paramètres de simulation. Il est important de noter que le processus d'inversion peut aussi engendrer des erreurs [Prévot, Chauki et al.,2003]. Malgré ces désavantages, un exemple d'application au champ de Fallowfield a été réalisé et est présenté en annexe A.

Données

Données climatiques : Données de la station météorologique du champ #14

Les données météorologiques fournies par AAAC proviennent de la station installée directement au champ #14, dans la partie centrale de la parcelle. Une multitude de mesures sont fournies et utilisées pour la simulation dans STICS (Tableau 1) :

Tableau 1 : Paramètres météorologiques nécessaires pour les simulations fournies à la station météorologique localisée sur le champ #14

Paramètre météorologique (STICS)	Données de la station (AAAC)
Température maximale	Fournie en °C à chaque jour
Température minimale	Fournie en °C à chaque jour
Précipitations	Fournie en mm à chaque jour
Vent moyen	Fournie en m par seconde par jour
Irradiation solaire	Fournie en MJ/m ² par jour

Les données météorologiques DayMet

Les données météorologiques DayMet [Thornton, Running et al.,1997, Thornton, Running et al.,1997, Thornton and Running,1999, Thornton, Hasenauer et al.,2000, Thornton, Thornton et al.,2017] (<https://daymet.ornl.gov/getdata>) présentent la particularité d'être sous forme de grille à une résolution spatiale de 1km et facilement intégrables à l'échelle du champ pour des analyses et des simulations sous STICS (Voir annexe B). L'ensemble des données nécessaires à la caractérisation du climat sous STICS y sont disponibles, ce qui en fait une source de données pertinente pour une éventuelle application régionale. Les données DayMet permettent de restituer des séries journalières de variables

météorologiques dont les températures minimum (Figure 4) et maximum, l'irradiation solaire, les précipitations et la pression de vapeur.

En comparant les données climatiques tirées de la station météorologique de Fallowfield avec les données provenant de DayMet, ces dernières se sont montrées temporellement cohérentes et montrent quelques divergences au niveau des intensités (Figure 5).

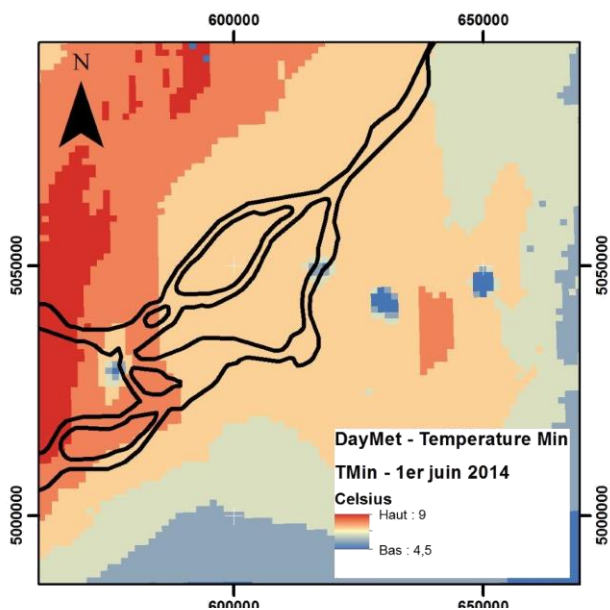


Figure 4 : Températures minimales en Montérégie tirées des données DayMet pour le 1^{er} juin 2014.

Données sur les pratiques culturales et sur les sols : AAAC

Les données sur les sols et les pratiques culturales ont été fournies par AAAC. Elles contiennent l'ensemble des informations essentielles et optimisées pour le champ #14 de L'ACIA afin de pouvoir procéder à une simulation « brute », c'est-à-dire sans assimilation aucune, dans le modèle de culture STICS. La compilation et l'optimisation de ces données a été réalisée dans le cadre des travaux de Jégo, Pattey et al. (2011).

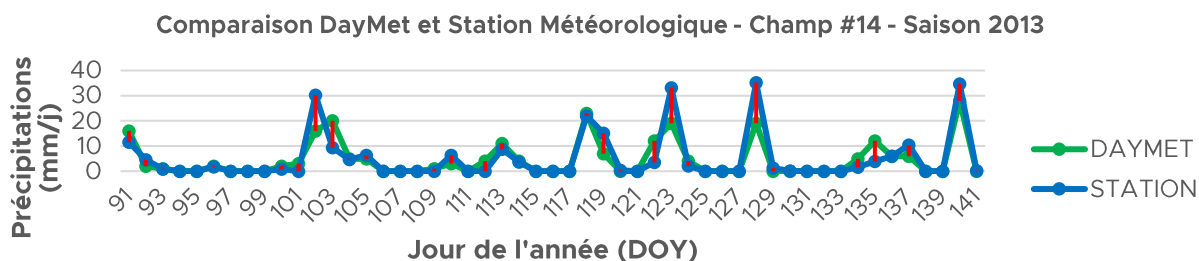


Figure 5 : Comparaison entre des séries de précipitations (en mm/jour) pour une courte période, tirées de la station météo d'AAAC (bleu) et des données DayMet (vert) pour le champ #14 en 2013 à Fallowfield

Données terrain sur le LAI et la biomasse AAAC

Les données d'observations au champ réalisées par les équipes d'AAAC ont été mises à notre disposition afin de valider les modélisations et les estimations de rendement. Ces données disponibles pour les périodes de culture de maïs des années 2013 et 2017, fournissent des mesures de LAI et de biomasse sèche (Figure 6) prises au champ. La mesure fournie pour chaque date constitue en fait la moyenne d'une multitude de mesures, réparties sur l'ensemble de la zone étudiée, de manière à obtenir une valeur représentative de la parcelle.

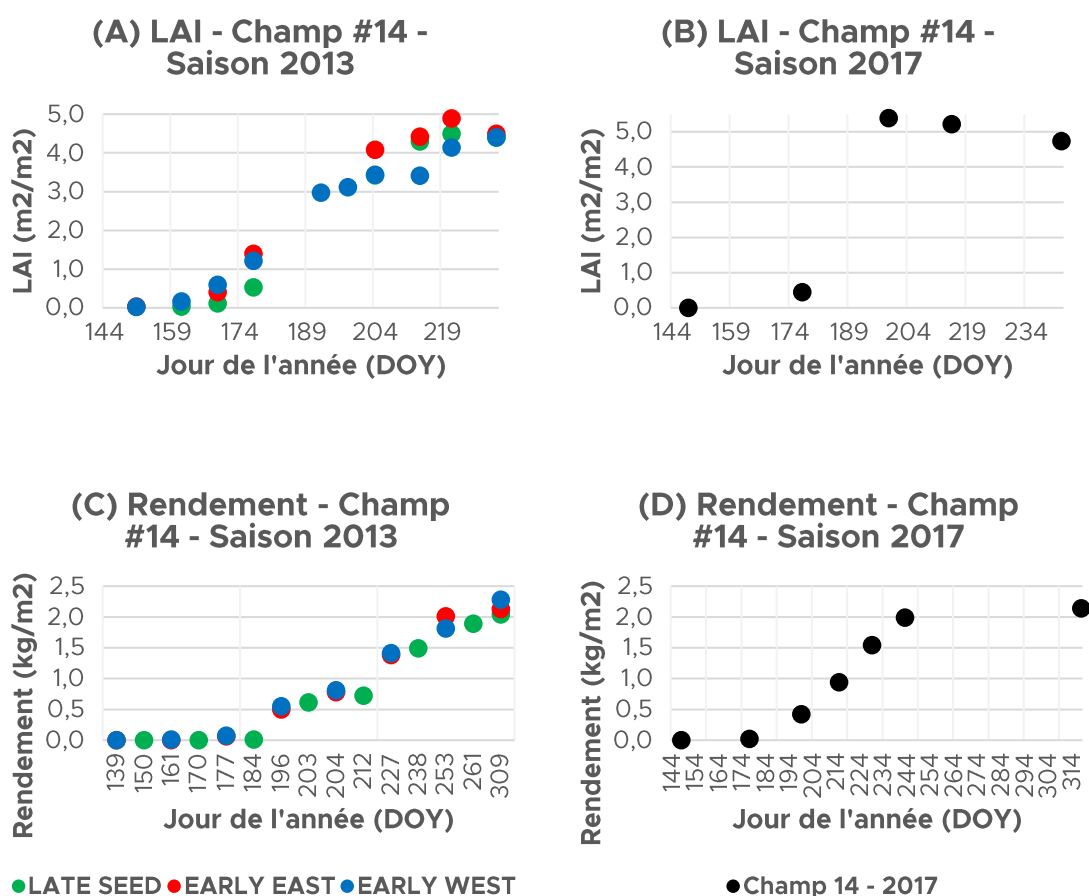


Figure 6 : Valeurs moyennes de l'indice de surface foliaire en m²/m² au champ #14 en 2013 (A) et 2017 (B) ainsi que du rendement sec en kg/m² en 2013 (C) et 2017 (D)

En ce qui a trait aux données sur les sols pour le champ #14, une description du sol, conforme et configurée (Code de sol: *OttawaF14revised*) pour les besoins de la simulation STICS, a été fournie par Guillaume Jégo d'AAAC (Voir annexe C).

Données satellitaires d'humidité du sol de SMOS

Tel que décrit précédemment, des données d'humidité du sol, observées via TDR directement au champ #14, ont été fournies par AAAC.

Néanmoins, pour pouvoir prétendre à des applications régionales et utiliser des valeurs cohérentes du paramètre M_v dans l'équation du WCM (voir équation 7), des données d'humidité du sol spatialisées et concordantes temporellement avec les acquisitions RSO sont nécessaires.

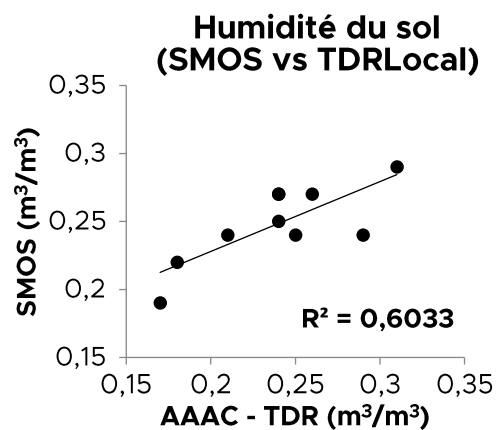


Figure 8 : Relation unissant les mesures TDR et les observations SMOS pour le champ #14 de Fallowfield en 2013

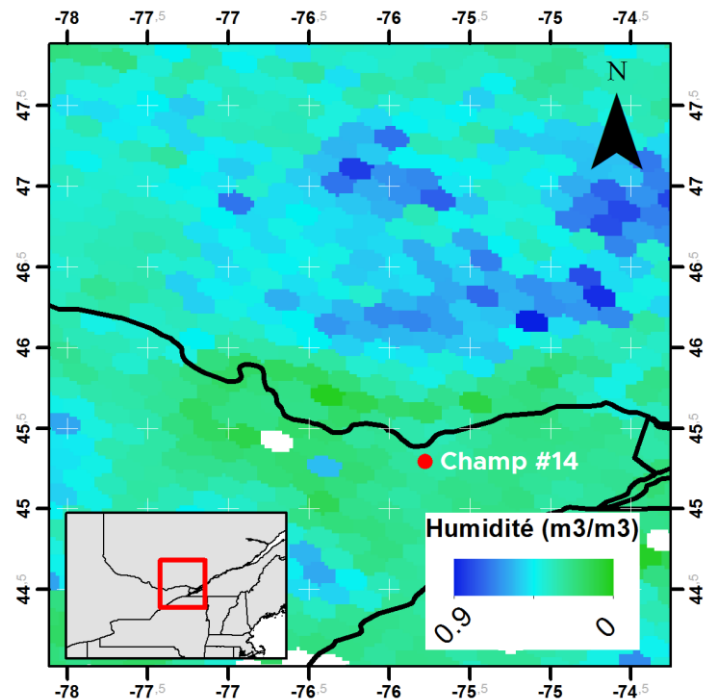


Figure 7 : Observations SMOS acquises sur l'est de l'Ontario et le sud-ouest du Québec en Aout 2013

Le capteur SMOS de l'ESA, lancé le 2 novembre 2009, permet d'estimer l'humidité des sols (Figure 7) à une résolution spatiale de 50km et avec une précision de $\pm 4\%$, soit $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, tous les 3 jours [Kerr, Waldteufel et al., 2001] qui présentent une bonne cohérence ($R^2 = 0,6$) avec les observations terrain d'AAAC (Figure 8).

Cependant, en hautes latitudes comme au Québec et en Ontario, les temps de revisite sont réduits et il est alors possible de prétendre obtenir des données à chaque jour. La procédure de conversion des fichiers SMOS en GeoTIFF avec le logiciel SNAP de L'ESA (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>) est présentée en annexe D.

Données satellitaires archivées de RADARSAT-2

Les données obtenues de l'ASC ont été tirées d'une archive de données préalablement acquises pour lesquelles nous n'avions qu'un contrôle limité sur les angles d'incidences et résolutions d'acquisition. Le choix des images découle donc d'un compromis entre la résolution et l'angle d'incidence et ce en conjonction avec les dates d'acquisition qui, afin de permettre de valider la capacité d'estimation du LAI sur l'ensemble de la période, ont été étendues entre le début mai et la fin octobre, pour un nombre total d'images accordées de 20 (Tableau 2), réparties également entre les saisons 2013 et 2017.

Tableau 2 : Acquisitions d'archives RADARSAT-2 sur le site de la ferme expérimentale de l'Agence Canadienne d'Inspection des Aliments de Fallowfield pour les saisons de croissance du maïs 2013 et 2017. Les jours de l'année (*DOY – Day Of Year*) 144 et 284 correspondent respectivement au 24 mai et au 11 octobre. Les lignes de couleur verte indiquent des acquisitions en orbite ascendantes et les lignes de couleur rouge indiquent des acquisitions en orbite descendantes.

Fallowfield CFIA #14 - 2013			Fallowfield CFIA #14 - 2017		
DOY	Beam mode	Incidence angle (°)	DOY	Beam mode	Incidence angle (°)
144	Fine Quad Pol. 1	18.4 to 20.4	160	Fine 4 Near	42.7 to 45.3
154	Wide Fine Quad-Pol 11	29.5 to 32.6	191	Wide Fine Quad-Pol 20	38.6 to 41.3
185	Wide Fine Quad-Pol 6	23.7 to 27.2	199	Wide 3	38.7 to 45.3
192	Wide Fine Quad-Pol 1	17.5 to 21.2	223	Wide Fine 3	38.7 to 45.3
206	Wide Fine 2	30.6 to 39.5	226	Wide Fine Quad pol 10	28.4 to 31.6
226	Wide Fine 1	20.4 to 31.9	236	Wide Fine Quad pol 6	23.7 to 27.2
261	Fine 1	36.9 to 39.9	260	Wide Fine Quad pol 6	23.7 to 27.2
264	Wide Fine 1	20.4 to 31.9	270	Wide Fine Quad pol 16	34.8 to 37.6
271	Wide Fine 1	20.4 to 31.9	274	Wide Fine Quad pol 11	29.5 to 32.6
281	Wide Fine 1	20.4 to 31.9	284	Wide Fine Quad pol 6	23.7 to 27.2

Les données ont été orthorectifiées en utilisant le modèle rationnel et converties en puissances sous PCI© Geomatica. La rétrodiffusion moyenne par parcelle a ensuite été extraite en utilisant l'outil « *Zonal Statistics* » sous ArcMap 10.4 (Figure 9).

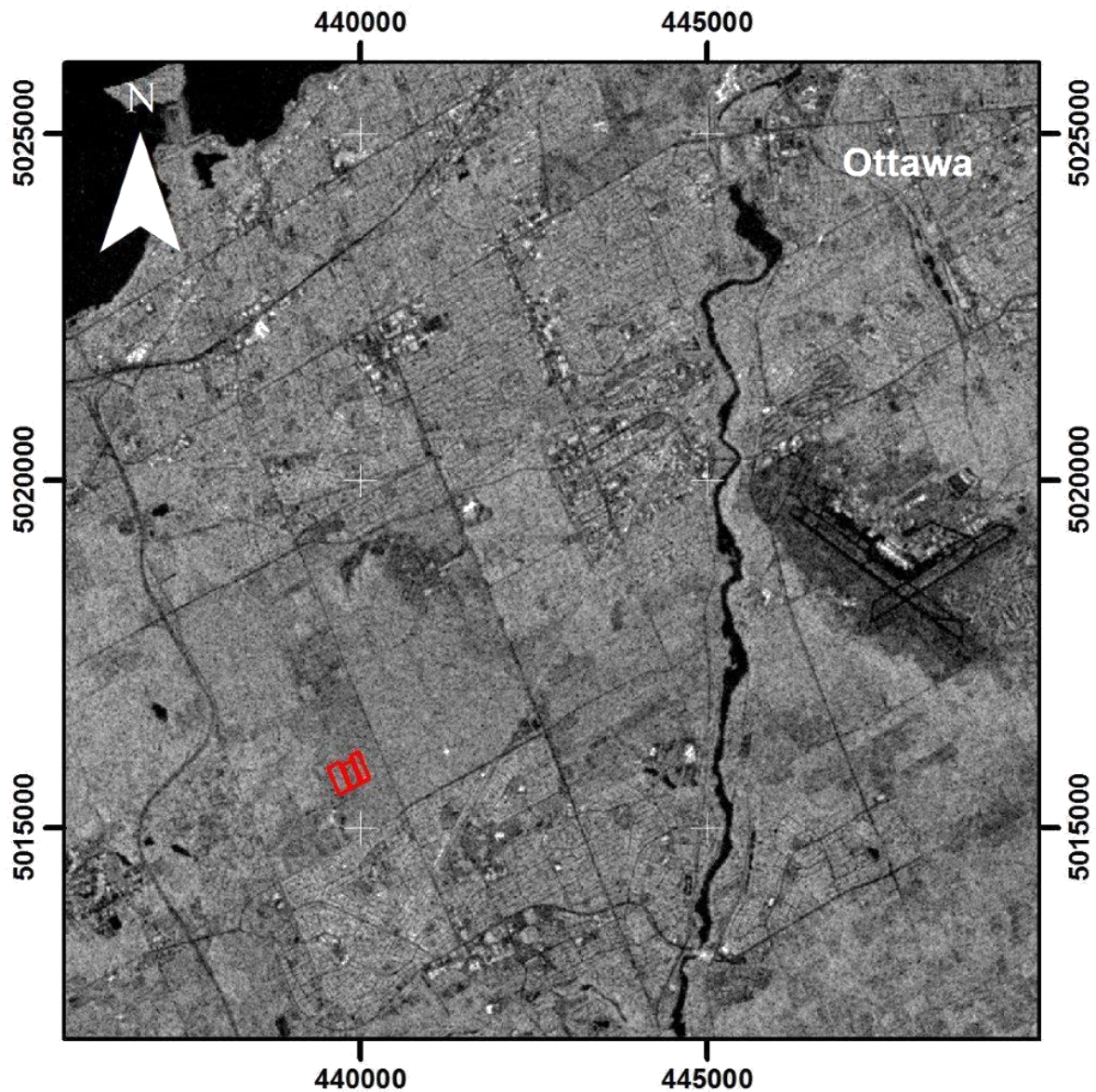


Figure 9 : Image RADARSAT-2 en polarisation croisée (HV) sur le secteur d'Ottawa/Fallowfield. Les trois sous-sections du champ #14 en 2013 sont présentées en rouge dans la figure. Données et produits de RADARSAT-2 © MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. (2013) – Tous droits réservés. RADARSAT est une marque de commerce officielle de l'Agence Spatiale Canadienne.

Données sur les typologies des sols AAAC

Les données sur les types de sols sont tirées de la Base Nationale de Données sur les Sols (BNDs) d'AAAC (<http://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/index.html>). Le jeu de données vectorielles sur les pédo-paysages du Canada [AAAC,2010] et les tables d'attributs de sols y étant associées ont été utilisé afin d'identifier quel type de sol (Figure 10), plus particulièrement quel code de sol (3 caractères) était associé aux polygones présents en Montérégie.

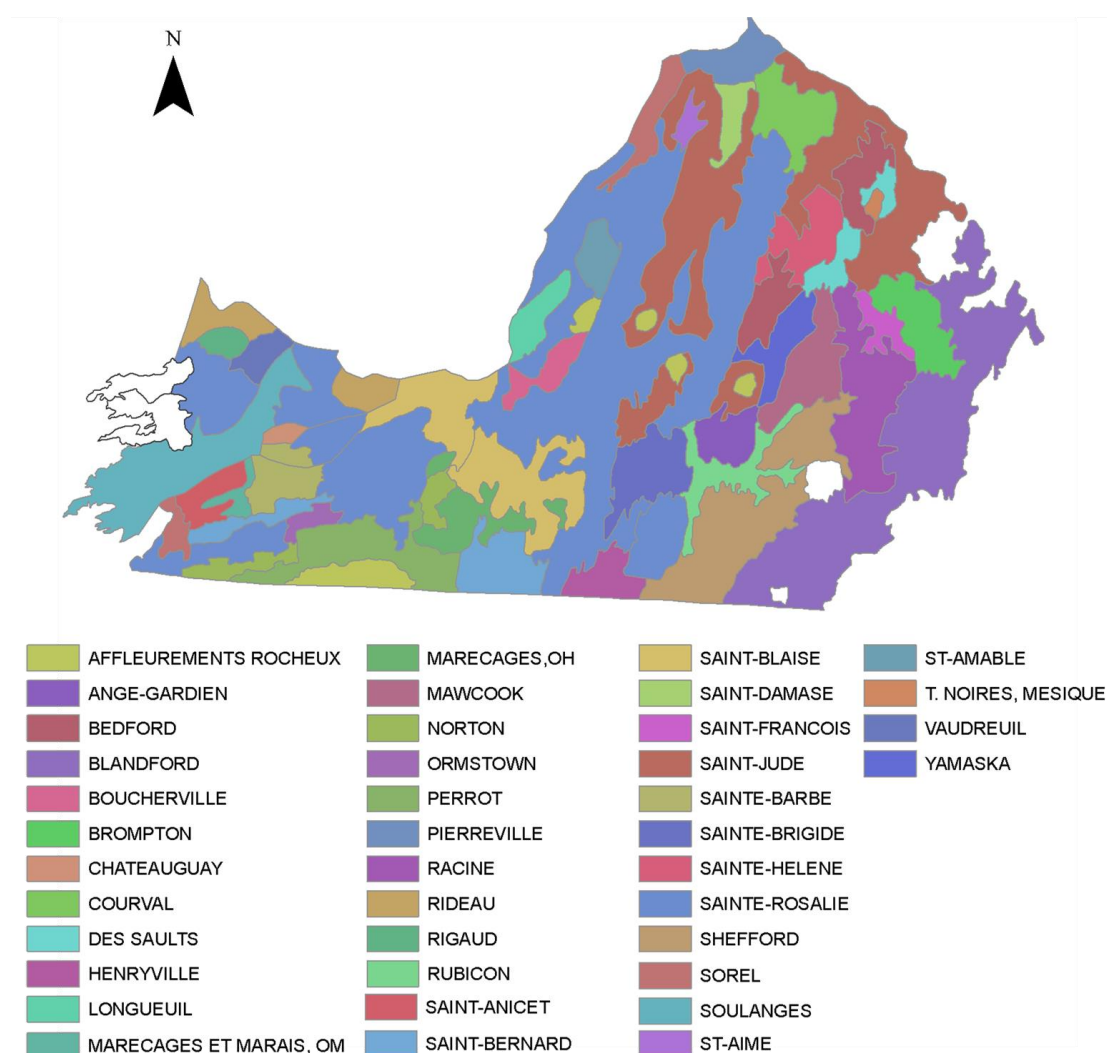


Figure 10 : Les différents types de sols se trouvant dans la région administrative de la Montérégie selon les données sur les pédo-paysages du Canada de la Base Nationale de Données sur les Sols (BNDs)

Les fichiers de configuration, conformes et configurées pour les simulations dans STICS ont été préparés dans le cadre d'un projet précédemment réalisé dans le laboratoire TENOR de L'INRS, le projet Télérndement [Chokmani, Perreault et al.,2016]. C'est donc cette banque de fichiers qui a été utilisée pour les simulations régionales en Montérégie. Dans le cas de simulations dans une autre région, le travail de construction des fichiers de sols devra être réalisé.

Analyses et résultats

Objectif 1 : Lier les observations RSO au LAI

Le modèle WCM (voir équation 7), présenté précédemment dans la section « État de l'art », a été ajusté aux données RADARSAT-2 d'archives obtenues grâce à l'entente SOAR-E (Voir annexe E). Sa formulation est tirée des travaux de Hosseini, McNairn et al. (2015).

L'ajustement a été réalisé en utilisant la méthode des moindres carrés avec l'algorithme « *Trust-Region Reflective* » dans Matlab. L'objectif était d'identifier le jeu de paramètres qui permettait de minimiser l'erreur résiduelle tout en conservant les paramètres dans des bornes réalistes (Tableau 3).

Tableau 3 : Paramètres du modèle WCM et bornes utilisées pour contraindre leur estimation. Pour le paramètre D, les bornes représentent des valeurs allant de -30 à -7dB.

Paramètre	Descriptif	Bornes
A	Paramètre lié à la rétrodiffusion dans le couvert végétal	$[0, \infty]$
B	Paramètre lié à l'atténuation du signal liée au couvert végétal	$[0, \infty]$
C	Paramètre de sensibilité du radar à l'humidité du sol	$[0, \infty]$
D	Coefficient de rétrodiffusion du sol nu (puissance)	$[0.001, 0.2]$
E_1	Paramètre lié au LAI (Participe à la rétrodiffusion dans le couvert)	$[-\infty, \infty]$
E_2	Paramètre lié au LAI (Participe à la rétrodiffusion dans le couvert)	$[-\infty, \infty]$

Le modèle obtenu permet de restituer une valeur de rétrodiffusion à partir de valeurs de LAI, d'humidité du sol et d'angle d'incidence connues. La formulation finale obtenue suite à la calibration sur les données 2013 du champ #14 est la suivante :

$$\sigma^0 = 0.0322 * L^{0.0389} \cos(\theta) \times \left(1 - \exp\left(\frac{-2 * 2.1818 * L^{7.7907}}{\cos(\theta)}\right) \right) + 0.0029 * M_V + 0.0146$$

$$\times \exp\left(\frac{-2 * 2.1818 * L^{7.7907}}{\cos(\theta)}\right)$$

(7)

Le modèle s'ajuste aux données de calibration avec un R^2 de 0,9078, une valeur MSE de 0,00001 et la norme des valeurs résiduelles est de 0,00019. Cependant, par soucis de comparaison avec les travaux de Hosseini, McNairn et al. (2015), les valeurs de puissances ont été converties en décibels afin de calculer le R^2 à 0,8713 (Figure 11).

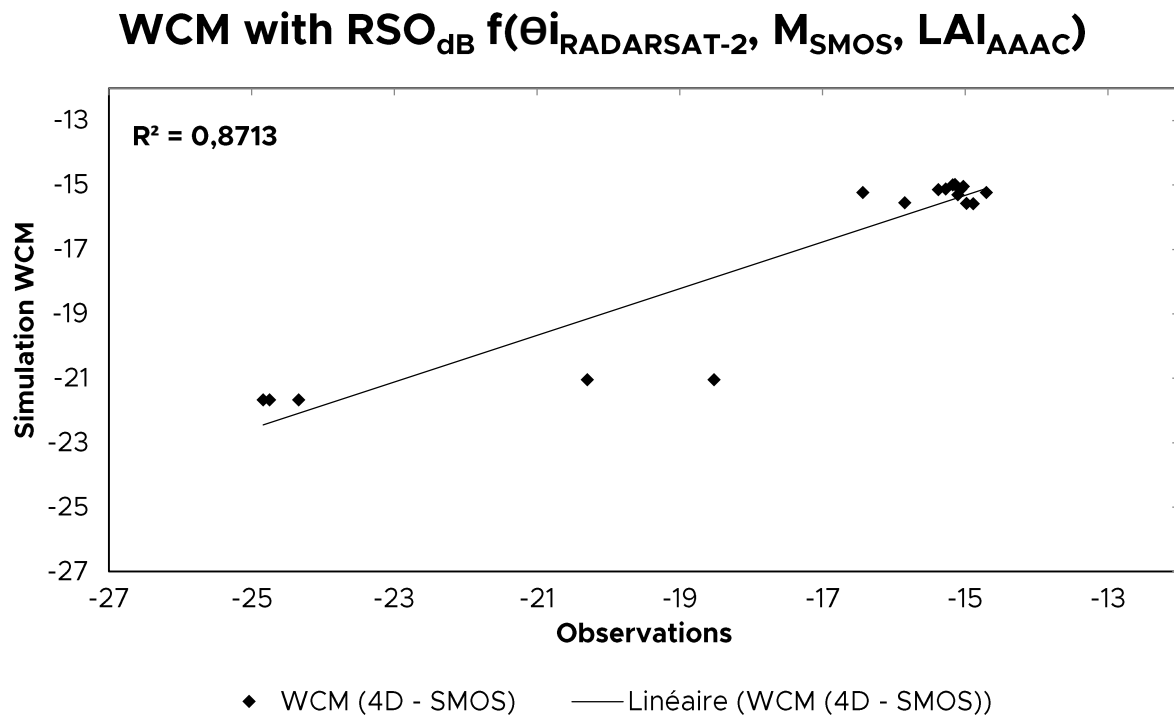


Figure 11 : Modèle WCM ajusté aux données de calibration de 2013 obtenues via AAAC (LAI), les données RADARSAT-2 (Incidence) et SMOS (Humidité du sol). Les données sont présentées en dB pour l'estimation du R^2

L'ajustement aux données 2013 du champ #14 montrent que, pour les valeurs témoignant des LAI les plus élevés (fortes rétrodiffusions > -16dB), la corrélation semble excellente, mais que pour les valeurs LAI plus faible (avant ou pendant la croissance), la performance atteinte par le WCM est moindre.

Sur les données de validation, provenant également du champ #14, mais pour la saison de croissance 2017, les résultats montrent un R^2 de 0,8488 (Figure 12).

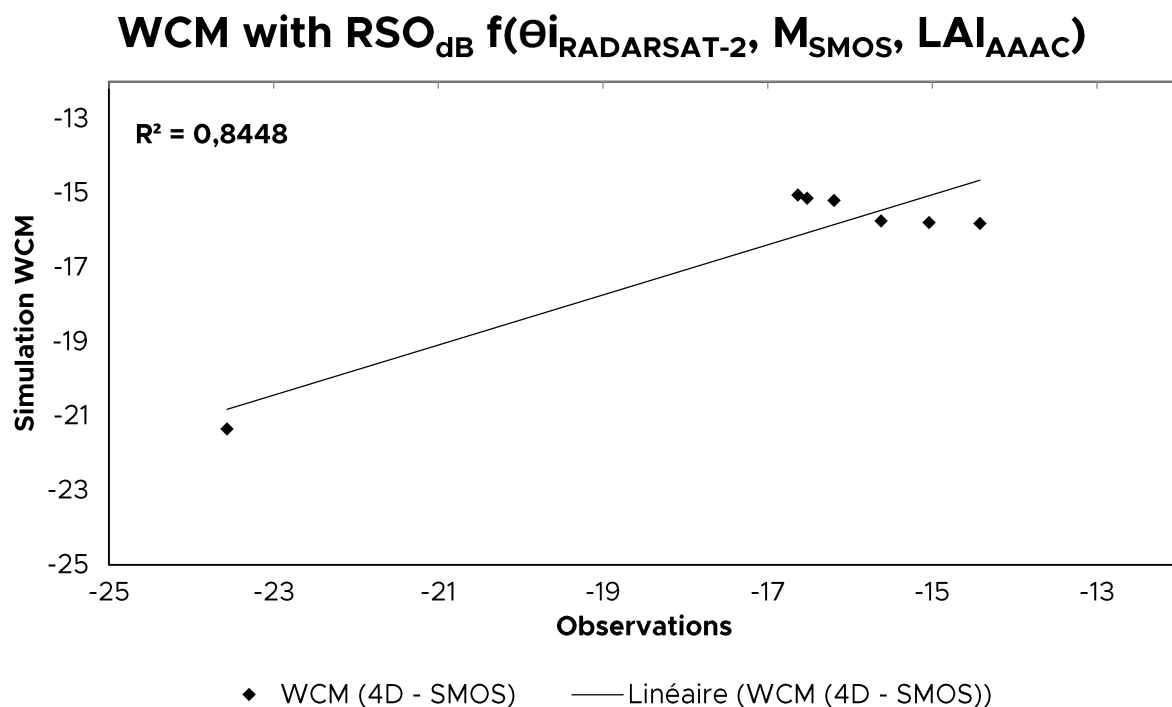


Figure 12 : Modèle WCM ajusté aux données de validation de 2017 obtenues via AAAC (LAI), les données RADARSAT-2 (Incidence) et SMOS (Humidité du sol). Les données sont présentées en dB pour l'estimation du R^2 .

Objectif 2 : Développer, tester et optimiser une approche d'assimilation des données RSO dans une configuration RS2+STICS

L'approche d'assimilation des données RSO dans STICS a été développée selon la procédure d'assimilation directe, telle que proposée par Prévot, Chauki et al. (2003).

L'assimilation directe des données RSO (Figure 13) dans le modèle STICS consiste à ajuster certains paramètres clés (lire ici sensibles) du modèle de croissance de manière à minimiser la différence entre les valeurs RSO observées et les valeurs simulées. Donc, dans notre contexte, l'objectif vise à ajuster des paramètres du modèle STICS de manière à obtenir une simulation avec des valeurs LAI qui, une fois transformées en rétrodiffusions grâce au WCM_{DIRECT}, minimiserons les résidus.

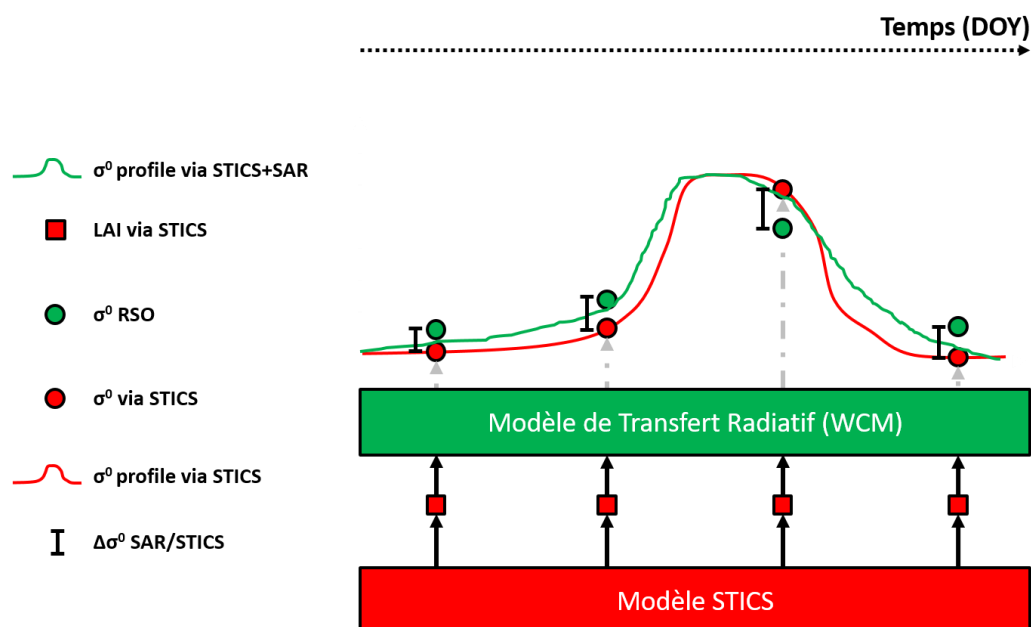


Figure 13: Schématisation de l'approche d'assimilation directe des rétrodiffusions RSO dans le simulateur de croissance des cultures STICS

Les paramètres sélectionnés pour l'assimilation doivent être reconnus pour avoir un impact important sur la rétrodiffusion RSO et également sur la variable d'état utilisée comme « assimilateur », soit dans notre cas le LAI. À la lumière des travaux précédents de Prévot, Chauki et al. (2003), il semble que la rétrodiffusion RSO se montre particulièrement affectée par les paramètres ayant un impact sur l'humidité du sol comme la densité de la première strate de sol (da) et la capacité au champ du premier horizon de sol (hcc1). Également au niveau des paramètres culturaux, la date de semis (iplt) et la densité de semis (densite) apparaissent comme des paramètres ayant un effet

mesurable et concret sur la rétrodiffusion RSO (Figure 14). Tel que discuté précédemment, ces paramètres ont également un impact logique et réel sur la variable d'état utilisée pour l'assimilation, soit le LAI.

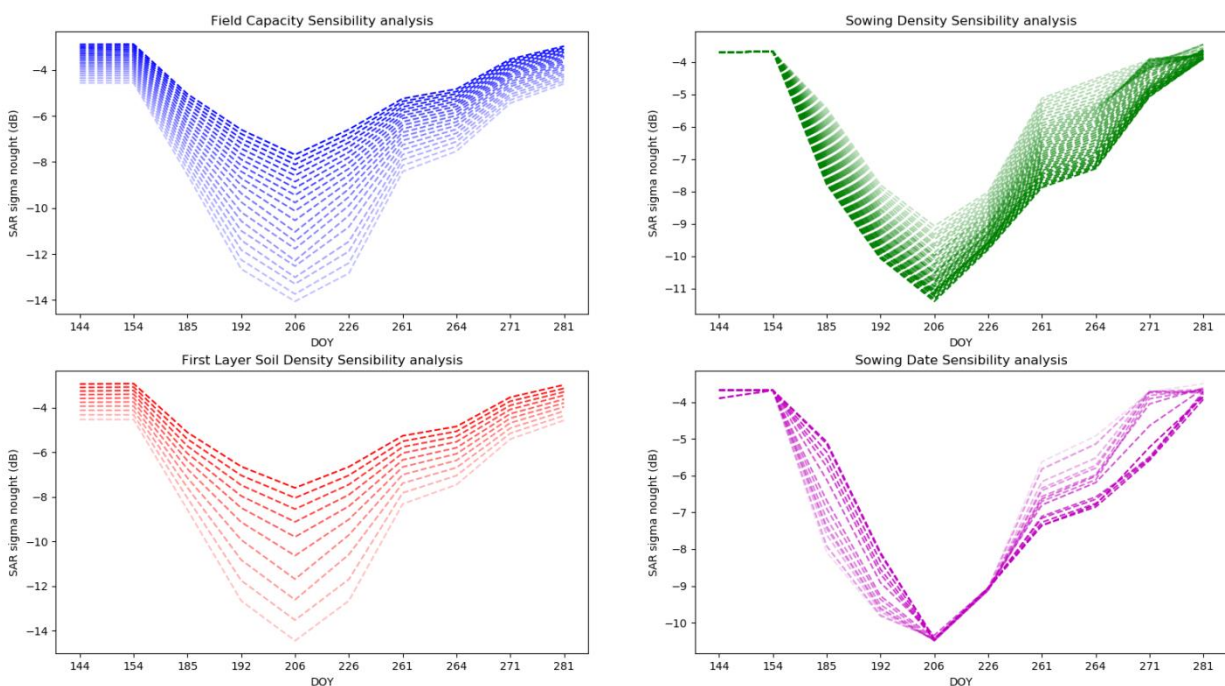


Figure 14 : Impact de la modification des paramètres de capacité au champ (bleu), de densité de semis (vert), de densité de la première couche de sol (rouge) et de la date de semis (mauve) sur la rétrodiffusion RSO lorsque tous les autres paramètres restent fixes pour chaque jour de la saison de simulation 2013.

Pour réaliser l'assimilation directe à partir des observations RSO, un outil de simulation itérative en ligne de commande, permettant de tester toutes les configurations possibles des quatre paramètres cités plus tôt (iplt, hcc1, da, densite), a été développé sous Python en utilisant des outils open-source. L'outil est donc facilement transférable et simple d'utilisation. L'outil dans sa formule actuelle, applique un schéma d'optimisation rigide, c'est-à-dire que l'algorithme réalise de manière successive, une simulation avec chaque jeu de paramètres, sans optimisation dans l'espace solution (Figure 15).

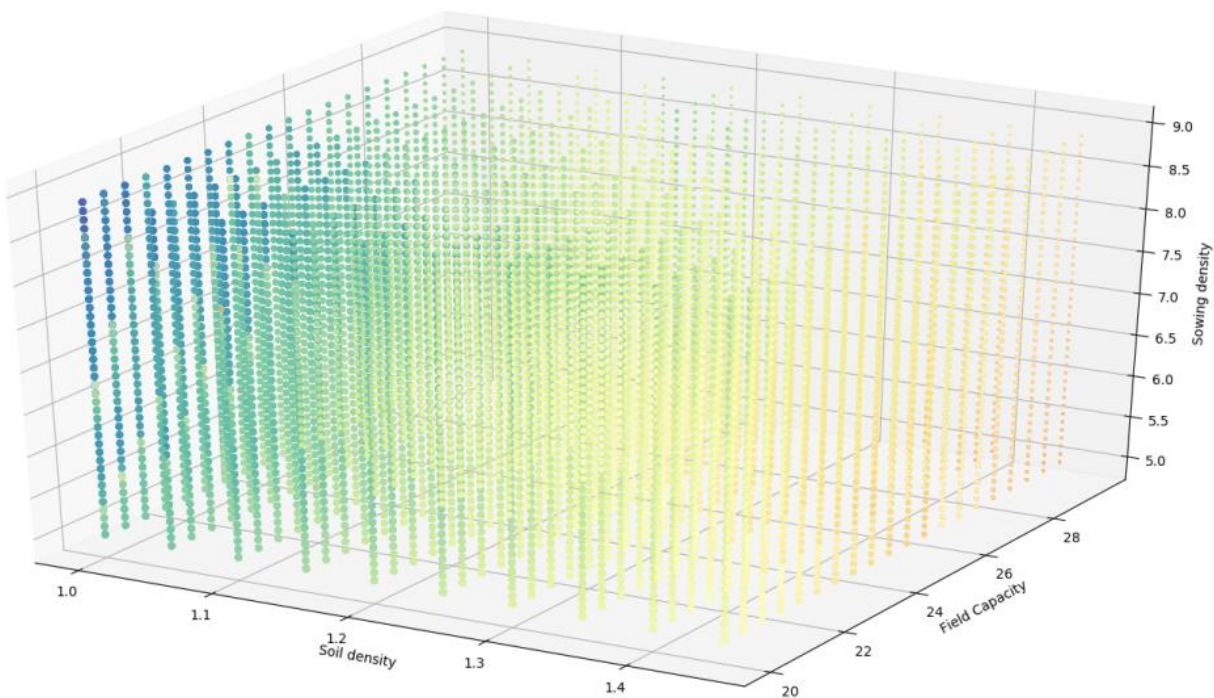


Figure 15 : Espace des solutions pour une simulation d'assimilation en configuration STICS+RS2. Les points de couleurs chaudes et plus petits présentent les RMSE les plus élevés (donc un moins bon ajustement) tandis que les points de couleurs froides et plus gros présentent des RMSE plus faibles (donc un meilleur ajustement).

Il s'agit d'un premier développement de cet outil et il est important de considérer que tous les autres paramètres initiaux de STICS, disponibles dans les fichiers de configuration avec les extensions .xml, sont modifiables de la même manière que les quatre paramètres initialement utilisés. L'outil est donc facilement modifiable pour optimiser d'autres paramètres de sols ou de pratiques culturales.

Objectif 3 : Tester et évaluer la faisabilité des approches d'assimilation RSO et de forçage LAI_{RSO} à l'échelle de la parcelle

La méthode développée à l'objectif 2 a été mise en œuvre sur le champ #14, pour les années 2013 et 2017, cette dernière n'ayant pas été utilisée dans la calibration du WCM et qui est donc indépendante.

Les rendements obtenus montrent que l'assimilation directe des données RSO dans le modèle STICS avec la méthode proposée à l'objectif 2 permet d'obtenir des rendements plus proches de la réalité observée au champ #14 (Tableau 4) en permettant de simuler de manière plus réaliste la variable d'état LAI, importante pour la photosynthèse et donc pour la croissance des plants et donc leur rendement (Figure 16).

Tableau 4 : Impact du processus d'assimilation sur les estimations de rendements secs finaux des cultures de maïs pour le champ #14 de Fallowfield en 2013 et 2017

Simulation	Rendement brute [$+LAI_{max}$]	Rendement assimilé [$+LAI_{max}$]
2013 (Calibration)	18.37 t/Ha [$3.59 \text{ m}^2/\text{m}^2$]	19.89 t/Ha [$4.41 \text{ m}^2/\text{m}^2$]
2013 (Mesures)	20,40 t/Ha [$4.49 \text{ m}^2/\text{m}^2 \pm 0.35$]	
2017 (Validation)	17.61 t/Ha [$3.55 \text{ m}^2/\text{m}^2$]	18.22 t/Ha [$4.07 \text{ m}^2/\text{m}^2$]
2017 (Mesures)	18,89 t/Ha [$5.58 \text{ m}^2/\text{m}^2 \pm 0.93$]	

Ce qui semble ressortir de l'analyse des cas de 2013 et 2017 est que STICS tend à sous-estimer les valeurs de LAI, ce qui a un impact direct sur le rendement estimé par le modèle. En intégrant RADARSAT-2, de manière à réajuster les paramètres initiaux, STICS arrive alors à se rapprocher de la valeur de rendement réelle mais il est toutefois important de noter que les erreurs d'estimations, quoique mitigées par l'assimilation RADARSAT-2, peuvent être liées à des paramètres internes de STICS régulant la

croissance des plants ou potentiellement au paramétrage du cultivar. Il faut donc en déduire que RADARSAT-2 permet ici de rapporter la simulation sur la bonne voie en fournissant une information supplémentaire et externe à la modélisation, mais ne corrige pas la source réelle de l'erreur d'estimation.

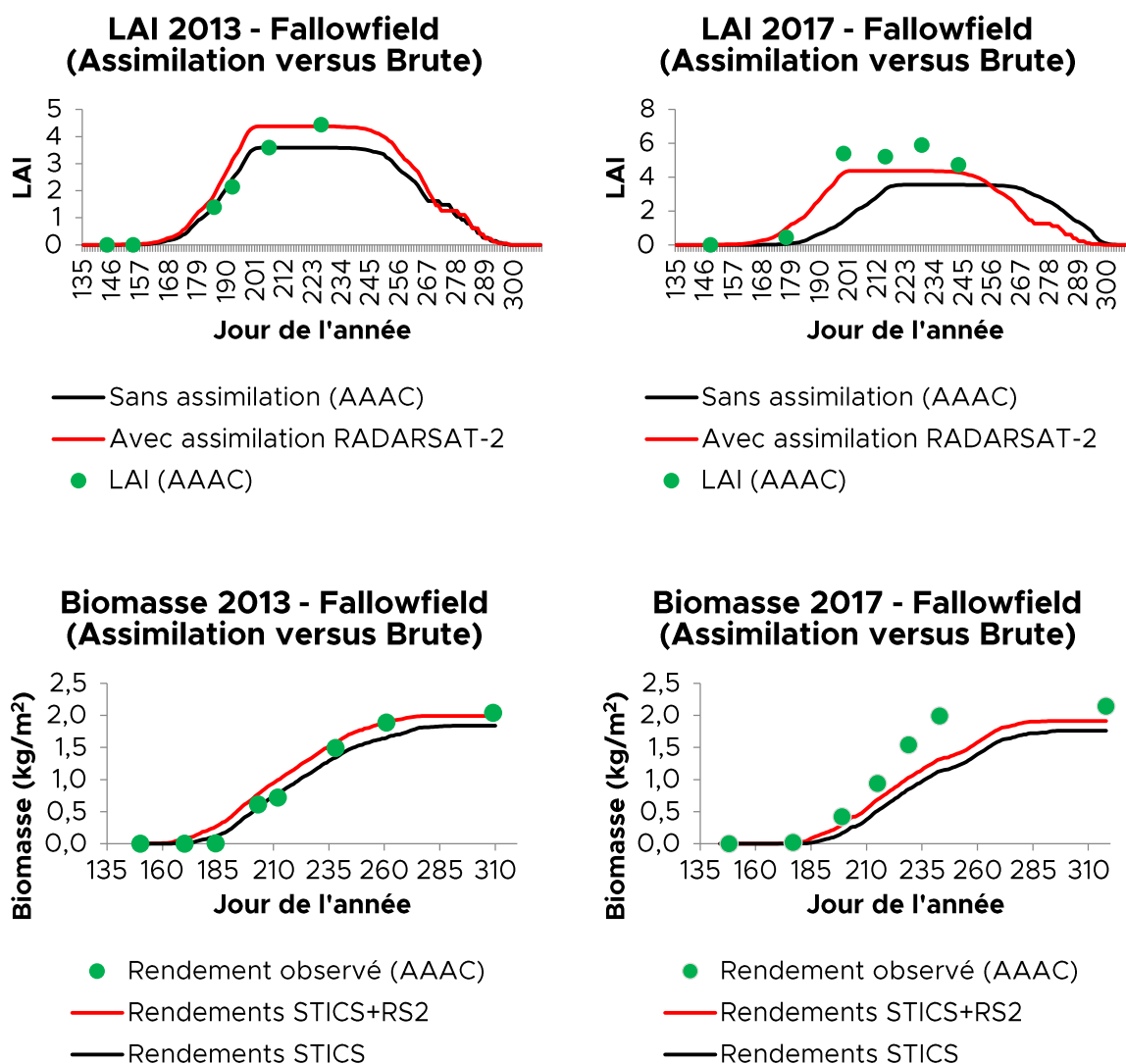


Figure 16 : Estimations des rendements (haut) et de la biomasse (bas) tirées des simulations STICS sans assimilation (traits noirs) et avec les données RADARSAT-2 assimilées (traits rouges) pour les saisons de croissance 2013 et 2017 à Fallowfield.

Objectif 4 : Tester et évaluer la faisabilité des approches d'assimilation RSO et de forçage LAI_{RSO} à l'échelle régionale

Les données nécessaires aux simulations « régionales » sont compilées dans ArcMap 10.4 en utilisant un fichier de formes (shapefile) des centroïdes des parcelles agricoles à étudier. En utilisant la fonction « *Extract values to points* », un fichier est créé pour chacun des paramètres nécessaire et ce pour chaque parcelle. Le seul paramètre qui est traité de manière différente est le fichier décrivant les sols (AAAC) qui est généré par une simple jonction spatiale de polygones vers points.

Des séries temporelles de rétrodiffusions en polarisation croisée ont été bâties pour total de 28 763 parcelles sur lesquelles du maïs a été cultivé pendant la saison 2014 en Montérégie. Les parcelles ont été identifiées grâce aux informations contenues dans la Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées de la Financière Agricole du Québec (BDPPAD, <https://www.fadq.qc.ca/fr/documents/donnees/base-de-donnees-des-parcelles-et-productions-agricoles-declarees/>). En plus des séries RSO, des séries d'humidités du sol tirées de SMOS ainsi que des séries de températures maximales et minimales, de pression de vapeur, de précipitations et d'irradiation solaire ont été compilées à partir des données DayMet.

Des simulations combinées à la procédure d'assimilation ont été réalisées sur un grand nombre de parcelles de maïs déclarées pour l'année 2014. Plus de 1100 simulations ont été complétées sur des parcelles choisies aléatoirement de manière à respecter une certaine répartition spatiale sur le territoire étudié (Figure 17). Il est à noter que certains types de sols, de par une configuration erronée, semblent systématiquement provoquer des erreurs dans le simulateur STICS, ces derniers sont donc rejetés du cadre de simulation.

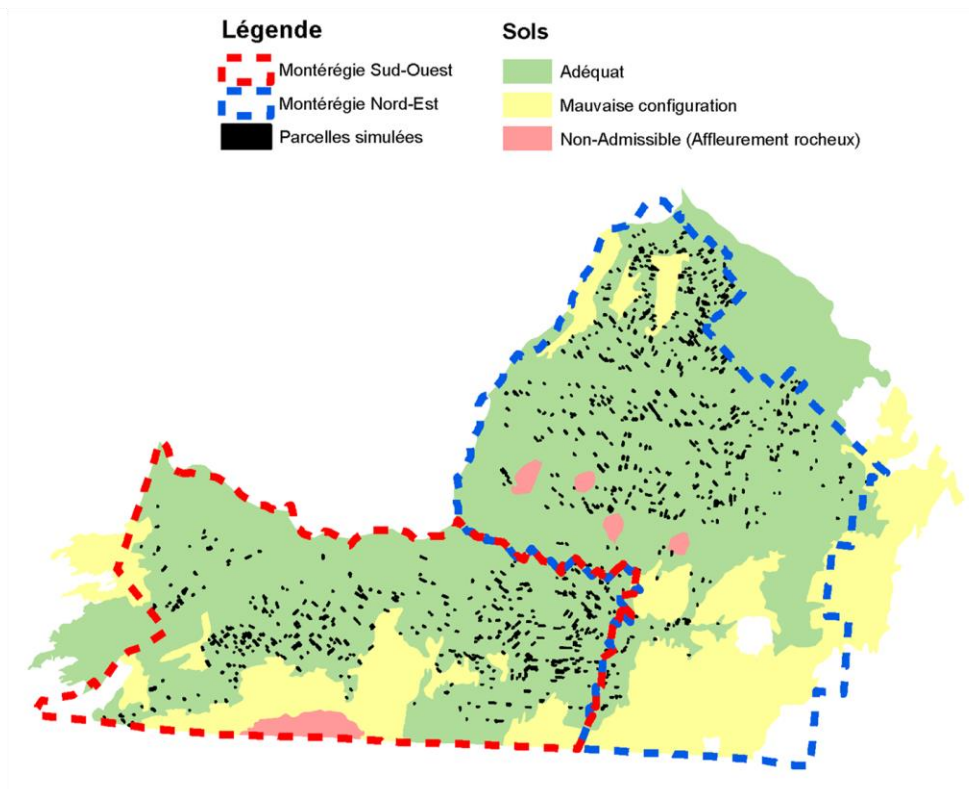


Figure 17 : Carte des délimitations, sols et parcelles utilisées pour les simulations en mode assimilation directe STICS + RS2 sur la Montérégie en 2014

Pour cet exercice de simulation, seuls les paramètres liés aux pratiques culturales, soit la date de semis et la densité de semis, ont été altérés. Les paramètres de sols, soit la densité de la première strate de sol et la capacité au champ ont été laissés tel quel selon la configuration obtenue à partir des données de typologie des sols AAAC (voir section Matériel et méthodes). En réalité, les données de date de semis et de densité étaient ici les seules données qui n'étaient pas répertoriées dans une base de données avec une valeur définitive. Néanmoins, les simulations ont été menées en utilisant une gamme de valeurs crédibles tant au niveau de la date de semis [1^{er} mai au 10 mai] [William-Houde,2019] et de la densité de semis [7,5 à 9 plants/m²] [Ontario,2017]. Cette décision de simulation s'appuie non seulement sur le fait que les paramètres de sols sont connus mais permet également de réduire le nombre total de simulations à réaliser par champ, ce qui réduit irrémédiablement le temps total d'assimilation STICS+RS2.

Le rendement moyen en fruit (t/Ha) obtenu par les simulations est ensuite comparé au rendement moyen déclaré dans les tables de l'Institut de la Statistique du Québec [ISQ,2018]. L'ISQ présente ses résultats en découpant la Montérégie en deux sous-régions (Voir Figure 17) distinctes, soit la Montérégie Nord-Est (56,5% du territoire) et la Montérégie Sud-Ouest (43,5% du territoire). De cette séparation, 651 parcelles sont en Montérégie Nord-Est (57% des parcelles simulées) et 487 sont en Montérégie Sud-Ouest (43% des parcelles simulées).

En 2014, L'ISQ déclare des rendements moyens de respectivement 8,67 et 9,10 t/Ha pour la Montérégie Nord-Est et Sud-Ouest. Les simulations en configuration STICS+RS2 génèrent quant à elles des rendements moyens de respectivement 9,95 et 9,01 t/Ha et médians de 9,6 et 9,25 t/Ha pour ces deux mêmes régions (Figure 18).

Divers organismes diffusent des analyses de rendement pour la région de la Montérégie, dont le réseau Agrocentre, ayant diffusé un rapport final de la récolte 2014 [Agro-Centre,2014]. Dans ce rapport, Agrocentre déclare des rendements extrêmement variables dans le secteur de la Montérégie-Est¹, allant de 3 à 11 t/Ha tandis que la Montérégie-Ouest présente quant à elle des rendements plus dans les normes entre 8,2 à 10,5 t/Ha. Toujours selon Agrocentre, la saison 2014 n'était pas une bonne saison de culture en Montérégie compte tenu du climat qui s'est avéré plus rude qu'à l'habitude, de par un printemps tardif et un gel hâtif à l'automne. Il est également rapporté que les dates de semis furent très variées dû au climat inclément avec une tendance pour des semis plus tardifs par rapport à la période moyenne du début mai.

La saison 2014 est donc un banc d'essai plutôt particulier pour la méthode d'assimilation puisque la saison présente des particularités et ce, en conjonction avec l'uniformisation de certains paramètres de simulation qui s'avèrent en réalité variables comme par exemple les travaux du sol avant le semis, l'espacement des rangs ou les dates d'épandage de fertilisants ou d'irrigation qui sont ici inconnues et difficiles à estimer.

¹ Le réseau Agrocentre ne présente pas de carte de délimitation des régions « Montérégie-Est » et « Montérégie-Ouest ». Il est donc assumé que ces dernières réfèrent respectivement à la Montérégie Nord-Est et à la Montérégie Sud-Ouest.

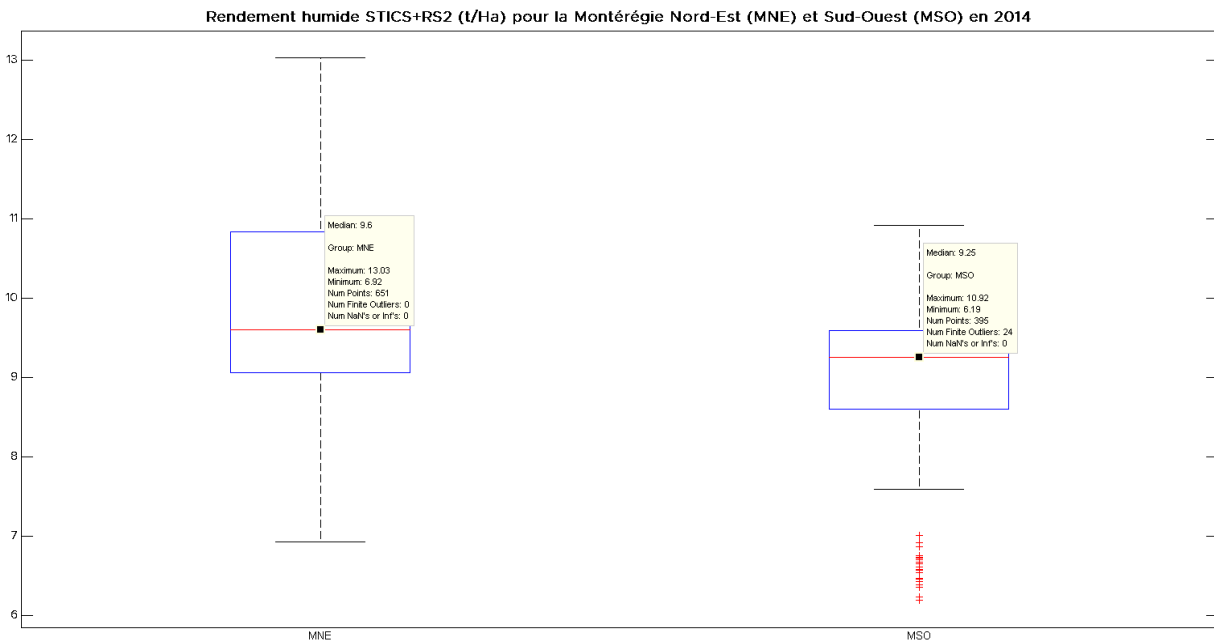


Figure 18 : Rendements humide des parcelles de maïs, en t/Ha, aléatoirement sélectionnées selon les sous-régions de Montérégie Nord-Est (MNE) et Montérégie Sud-Ouest (MSO) pour la saison de culture 2014. La marque centrale (ligne rouge) indique la médiane, les bordures inférieures et supérieures (boîte bleue) indiquent respectivement le 25^e et le 75^e percentile, les moustaches (lignes noires pointillées) indiquent l'étendue maximale des données n'étant pas considérées comme des données aberrantes tandis que les marqueurs (signes + rouges) indiquent les données considérées comme des données aberrantes.

Les différences (ici des surestimations) peuvent être liées, comme pour l'exemple de Fallowfield, à la mécanique interne du modèle, mais peuvent également être liées à l'échantillonnage aléatoire réalisé pour sélectionner les champs à simuler ainsi qu'à la définition de certains paramètres clés à la simulation, telle la définition des caractéristiques des sols, les pratiques culturales ou le cultivar unique utilisé plutôt que le cultivar réellement utilisé à chaque champ. En Montérégie, un total de 42 types de sols différents sont présents, leurs définitions étant réalisées au mieux des connaissances disponibles dans les fichiers de paramètres STICS. Ces fichiers ont été obtenus d'un autre projet, le projet Télérndement [Chokmani, Perreault et al., 2016].

En effet, en distinguant les rendements obtenus sur la base des différentes typologies des sols utilisés dans la configuration STICS+RS2, ce paramètre ressort comme très important pour expliquer le rendement final obtenu en simulation (Figures 19 et 20).

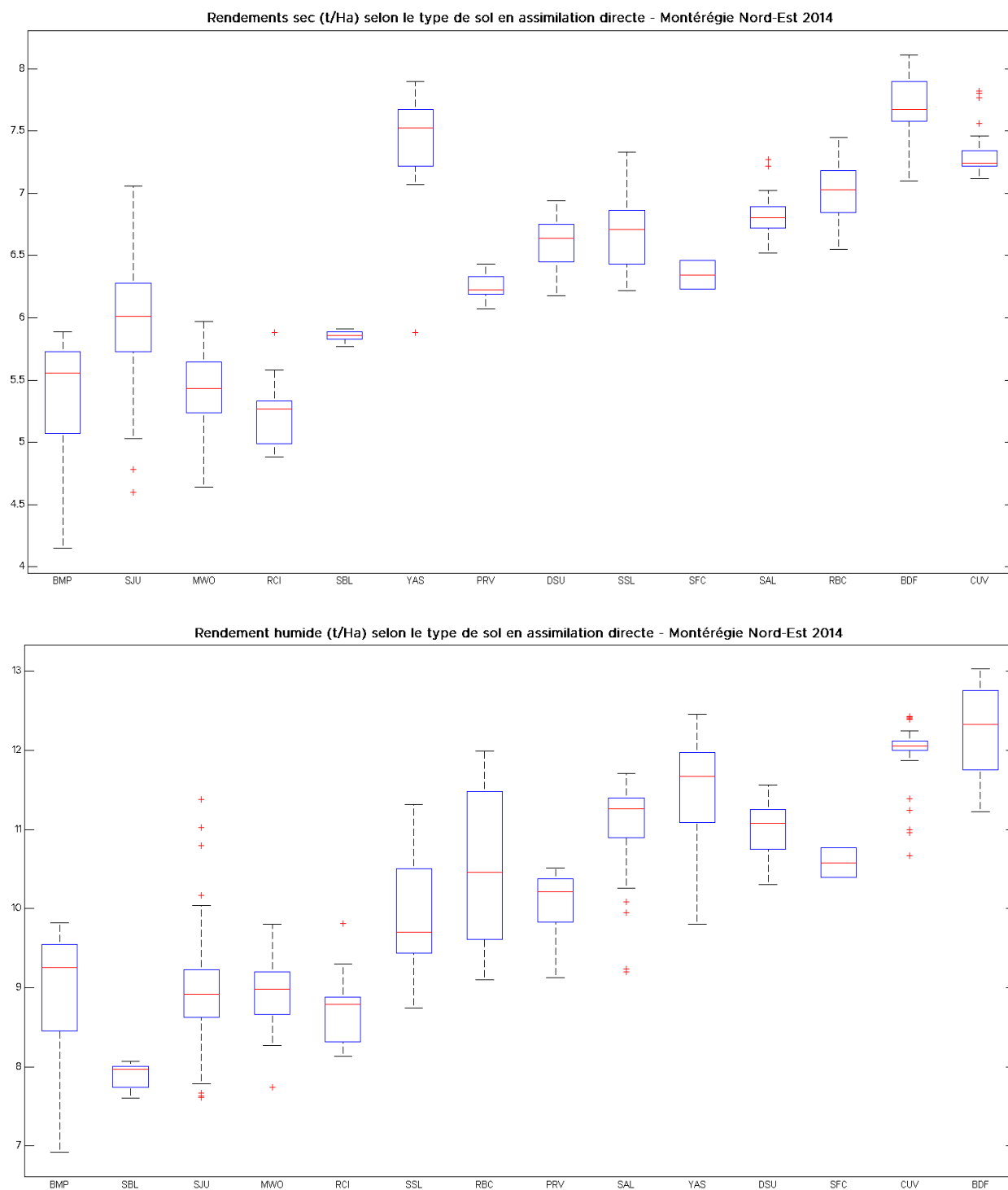


Figure 19 : Répartition des rendements secs (haut) et humides (bas) en Montérégie Nord-Est en 2014 en fonction des types de sol ayant permis la simulation STICS+RS2

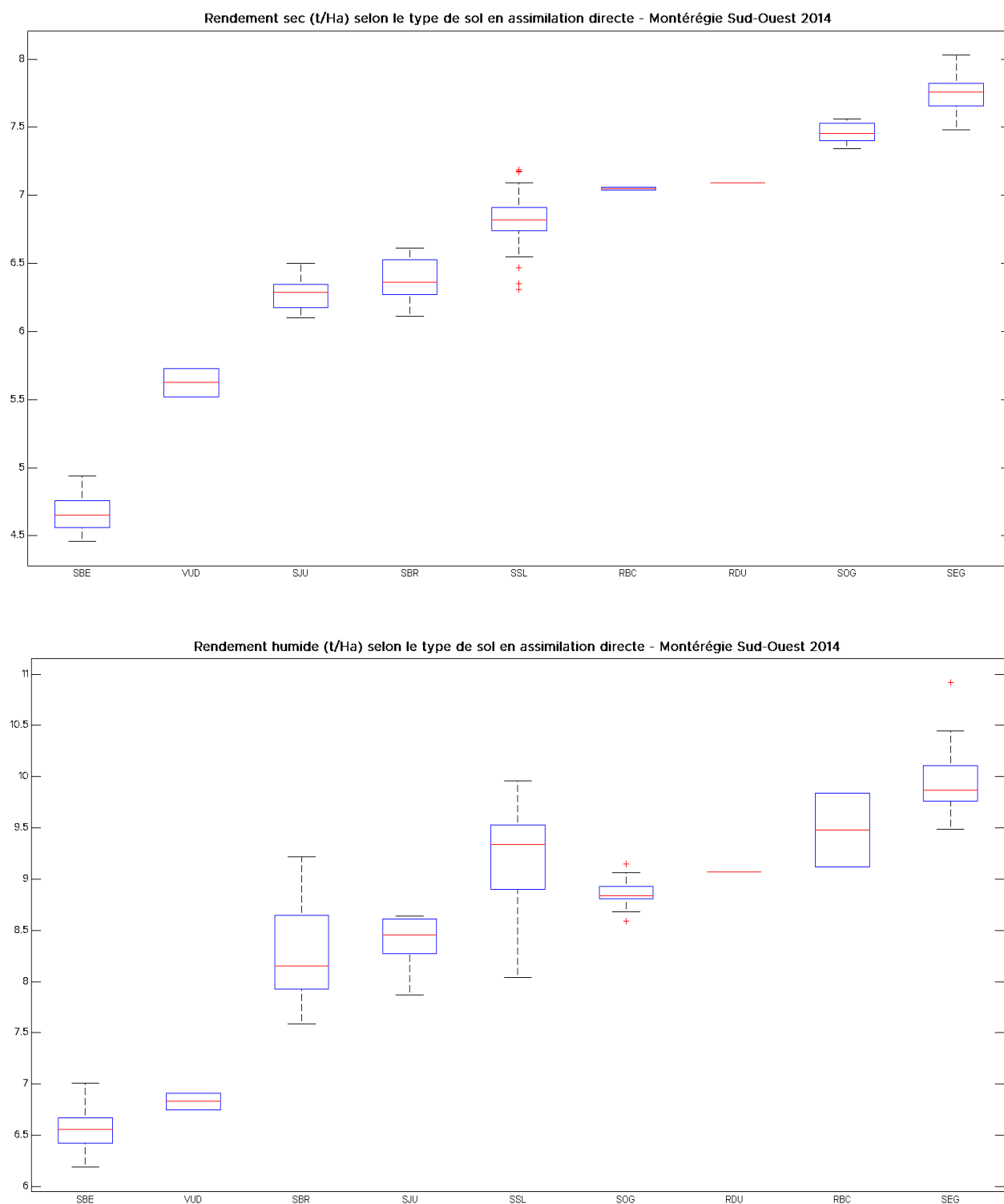


Figure 20 : Répartition des rendements secs (haut) et humides (bas) en Montérégie Sud-Ouest en 2014 en fonction des types de sol ayant permis la simulation STICS+RS2

Constats et perspectives

Des acquisitions d'images régulières au cours de la saison de croissance combinées à une banque d'informations fiables sur les pratiques culturales, le climat et les sols constituent une voie prometteuse pour améliorer la précision des simulations et de l'assimilation. Considérant les contraintes de STICS, exigeant une description continue de la variable d'état LAI en simulation, une approche d'assimilation directe, tentant de rebâtir la dynamique RSO à partir des LAI simulés par STICS, s'avère pour le moment l'avenue la plus simple et efficace pour arriver à des bons résultats.

Avec les données qui proviendront de la mission RADARSAT Constellation, avec un temps de revisite journalier au Canada, mais d'au maximum quatre jours, il sera envisageable de procéder à la construction d'un modèle WCM plus étayé et également plus régulier, avec une capacité à contrôler l'angle d'incidence des données utilisées pour la calibration, fixant ainsi un paramètre dans la calibration du modèle WCM. Un tel contexte, où la variable d'angle d'incidence est fixée, aura certainement un impact positif sur l'approche d'assimilation indirecte, demandant une inversion du modèle WCM.

Au niveau de l'humidité du sol, des tests ont été réalisés grâce à des modèles 1D comme STM² [Spokas and Forcella, 2017], afin d'évaluer la possibilité d'utiliser les valeurs dans l'assimilation directe pour les données régionales. Les résultats obtenus se sont avérés non concluants (Figure 21), STM² montrant un biais non-systématique par rapport aux observations terrain

Humidité du sol : STM2 versus mesures terrain

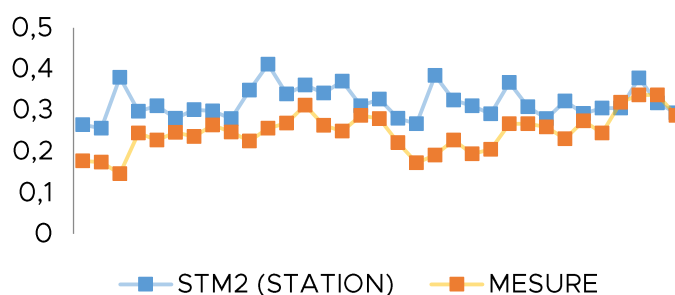


Figure 21 : Simulations d'humidité du sol obtenues grâce à des simulations sous STM², prenant en compte des paramètres météorologiques et des sols, comparativement aux observations terrain d'AAAC à Fallowfield en 2013.

de Fallowfield. Les données SMOS constituent donc une alternative viable et efficace

pour l'application régionale, ce malgré l'importante différence de résolution spatiale entre les données SMOS et RADARSAT.

La régionalisation des résultats d'estimation des rendements à partir des données satellitaires et des simulations de croissance, combinées avec une prise de mesures régulières au champ constitue un défi important afin de mieux comprendre l'évolution des cultures grâce à la technologie satellitaire RADAR. L'assimilation de données RADARSAT-2 semble prometteuse afin de pallier à une imprécision inhérente au paramétrage du simulateur de croissance STICS, que ce soit au niveau des paramètres internes ou externes (sol, climat, cultivar, pratiques culturales) utilisés. L'utilisation des données RSO permet donc de rapporter le simulateur sur « le bon chemin » sans néanmoins corriger la source de l'erreur d'estimation. L'identification et la correction de l'erreur d'estimation du LAI et du rendement constitue en soi un projet de recherche distinct.

Une étude approfondie de la sensibilité SAR aux nombreux paramètres du modèle STICS pourrait permettre d'améliorer les effets de l'assimilation directe des données en utilisant soit un plus grand nombre de paramètres ou en ciblant mieux ces derniers afin de sélectionner des paramètres démontrant une plus grande sensibilité au RSO. C'est potentiellement une voie vers une amélioration de la performance de l'estimation et de la procédure d'assimilation.

Conclusions et recommandations

La présente étude² a permis de démontrer le potentiel de l'assimilation des données RSO, plus spécifiquement des données de RADARSAT-2 en polarisation croisée, afin d'améliorer les estimations de rendements obtenus grâce au simulateur de croissance STICS.

L'application de la méthode faisant appel au modèle WCM en mode direct pour l'assimilation de données dans le modèle de culture STICS s'est montrée la plus efficace et la plus simple pour réaliser l'intégration des données RSO dans le modèle de culture.

Néanmoins, il est important de convenir que la recherche d'une adéquation entre les résultats de simulations STICS et les observations RADARSAT-2 (ou autre capteur RSO) ne constitue qu'un facteur d'amélioration des estimations de rendements et non une garantie de qualité. En fait, plusieurs facteurs agissent ici en synergie afin de permettre l'estimation du rendement. Les paramètres propres au modèle, que ce soit les paramètres initiaux par rapport au sol, aux pratiques culturales ou au climat ont tous un impact important sur la direction prise par la simulation. Une excellente adéquation entre la variable d'état LAI et les valeurs RSO observées, si obtenue via une mauvaise configuration du sol, du climat ou des pratiques culturales ne garantit en rien une bonne estimation du rendement. Il faut donc être vigilant et assurer que les données d'entrée présentent la meilleure qualité et précision possible, ce qui est d'ailleurs un important défi lorsque le travail est réalisé à l'échelle régionale et implique un traitement massif de données.

Dans cette perspective, la collecte de données de terrain, le partage de ces données, la contribution des agriculteurs(-trices) aux projets de recherche ainsi que l'accessibilité sur une base régulière aux données RSO sont les bases pour la calibration du WCM et de

² Tous les fichiers du projet ont été archivés. Voir annexe F.

configurations d'assimilation liant les modèles de culture et les données RSO fiables et efficaces.

Références

- AAAC (2010). Soil landscapes of Canada version 3.2. A. a. A.-F. Canada.
- Agro-Centre. (2014). "Rapport final de la récolte 2014." from <http://www.agrocentre.qc.ca/l-echo-du-champ/article/rapport-final-de-la-recolte-2014>.
- Attema, E. P. W. and F. T. Ulaby (1978). "Vegetation modeled as a water cloud." Radio Science **13**(2): 357-364.
- Bach, H. (1998). "Yield estimation of corn based on multitemporal LANDSAT-TM data as input for an agrometeorological model." Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A **7**(4): 809.
- Baret, F. (1986). Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales, Paris 11.
- Bouman, B. (1995). "Crop modelling and remote sensing for yield prediction." NJAS wageningen journal of life sciences **43**(2): 143-161.
- Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussi re, Y. M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J. P. Gaudill re, C. H nault, F. Maraux, B. Seguin and H. Sinoquet (2003). "An overview of the crop model stics." European Journal of Agronomy **18**(3): 309-332.
- Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M. H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J.-M. Machet, J. M. Meynard and R. Del colle (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**(5-6): 311-346.
- Chokmani, K., S. Perreault, Y. Gauthier, J. Poulin, M. Bernier, L. Vallée, D. Thériault, A. Brassard and H. Bencharki (2016). Développement d'une méthodologie opérationnelle de suivi des rendements   l'aide de l'imagerie Radarsat-2 dans deux cultures stratégiques pour le Canada : Maïs et Soya, INRS-ETE: 77.
- CIRAD (2002). "Mémento de l'Agronome."
- Fischer, A., L. Kergoat and G. Dedieu (1997). "Coupling satellite data with vegetation functional models: Review of different approaches and perspectives suggested by the assimilation strategy." Remote Sensing Reviews **15**(1-4): 283-303.
- Germain, M.-F. and C. Julien (1988). "L'application de la télédétection   l'estimation des superficies agricoles." The Canadian Journal of Statistics / La Revue Canadienne de Statistique **16**: 9-23.
- Hamel, M.-A. and E. Dorff. (2014). "Le ma s : troisième culture en importance au Canada." from <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/96-325-x/2014001/article/11913-fra.htm>.
- Hosseini, M., H. McNairn, A. Merzouki and A. Pacheco (2015). "Estimation of Leaf Area Index (LAI) in corn and soybeans using multi-polarization C- and L-band radar data." Remote Sensing of Environment **170**: 77-89.
- ISQ. (2018). "Superficie des grandes cultures, rendement   l'hectare et production, Montérégie, 2013-2017." from http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/profils/profil16/struct_econo/agriculture/culture_s16.htm.

Jégo, G., E. Pattey, G. Bourgeois, C. F. Drury and N. Tremblay (2011). "Evaluation of the STICS crop growth model with maize cultivar parameters calibrated for Eastern Canada." *Agronomy for Sustainable Development* **31**(3): 557-570.

Jégo, G., E. Pattey and J. Liu (2012). "Using Leaf Area Index, retrieved from optical imagery, in the STICS crop model for predicting yield and biomass of field crops." *Field Crops Research* **131**: 63-74.

Jiao, X., H. McNairn, J. Shang, E. Pattey, J. Liu and C. Champagne (2009). *The sensitivity of RADARSAT-2 quad-polarization SAR data to crop LAI*.

Jiao, X., H. McNairn, J. Shang, E. Pattey, J. Liu and C. Champagne (2011). "The sensitivity of RADARSAT-2 polarimetric SAR data to corn and soybean leaf area index." *Canadian Journal of Remote Sensing* **37**(1): 69-81.

Kerr, Y. H., P. Waldteufel, J. Wigneron, J. Martinuzzi, J. Font and M. Berger (2001). "Soil moisture retrieval from space: the Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **39**(8): 1729-1735.

Liu, C., J. Shang, P. W. Vachon and H. McNairn (2013). "Multiyear Crop Monitoring Using Polarimetric RADARSAT-2 Data." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **51**(4): 2227-2240.

Maas, S. (1988). "Using satellite data to improve model estimates of crop yield." *Agronomy Journal* **80**(4): 655-662.

Ontario, G. o. (2017). *GUIDE AGRONOMIQUE DES GRANDES CULTURES*. MAAARO.

Prévot, L., H. Chauki, D. Troufleau, M. Weiss, F. Baret and N. Brisson (2003). "Assimilating optical and radar data into the STICS crop model for wheat." *Agronomie* **23**(4): 297-303.

Sansoulet, J., E. Pattey, R. Kröbel, B. Grant, W. Smith, G. Jégo, R. Desjardins, N. Tremblay and G. Tremblay (2014). "Comparing the performance of the STICS, DNDC, and DayCent models for predicting N uptake and biomass of spring wheat in Eastern Canada." *Field Crops Research* **156**: 135-150.

Spokas, K. and F. Forcella (2017). "Software Tools for Weed Seed Germination Modeling." *Weed Science* **57**(2): 216-227.

STICS, É. (2014). "Les principes de fonctionnement." from <https://www6.paca.inra.fr/stics/Qui-sommes-nous/Présentation-du-modele-Stics/Les-principes-de-fonctionnement>.

Thornton, P. E., H. Hasenauer and M. A. White (2000). "Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria." *Agricultural and Forest Meteorology* **104**(4): 255-271.

Thornton, P. E. and S. W. Running (1999). "An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation." *Agricultural and Forest Meteorology* **93**(4): 211-228.

Thornton, P. E., S. W. Running and M. A. White (1997). "Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain." *Journal of Hydrology* **190**(3-4): 214-251.

Thornton, P. E., S. W. Running and M. A. White (1997). "Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain." Journal of Hydrology **190**(3): 214-251.

Thornton, P. E., M. M. Thornton, B. W. Mayer, Y. Wei, R. Devarakonda, R. S. Vose and R. B. Cook (2017). Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 3, ORNL Distributed Active Archive Center.

Ulaby, F., C. Allen, G. Eger lli and E. Kanemasu (1984). "Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index." Remote Sensing of Environment **14**(1-3): 113-133.

William-Houde, A.-F. (2019). "Quelques points à considérer pour les semis de maïs." from <http://www.williamhoude.com/trucs-et-astuces/mais/>.

Wiseman, G., H. McNairn, S. Homayouni and J. Shang (2014). "RADARSAT-2 polarimetric SAR response to crop biomass for agricultural production monitoring." IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens **7**(11): 4461-4471.

Communications et publications

Les publications et communications suivantes sont en cours de préparation :

- Publication pour Remote Sensing intitulée « *Improving corn field yield estimation using assimilation of SAR data in the STICS crop model* »³

Les publications et communications suivantes ont été soumises et présentées :

- Publication au congrès de L'AQT, présentée le 15 mai 2019 à Lennoxville, Sherbrooke, Québec. Titre de la présentation : « *Assimilation de données RSO dans le modèle de culture STICS* ».

³ Titre provisoire.

Annexes et suppléments

Les pages suivantes présentent les annexes suivantes :

- a. Exemple d'assimilation indirecte par forçage LAI à Fallowfield
- b. Exemple de fichier de description de sol – OttawaF14revised
- c. Code XML pour la conversion des données SMOS en GeoTIFF avec SNAP
- d. Formulation Matlab pour l'ajustement du WCM
- e. Codes Matlab pour la préparation des fichiers DayMet
- f. Liste des fichiers et dossiers archivés du projet

Annexe A : Forçage du LAI obtenu par inversion du WCM dans STICS

L'approche proposée fait appel à l'outil de forçage du LAI intégré à STICS et a la capacité de RADARSAT-2 d'obtenir des mesures LAI en inversant le modèle WCM. En utilisant ces mesures dans STICS, il est possible de reconstruire une dynamique LAI « crédible » (Figure 22) et d'utiliser la série LAI modélisée pour forcer STICS à suivre cette dernière, influençant ainsi les résultats des simulations. Il est important ici de noter que STICS exige, pour être en mesure de réaliser une simulation, d'avoir une série continue de valeurs LAI, d'où la nécessité de reconstruire une dynamique LAI avec le modèle de Baret [Baret,1986], présenté ci-dessous.

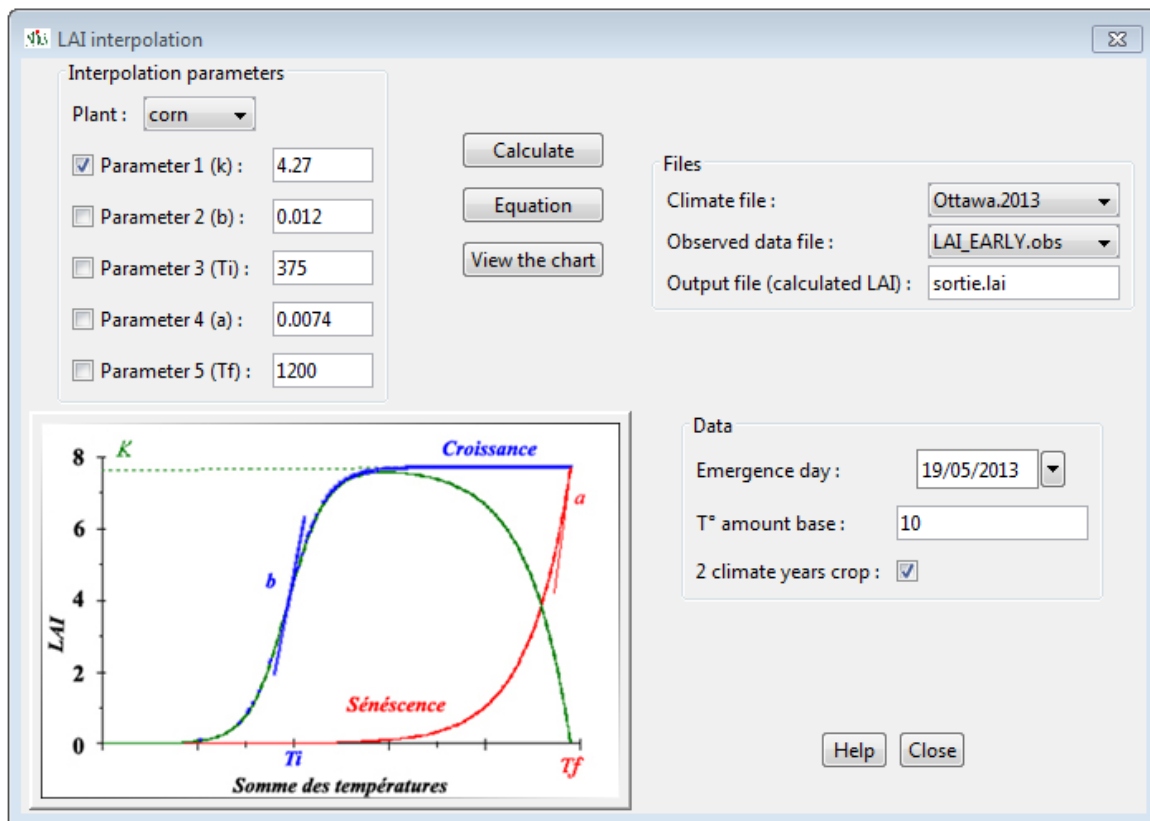


Figure 22 : Module STICS d'interpolation de la séquence LAI nécessaire à la simulation d'une saison de croissance de maïs dans STICS.

Dans ce modèle, les paramètres sont :

b : la pente de croissance LAI

a : la pente de sénescence LAI

Ti : Cumul UTM seuil pour la croissance

Tf : Cumul UTM seuil pour la sénescence complète

K : Seuil LAI maximal

L'inversion du modèle est une étape cruciale, qui dans notre cas, génère son lot d'erreurs et de mauvaises estimations du LAI car, contrairement à d'autres études réalisées sur l'utilisation du WCM en mode inverse, nos images n'ont pas un angle d'incidence constant et un mode d'acquisition régulier. De plus, la méthode d'inversion utilisée n'est pas la même que celle utilisée dans d'autres recherches, comme dans Hosseini, McNairn et al. (2015) qui semble utiliser une approche qui combine des modèles établis pour une combinaison de polarisations. Il faut aussi bien comprendre qu'il s'agit ici d'utiliser les valeurs obtenues par l'inversion d'un modèle dans un autre modèle, imbrication qui peut participer à générer des erreurs d'estimations de rendements substantielles.

Par exemple, pour l'inversion sur le champ #14 de Fallowfield en 2017, seules 4 valeurs obtenues par inversion sur les 10 semblent cohérentes, et uniquement 2 d'entre elles peuvent être comparées avec la réalité observée par les équipes d'AAAC. Il s'agit d'estimations de LAI par inversion les jours 184 (3 juillet 2017) et 226 (14 août 2017) avec des valeurs LAI inversées de respectivement 2,9 et 4,24.

La procédure d'assimilation, quoique difficilement applicable de manière automatique considérant les limitations et contraintes énoncées ci-dessus, semble permettre d'améliorer l'estimation de la biomasse. La figure 23 présente respectivement le paramètre d'état LAI tel que modélisé par l'équation de Baret en fonction des inversions WCM et les biomasses simulées résultant du forçage de ces dynamiques LAI dans

STICS. La biomasse déclarée par AAAC pour le champ #14 en 2017 était de 21,35 t/Ha et les simulations avec forçage considérant le jour 185, le jour 226 et les jours 185+226 ont respectivement permis d'estimer des biomasses de 19,45 t/Ha, 19,01 t/Ha et 19,18 t/Ha, comparativement à la simulation originale d'AAAC sans forçage qui donnait une biomasse estimée à 16,79 t/Ha.

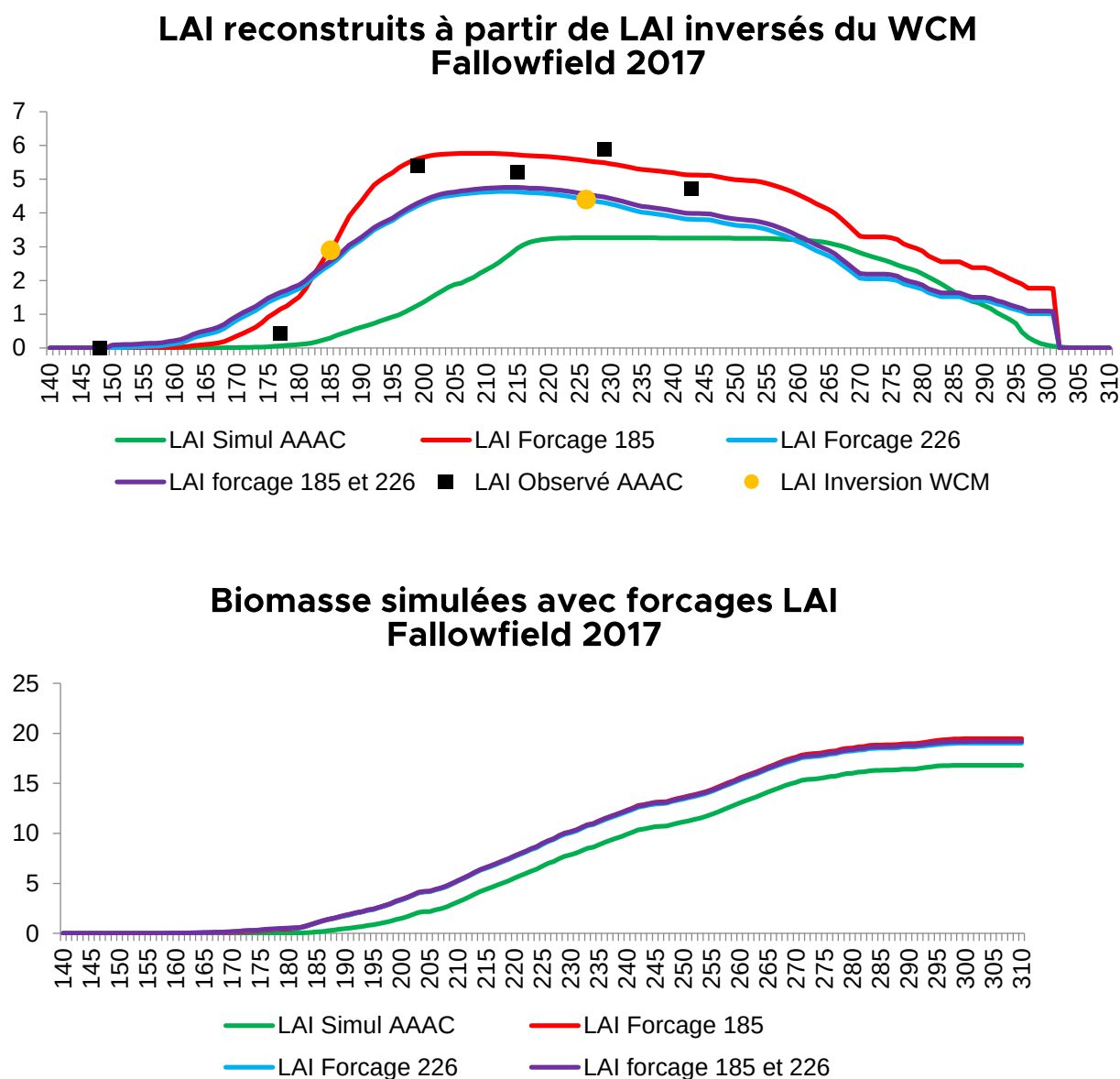


Figure 23 : LAI et biomasses simulées selon les diverses approches d'assimilation indirecte testées sur le champ #14 en 2017

Annexe B : Codes Matlab pour la préparation des fichiers DayMet

L'ensemble de ces codes permettent de préparer les données climatiques tirées de DayMet pour les extractions dans ArcMap (Voir objectif 4). Tous les codes ci-dessous dépendent de « *nctoolbox* » qui est disponible dans le dossier STICS-SOAR/Codes Matlab/nctoolbox. Pour l'installer sous Matlab, exécutez simplement le code « *setup_nctoolbox.m* ».

Radiation solaire (srad_export.m)

```
ds = ncgeodataset('E:\CLIMAT_STICS\2014\srad.nc');
srad = ds.data('srad');
ds2 = ncgeodataset('E:\CLIMAT_STICS\2014\day1.nc');
day1 = ds2.data('day1');
dimensions = size(srad);
jours = dimensions(1);
lignes = dimensions(2);
colonnes = dimensions(3);
lon = ds.data('lon');
lat = ds.data('lat');
depart = datenum('1-Jan-2014');
memoire = zeros(lignes, colonnes);

for i=1:jours
    nom = datestr(depart);
    donnees_srad = squeeze(srad(i,:,:));
    donnees_day1 = squeeze(day1(i,:,:));
    res = (donnees_srad.*donnees_day1) / 1000000;
    % donnees_srad = donnees_srad + memoire;
    R = georasterref('RasterSize', [248 210], 'RasterInterpretation',
    'cells', 'RowsStartFrom', 'west', 'ColumnsStartFrom', 'north', 'LongitudeLimits',
    [min(min(lon)) max(max(lon))], 'LatitudeLimits', [min(min(lat)) max(max(lat))]);
    geotiffwrite(strcat('E:\CLIMAT_STICS\2014\DSRAD\srad-
    ',nom,'.tif'),res,R,'CoordRefSysCode',4326)
    depart=addtodate(depart, 1, 'day');
    memoire = donnees_srad;
end
```

Pression de vapeur (vp_export.m)

```
ds = ncgeodataset('E:\STICS-SOAR data\Climat\MTR 2014-2015\2014\vp.nc');
vp = ds.data('vp');
dimensions = size(vp);
jours = dimensions(1);
lignes = dimensions(2);
```

```

colonnes = dimensions(3);
lon = ds.data('lon');
lat = ds.data('lat');
depart = datenum('1-Jan-2014');
memoire = zeros(lignes, colonnes);

for i=1:jours
    nom = datestr(depart);
    donnees_vp = squeeze(vp(i,:,:));
    % donnees_vp = donnees_vp + memoire;
    R = georasterref( 'RasterSize', [248 210], 'RasterInterpretation',
'cells', 'RowsStartFrom', 'west', 'ColumnsStartFrom', 'north', 'LongitudeLimits',
[min(min(lon)) max(max(lon))], 'LatitudeLimits', [min(min(lat)) max(max(lat))]);
    geotiffwrite(strcat('E:\STICS-SOAR data\Climat\MTR 2014-2015\2014/DVP/vp-
',nom, '.tif'), donnees_vp, R, 'CoordRefSysCode', 4326)
    depart=addtodate(depart, 1, 'day');
    memoire = donnees_vp;
end

```

Précipitations (prcp_export.m)

```

ds = ncgeodataset('E:\STICS-SOAR data\Climat\MTR 2014-2015\2014\prcp.nc');
prcp = ds.data('prcp');
dimensions = size(prcp);
jours = dimensions(1);
lignes = dimensions(2);
colonnes = dimensions(3);
lon = ds.data('lon');
lat = ds.data('lat');
depart = datenum('1-Jan-2014');
memoire = zeros(lignes, colonnes);

for i=1:jours
    nom = datestr(depart);
    donnees_prdp = squeeze(prcp(i,:,:));
    % donnees_prdp = donnees_prdp + memoire;
    R = georasterref( 'RasterSize', [248 210], 'RasterInterpretation',
'cells', 'RowsStartFrom', 'west', 'ColumnsStartFrom', 'north', 'LongitudeLimits',
[min(min(lon)) max(max(lon))], 'LatitudeLimits', [min(min(lat)) max(max(lat))]);
    geotiffwrite(strcat('E:\STICS-SOAR data\Climat\MTR 2014-2015\2014/DPRCP/prcp-
',nom, '.tif'), donnees_prdp, R, 'CoordRefSysCode', 4326)
    depart=addtodate(depart, 1, 'day');
    memoire = donnees_prdp;
end

```

Températures maximales et minimales (temp_export.m)

```
ds_tmax = ncgeodataset('E:\STICS-SOAR data\Climat\MTR 2014-2015\2014\tmax.nc');
ds_tmin = ncgeodataset('E:\STICS-SOAR data\Climat\MTR 2014-2015\2014\tmin.nc');
tmax = ds_tmax.data('tmax');
tmin = ds_tmin.data('tmin');
dimensions = size(tmax);
jours = dimensions(1);
lignes = dimensions(2);
colonnes = dimensions(3);
lon = ds.data('lon');
lat = ds.data('lat');
depart = datenum('1-Jan-2014');
memoire = zeros(lignes, colonnes);

for i=1:jours
    nom = datestr(depart);
    donnees_tmax = squeeze(tmax(i,:,:));
    donnees_tmin = squeeze(tmin(i,:,:));
    %donnees_tmoy = (donnees_tmax + donnees_tmin) / 2;
    R = georasterref( 'RasterSize', [248 210], 'RasterInterpretation',
    'cells', 'RowsStartFrom', 'west', 'ColumnsStartFrom', 'north', 'LongitudeLimits',
    [min(min(lon)) max(max(lon))], 'LatitudeLimits', [min(min(lat)) max(max(lat))]);
    %geotiffwrite(strcat('E:\STICS-SOAR data\Climat\MTR 2014-2015\2014\DTMOY/tmoy-
    ',nom,'.tif'),donnees_tmoy,R,'CoordRefSysCode',4326)
    geotiffwrite(strcat('E:\STICS-SOAR data\Climat\MTR 2014-2015\2014\DTMIN/tmin-
    ',nom,'.tif'),donnees_tmin,R,'CoordRefSysCode',4326)
    geotiffwrite(strcat('E:\STICS-SOAR data\Climat\MTR 2014-2015\2014\DTMAX/tmax-
    ',nom,'.tif'),donnees_tmax,R,'CoordRefSysCode',4326)
    depart=addtodate(depart, 1, 'day');
end
```


Annexe C : Exemple de fichier de description de sol – OttawaF14revised

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"
standalone="no"?>

<sols>

<sol nom="OttawaF14revised">

<param format="real" max="60.0"
min="0.0" nom="argi">31.3</param>

<param format="real" max="0.5"
min="0.05" nom="norg">0.3</param>

<param format="real" max="150.0"
min="10.0" nom="profhum">30</param>

<param format="real" max="100.0"
min="0.0" nom="calc">1</param>

<param format="real" max="9.0"
min="4.0" nom="pH">6.8</param>

<param format="real" max="0.5"
min="0.0" nom="concseuil">0.01</param>

<param format="real" max="0.6"
min="0.05" nom="albedo">0.6</param>

<param format="real" max="50.0"
min="0.0" nom="q0">2</param>

<param format="real" max="1.0"
min="0.0" nom="ruisolnu">0.0000</param>

<param format="real" max="1000.0"
min="10.0" nom="obstarac">200</param>

<param format="real" max="100.0"
min="5.0"
nom="pluiebat">50.0000</param>

<param format="real" max="2.0"
min="0.0" nom="mulchbat">3</param>

<param format="real" max="150.0"
min="10.0" nom="zesx">60.0000</param>

<param format="real" max="10.0" min="-
10.0" nom="cfes">5.0000</param>

<param format="real" max="0.2"
min="0.0001"
nom="z0solnu">0.0001</param>

<param format="real" max="20.0"
min="8.0" nom="csurNsol">10</param>

<param format="real" max="5.0"
min="0.0" nom="penterui">0.3300</param>

<option choix="2" nom="pebbles"
nomParam="codecailloux">

<choix code="1" nom="yes"/>

<choix code="2" nom="no"/>

</option>

<option choix="1" nom="macroporosity"
nomParam="codemacropor">

<choix code="1" nom="yes"/>

<choix code="2" nom="no"/>

</option>

<option choix="2" nom="cracks (case of
swelling clay soils)"
nomParam="codefente">

<choix code="1" nom="yes"/>

<choix code="2" nom="no"/>

</option>

<option choix="2" nom="artificial
drainage" nomParam="codrainage">

<choix code="1" nom="yes">

<param nom="profimper">10.0000</param>

<param nom="ecartdrain">0.0000</param>

<param nom="ksol">0.0000</param>

<param nom="profdrain">0.0000</param>

</choix>

<choix code="2" nom="no"/>

</option>

<option choix="2" nom="capillary rise"
nomParam="coderemontcap">
```

```

<choix code="1" nom="yes">
<param nom="capiljour">1.0000</param>
<param nom="humcapil">10.0000</param>
</choix>
<choix code="2" nom="no"/>
</option>
<option choix="1" nom="nitrification"
nomParam="codenitrif">
<choix code="1" nom="yes"/>
<choix code="2" nom="no"/>
</option>
<option choix="1" nom="denitrification"
nomParam="codedenit">
<choix code="1" nom="yes">
<param nom="profdenit">20</param>
<param nom="vpotdenit">10</param>
</choix>
<choix code="2" nom="no"/>
</option>
<tableau_entete nb_colonnes="8">
<colonne nom="epc"/>
<colonne nom="HCCF"/>
<colonne nom="HMINF"/>
<colonne nom="DAF"/>
<colonne nom="cailloux"/>
<colonne nom="typecailloux"/>
<colonne nom="infil"/>
<colonne nom="epd"/>
</tableau_entete>
<tableau nb_colonnes="8" nom="horizon
1">

```

```

<colonne nom="epc">10.00</colonne>
<colonne nom="HCCF">25.3</colonne>
<colonne nom="HMINF">13</colonne>
<colonne nom="DAF">1.33</colonne>
<colonne nom="cailloux">0.00</colonne>
<colonne nom="typecailloux">1</colonne>
<colonne nom="infil">50</colonne>
<colonne nom="epd">10</colonne>
</tableau>
<tableau nb_colonnes="8" nom="horizon
2">
<colonne nom="epc">10.00</colonne>
<colonne nom="HCCF">25.3</colonne>
<colonne nom="HMINF">13</colonne>
<colonne nom="DAF">1.33</colonne>
<colonne nom="cailloux">0.00</colonne>
<colonne nom="typecailloux">1</colonne>
<colonne nom="infil">50</colonne>
<colonne nom="epd">10</colonne>
</tableau>
<tableau nb_colonnes="8" nom="horizon
3">
<colonne nom="epc">10.00</colonne>
<colonne nom="HCCF">25.3</colonne>
<colonne nom="HMINF">13</colonne>
<colonne nom="DAF">1.33</colonne>
<colonne nom="cailloux">0.00</colonne>
<colonne nom="typecailloux">1</colonne>
<colonne nom="infil">10</colonne>
<colonne nom="epd">10</colonne>

```

```

</tableau>

<tableau nb_colonnes="8" nom="horizon
4">

<colonne nom="epc">30.00</colonne>
<colonne nom="HCCF">25.1</colonne>
<colonne nom="HMINF">14.8</colonne>
<colonne nom="DAF">1.43</colonne>
<colonne nom="cailloux">0.00</colonne>
<colonne nom="typecailloux">1</colonne>
<colonne nom="infil">10</colonne>
<colonne nom="epd">10</colonne>
</tableau>

<tableau nb_colonnes="8" nom="horizon
5">

```

```

<colonne nom="epc">40</colonne>
<colonne nom="HCCF">27.5</colonne>
<colonne nom="HMINF">16.5</colonne>
<colonne nom="DAF">1.34</colonne>
<colonne nom="cailloux">0.00</colonne>
<colonne nom="typecailloux">1</colonne>
<colonne nom="infil">20</colonne>
<colonne nom="epd">10</colonne>
</tableau>
</sol>
</sols>

```


Annexe D : Code XML de conversion SMOS vers GeoTIFF avec SNAP

```
<graph id="Graph">
  <version>1.0</version>
  <node id="Read">
    <operator>Read</operator>
    <sources/>
    <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
      <file>E:\STICS-SOAR
data\SMOS\SM_REPR_MIR_SMUDP2_20130515T232152_20130516T001506_650_200_1.zip</file>
    </parameters>
  </node>
  <node id="Subset">
    <operator>Subset</operator>
    <sources>
      <sourceProduct refid="Read"/>
    </sources>
    <parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">
      <sourceBands>Soil_Moisture</sourceBands>
      <region>0,0,16384,8064</region>
      <geoRegion/>
      <subSamplingX>1</subSamplingX>
      <subSamplingY>1</subSamplingY>
      <fullSwath>>false</fullSwath>
      <tiePointGridNames/>
      <copyMetadata>>true</copyMetadata>
    </parameters>
  </node>
  <node id="Write">
    <operator>Write</operator>
```

```

<sources>

  <sourceProduct refid="Subset"/>

</sources>

<parameters class="com.bc.ceres.binding.dom.XppDomElement">

  <file>E:\STICS-SOAR
data\SMOS\GTIFF_SUBSETS\Subset_SM_REPR_MIR_SMUDP2_20130515T232152_20130516T001506_650
_200_1.tif</file>

  <formatName>GeoTIFF</formatName>

</parameters>
</node>
<applicationData id="Presentation">
  <Description/>
  <node id="Read">
    <displayPosition x="29.0" y="173.0"/>
  </node>
  <node id="Subset">
    <displayPosition x="200.0" y="236.0"/>
  </node>
  <node id="Write">
    <displayPosition x="455.0" y="135.0"/>
  </node>
</applicationData>
</graph>

```

Annexe E : Formulation Matlab du modèle WCM et ajustement

La formulation de l'équation WCM sous Matlab est la suivante :

$$S = (A * L^E * \cosd(I) * (1 - \exp(-2 * B * L^F / \cosd(I)))) + (C + D * M) * \exp(-2 * B * L^F / \cosd(I))$$

Exemple sur les données des trois sous-sections du champ #14 en 2013 (n=17) :

- Le vecteur L contient les valeurs de LAI aux dates correspondantes aux acquisitions RSO tirées des interpolations sur les observations terrain d'AAAC.
- Le vecteur S contient les valeurs RSO en puissance tirées des images RADARSAT-2 acquises via l'entente SOAR-E.
- Le vecteur M contient les valeurs d'humidité du sol aux dates correspondantes aux acquisitions RSO tirées des données SMOS.
- Le vecteur I contient les valeurs d'angle d'incidence moyen pour le mode d'acquisition de chaque image RADARSAT-2.

Résultat de la calibration (voir code Matlab aux pages suivantes pour la procédure) :

Tableau 5 : Paramètres pour le modèle WCM à partir des données de 2013 au champ #14 à Fallowfield. Les paramètres obtenus sont présentés avec les bornes utilisées pour leur estimation dans l'algorithme.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
A	0.0322 [0, ∞]	D	0.0146 [0.001, 0.2]
B	2.1818 [0, ∞]	E	0.0389 [-∞, ∞]
C	0.0029 [0, ∞]	F	7.7907 [-∞, ∞]

L'ajustement a été réalisé avec la méthode des moindres carrés, suivant l'algorithme “Trust-Region-Reflective” avec les bornes indiquées au tableau 5. La norme des valeurs résiduelles est de 0,00019, la corrélation R^2 est de 0,9078 (Figure 24) et l'erreur quadratique moyenne (MSE) de 0,00001, considérant les rétrodiffusions en puissances.

$\sigma^0 = 0.03 * L^{0.04} \cos(\theta) \times \left(1 - \exp\left(\frac{-2 * 2.18 * L^{7.79}}{\cos(\theta)}\right) \right) + 0.003 * M_V + 0.015$ $\times \exp\left(\frac{-2 * 2.18 * L^{7.79}}{\cos(\theta)}\right)$	(7)
--	------------

WCM with RSO=f(Indicence, SMOS, LAI) Calibration Fallowfield 2013

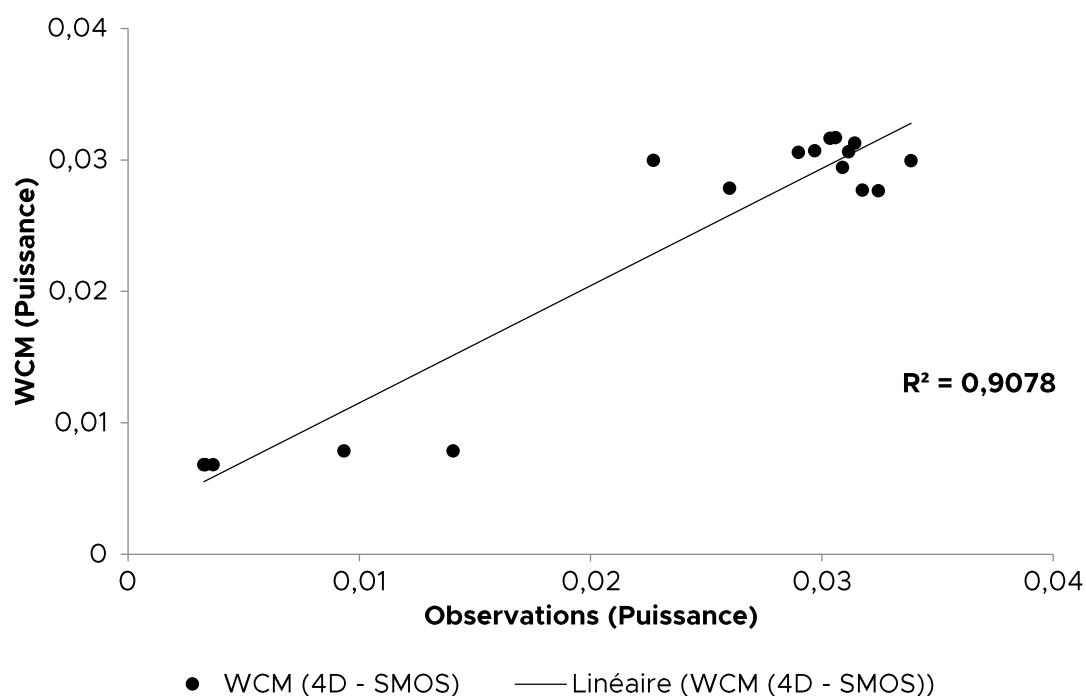


Figure 24 : Modèle WCM ajusté aux données de calibration de 2013 obtenues via AAAC (LAI), les données RADARSAT-2 (Incidence) et SMOS (Humidité du sol)


```

%% Code de calibration du WCM avec la méthode des moindres carrés %%

clear

L = transpose([0, 0, 1.388, 2.136, 3.594, 4.439, 0.095, 2.189, 2.885, 4.147, 4.693,
0, 0.063, 2.147, 2.968, 3.426, 4.267]);
S = transpose([0.00934, 0.00335, 0.03089, 0.03142, 0.03175, 0.03115, 0.00368,
0.02272, 0.03036, 0.02601, 0.02969, 0.01406, 0.00328, 0.03385, 0.03059, 0.03244,
0.02899]);
M = transpose([0.338, 0.266, 0.236, 0.261, 0.24, 0.296, 0.266, 0.236, 0.261, 0.24,
0.296, 0.338, 0.266, 0.236, 0.261, 0.24, 0.296]);
I = transpose([19.400, 31.110, 25.480, 19.380, 35.070, 26.150, 31.110, 25.480,
19.380, 35.070, 26.150, 19.400, 31.110, 25.480, 19.380, 35.070, 26.150]);

X = [I M L];
yData = S;

fun = @(x,X)(x(1).*X(:,3).^x(5).*cosd(X(:,1))).*(1-exp(-
2*x(2).*X(:,3).^x(6)./cosd(X(:,1))))+(x(3)+x(4).*X(:,2)).*exp(-
2*x(2).*X(:,3).^x(6)./cosd(X(:,1))));

options = optimset('Algorithm','trust-region-
reflective','MaxFunEvals',1e5,'MaxIter',1e5,'TolFun', 1e-5, 'TolX', 1e-5);
lb=[0,0,0,0.0001,-Inf,-Inf];
ub=[Inf,Inf,Inf,0.2,Inf,Inf];
guess=[0.1,0.8,-0.01,0.1,0.6,0.7];
[params,resnorm,residual,exitflag,output] = lsqcurvefit(fun, guess, X, yData, lb, ub,
options);

disp(params)

OUT = zeros(1,size(M,1));

for r = 1:size(M,1)
    INC = I(r)
    MOIS = M(r)
    LAI = L(r)
    RSO = WCM(params, INC, MOIS, LAI);
    disp(RSO)
    OUT(1,r)=RSO;
end

```


Annexe F : Liste des fichiers et dossiers archivés du projet

N.B. Les arborescences doivent être modifiées dans les fichiers afin de refléter votre réalité locale.

DONNÉES D'ASSIMILATION RÉGIONALE

Données sur les précipitations de 2014 pour l'assimilation régionale

Remise finale\Données assimilation régionale\Extraction ArcMap\READY_PRCP_2014.txt

Données sur la radiation solaire de 2014 pour l'assimilation régionale

Remise finale\Données assimilation régionale\Extraction ArcMap\READY_RAD_2014.txt

Données RSO de 2014 pour l'assimilation régionale

Remise finale\Données assimilation régionale\Extraction ArcMap\READY_RSO_2014.txt

Données sur l'humidité du sol de 2014 pour l'assimilation régionale

Remise finale\Données assimilation régionale\Extraction ArcMap\READY_SM_2014.txt

Données sur les sols de 2014 pour l'assimilation régionale

Remise finale\Données assimilation régionale\Extraction ArcMap\READY_SOLS_2014.txt

Données sur les températures maximales de 2014 pour l'assimilation régionale

Remise finale\Données assimilation régionale\Extraction ArcMap\READY_TMAX_2014.txt

Données sur les températures minimales de 2014 pour l'assimilation régionale

Remise finale\Données assimilation régionale\Extraction ArcMap\READY_TMIN_2014.txt

Données sur les pressions de vapeur de 2014 pour l'assimilation régionale

Remise finale\Données assimilation régionale\Extraction ArcMap\READY_VP_2014.txt

Fichiers descriptifs de la météo par parcelle en Montérégie (#parcelle.csv)

Remise finale\Données assimilation régionale\Météo par parcelle - Montérégie\Meteo 2014*.csv

DONNÉES DE PARAMÉTRISATION DE STICS⁴

Fichiers de paramètres des cultivars pour STICS

Remise finale\Données assimilation régionale\Paramètres STICS\Mais_Canada_plt.xml

Fichiers de paramètres des sols pour STICS

Remise finale\Données assimilation régionale\Paramètres STICS\sols.xml

Fichiers de paramètres de pratiques culturales pour STICS

Remise finale\Données assimilation régionale\Paramètres STICS\region_tec.xml

Fichiers de paramètres d'initialisation pour STICS

Remise finale\Données assimilation régionale\Paramètres STICS\region_ini.xml

Fichiers descriptif des caractéristiques de la station météo pour STICS

Remise finale\Données assimilation régionale\Paramètres STICS\Station_sta.xml

Fichiers descriptif des unités de simulations pour STICS

Remise finale\Données assimilation régionale\Paramètres STICS\usms.xml

Fichiers indiquant les variables de sortie archivées par STICS

Remise finale\Données assimilation régionale\Paramètres STICS\var.mod

Code Python pour la simulation régionale⁵

Remise finale\Données assimilation régionale\Paramètres STICS\Regional_Assimilation.py

CODES DE PRÉPARATION DES FICHIERS CLIMATIQUES DE DAYMET

Librairie Matlab NCTOOLBOX pour la lecture des fichiers NetCDF

Remise finale\Données climatiques DayMet\Codes Matlab\nctoolbox\

Code d'exportation des fichiers de précipitations DayMet

Remise finale\Données climatiques DayMet\Codes Matlab\prcp_export.m

⁴ Ces fichiers doivent se trouver dans le dossier de travail de STICS (c-a-d. « Workspace »).

⁵ Des librairies Python doivent être installées pour que ce code soit fonctionnel. Les librairies tqdm, numpy, pandas et matplotlib doivent être installées en ouvrant un invite de commandes et en tapant « pip install » et le nom de la librairie. Pour plus d'informations : <https://packaging.python.org/tutorials/installing-packages/>

Code d'exportation des fichiers de radiation solaire DayMet

Remise finale\Données climatiques DayMet\Codes Matlab\srad_export.m

Code d'exportation des fichiers de températures maximales et minimales DayMet

Remise finale\Données climatiques DayMet\Codes Matlab\temp_export.m

Code d'exportation des fichiers de pression de vapeurs DayMet

Remise finale\Données climatiques DayMet\Codes Matlab\vp_export.m

FICHIERS CLIMATIQUES DE DAYMET POUR LA SIMULATION RÉGIONALE EN 2014

Fichiers NetCDF de l'illumination solaire de DayMet

Remise finale\Données climatiques DayMet\Données DayMet\2014\dayl.nc

Fichiers NetCDF de précipitations de DayMet

Remise finale\Données climatiques DayMet\Données DayMet\2014\prcp.nc

Fichiers NetCDF de radiation solaire de DayMet

Remise finale\Données climatiques DayMet\Données DayMet\2014\srad.nc

Fichiers NetCDF de températures maximales de DayMet

Remise finale\Données climatiques DayMet\Données DayMet\2014\tmax.nc

Fichiers NetCDF de températures minimales de DayMet

Remise finale\Données climatiques DayMet\Données DayMet\2014\tmin.nc

Fichiers NetCDF de pression de vapeur de DayMet

Remise finale\Données climatiques DayMet\Données DayMet\2014\vp.nc

FICHIERS DES SIMULATIONS STICS POUR FALLOWFIELD (Fourni par G. Jégo)

Fichier compressé contenant toutes les données pour la configuration de STICS pour la simulation originale, sans assimilation, à Fallowfield, champ #14 en 2013 et 2017

Remise finale\Simulation STICS Fallowfield\Simulations2013&2017.zip

FICHIER DU LOGICIEL STICS, version 8.5

Fichier compressé contenant tous les fichiers du logiciel STICS

Remise finale\JavaSTICS-1.40-stics-8.50.zip

FICHIERS GÉOSPATIAUX

Fichier compressé de la Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées de la Financière Agricole du Québec pour 2014

Remise finale\BDPPAD_V03_2014.zip

Fichier XML pour la conversion automatique des images SMOS en format GeoTIFF (Nécessite le logiciel gratuit SNAP de l'ESA)

Remise finale\SNAP_Graph_CONVERSION.xml

FICHIERS DESCRIPTIFS DES SOLS POUR LA SIMULATION RÉGIONALE EN 2014

Fichiers décrivant les divers types de sols en Montérégie (Non compatibles STICS)

Remise finale\Fichiers de sols\Sol*.sol

Fichiers vierge de structure des fichiers de sols pour la création du fichier sols.xml

Remise finale\Fichiers de sols\sol_unit.txt

Code permettant de compiler les fichiers .sol en format compatible STICS (sols.xml)

Remise finale\Fichiers de sols\PREP_SOLS.py

FICHIERS DE DONNÉES DE VALIDATION POUR FALLOWFIELD EN 2013 et 2017

Données de validation et de calibration pour 2013

Remise finale\Validation Fallowfield\CFIA-F14_2013_Completes.xlsx

Données de validation et de calibration pour 2017

Remise finale\Validation Fallowfield\CFIA-F14_2017.xlsx